Potential und Machbarkeit eines automatisierten Kreuzungsassistenten für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer

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

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Alexander Stoff

aus Wiesbaden

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

Tag der Einreichung: 25.08.2014

Tag der mündlichen Prüfung: 02.12.2014

Darmstadt, 2015

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 maßgeblich im Rahmen der durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsinitiative "Kooperative Sensorik und kooperative Perzeption für die Präventive Sicherheit im Straßenverkehr" (Ko-FAS) erarbeitet.

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski, Leiter des Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik, danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Des weiteren Danke ich dem BMWi für die Förderung und damit der Möglichkeit zu einem spannenden wissenschaftlichen Thema. Die erfolgreiche Durchführung des Projektes Ko-KOMP innerhalb der oben genannten Forschungsinitiative wäre dabei nicht möglich gewesen ohne die gute Zusammenarbeit mit den Kollegen der ZENTEC GmbH, der Continental Safety Engineering International GmbH, der Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH sowie des Fraunhofer Heinrich-Hertz Instituts.

Danken möchte ich allen Mitarbeitern von FZD einschließlich der Werkstätten und des Sekretariats für die zuverlässige und unbürokratische Unterstützung während meiner gesamten Dienstzeit. Mein Dank gilt auch meinen Studenten, die im Rahmen studentischer Arbeiten und als wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt Danke ich meinen Eltern für die vielfältige Unterstützung und insbesondere für die mir gebotenen Entwicklungsfreiheiten und die Ermöglichung einer ausgezeichneten Ausbildung.

Besonders möchte ich mich bei meiner Frau Rika und meinem Sohn Finn Elias bedanken, die durch Verzicht und nahezu grenzenloses Verständnis während der gesamten Arbeit mir eine starke Motivation waren.

Alexander Stoff

Wiesbaden, April 2015

Inhaltsverzeichnis

A	bküı	rzungen	VII
F	orme	elzeichen und Indizes	VIII
K	urzz	usammenfassung	X
1	Ein	leitung	1
		Motivation und Ausgangslage	
	1.2	Stand der Technik und Forschung Kreuzungsassistenz	3
		1.2.1 Ansätze	
		1.2.2 Assistenzziel	5
		1.2.3 Assistenzstrategie	6
	1.3	Zwischenfazit und Ableitung des Forschungsbedarfs	9
		1.3.1 Bewertung Stand der Technik	9
		1.3.2 Forschungsziele und -methodik	11
2	Rai	ndbedingungen für ein Schutzkonzept	13
	2.1	Analyse Kreuzungsszenario	13
	2.2	Eingriffszeitpunkt	16
		2.2.1 Rechtlicher Rahmen und Umsetzung in der Praxis	17
		2.2.2 Erweiterung auf vorrangige Verkehrsteilnehmer	19
	2.3	Eingriffstyp	31
		2.3.1 Kollisionsvermeidung	32
		2.3.2 Kollisionsfolgenlinderung	40
		2.3.3 Fahrerverhalten und Folgen für Systemauslegung	43
	2.4	Zwischenfazit	45
3	Ma	schinelle Umfelderfassung	47
	3.1	Anforderungen	47
		3.1.1 Informationsbedarf	
		3.1.2 Sensorreichweite und Öffnungswinkel	48
	3.2	Bewertung anhand Stand der Technik	
		3.2.1 Sensorreichweite und Öffnungswinkel	52
		3.2.2 Kraftschlussbeiwert Reifen-Fahrbahn	57
		3.2.3 Zwischenfazit	58
4	Fur	ıktionsalgorithmus	59
	4.1	Konzept	59
		111 Umfeldinterpretation	50

		.40 studoutisch a Aubaitau	151
		e Veröffentlichungen	
Li	itera	turverzeichnis	143
	8.4	Fahrzeugbestand und Überhanglängen nach Segmenten und Baureihen	134
		Parameter des Simulationsmodells	
	8.2	Potential Kollisionsfolgenlinderung	
		8.1.2 Optimierung des streckenbezogenen Lateralversatzes	
		8.1.1 Zeitliche Komponente Ausweichmanöver	
-		Eingriffstyp	
8	Anl	nang	126
7	Zus	ammenfassung und Ausblick	121
		6.3.2 Wirksamkeit	116
		6.3.1 Methodik	113
	6.3	Schutzpotential	113
		6.2.2 Kollisionsfolgenlinderung	108
		6.2.1 Kollisionsvermeidung	102
		Funktionsgüte und Robustheit der Regelung	
		Untersuchungswerkzeug	
6	Ver	ifizierung und Bewertung	101
	5.3	Kollisionsfolgenlinderung	98
	5.2	Kollisionsvermeidendes Ausweichmanöver	95
		5.1.2 Reifenmodell	93
		5.1.1 Einspurmodell	
		Fahrzeugmodell	
5	Reg	gelungsalgorithmus	90
	4.4	Zwischenfazit	89
		4.3.1 Adressierbare Szenarien	79
	4.3	Theoretisches Potential.	79
		4.2.3 Einfluss Gegenlenkzeitpunkt	77
		4.2.2 Dynamisches Verhalten und Gegenlenkzeitpunkt	
		4.2.1 Punktdynamischer Modellansatz	
	4.2	Modellannahmen/Modellansatz	
		4.1.3 Situationsanalyse - Kollisionsfolgenlinderung	
		4.1.2 Situationsanalyse - Kollisionsvermeidung	62

Abkürzungen

Abkürzung Beschreibung

Abs. Absatz

ACC Adaptive Cruise Control

Art. Artikel

AW Annäherungswinkel BA Bremsassistent

C2C/I/X-C Car-to-Car/Infrastructure/X-Communication

DAT Deutsche Automobil Treuhand GmbH

EG Eigenlenk-Gradient

ESC Electronic Stability Contol FAS Fahrerassistenzsystem

FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

FZ Fahrgastzelle

GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft

GIDAS German In-Depth Accident Study

Ko-FAS Kooperative Sensorik und kooperative Perzeption für die Präventive Sicherheit im

Straßenverkehr

Ko-KOMP Kooperative Komponenten

LIDAR Light Detection and Ranging

LR Long Range (Fernbereich)

LV Leichtverletzt

LZA Lichtzeichenanlage

KB Kollisionsbereich

KW Kollisionswinkel

MMS Mensch-Maschine-Schnittstelle

MR Mid Range (mittlerer Entfernungsbereich)

NBA NotbremsassistentNV Nicht-VerletztOLG Oberlandesgericht

RADAR Radio Detection and Ranging

RASt Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen

SR Short Range (Nahbereich)
StVO Straßenverkehrsordnung

SV Schwerverletzt

Tot Getötet

TTB Time-to-Brake
TTC Time-to-Collision

WÜ Wiener Übereinkommen

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m/s^2	Beschleunigung
B	m	Breite
c_{α}	N/m	Reifenquersteifigkeit
c_λ	N/m	Reifenlängssteifigkeit
d	m	Distanz
F	N	Kraft
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe über Fahrbahn
l/L	m	Länge
l	m	Radstand
m	kg	Masse
P	m	Position
p	%	Stochastische Wahrscheinlichkeit
R	m	Kurvenradius
S	m	Strecke
t	S	Zeit
v	m/s, km/h	Geschwindigkeit
x	m	Position
x	m	Position
α	°, rad	Schräglaufwinkel
β	°, rad	Schwimmwinkel
\dot{eta}	°/s, rad/s	Schwimmwinkelgeschwindigkeit
γ	°, rad	Beschleunigungswinkel
δ	°, rad	Radlenkwinkel
$\delta_{\scriptscriptstyle A}$	°, rad	Ackermann-Lenkwinkel
δ_H	°, rad	Lenkradwinkel
Δ	diverse	Differenz
K	°, rad	Kurswinkel
K	°/s, rad/s	Kurswinkelgeschwindigkeit
λ	%	Schlupf
μ	N/N	Reibbeiwert
Φ_k	°, rad	Kreuzungswinkel
$\Psi_{_{V}}$	°, rad	Gierwinkel
$\Psi_{\scriptscriptstyle \mathcal{K}}$	°, rad	Kurswinkel
$\dot{\psi}_{_{\scriptscriptstyle V}}$	°/s, rad/s	Gierwinkelgeschwindigkeit, Gierrate
$\dot{\psi}_{\kappa}$	°/s, rad/s	Kursrate

Index **Beschreibung** 0 Startposition, Anfangsansp. Ansprechdauer bBrake (bremsen) CACollision Avoidance (Kollisionsvermeidung) Charakteristisch char CMCollision Mitigation (Kollisionsfolgenlinderung) collCollision (Kollision) DDetektion EBREntgegen Bewegungsrichtung Evasion (Ausweichen) e ego Ego-Fahrzeug Evasion (ausweichen) eva f front (vorne) Gegenlenkdauer geg IBRIn Bewegungsrichtung ist Istwert Maximal max Minimal min Obstacle (Hindernisobjekt) obs Optimum opt predicted (prädiziert) pred rear (hinten) r ref Referenz Relativ relsoll Zielwert SPSchwerpunkt Stationär stat Vorne ν Koordinatenrichtung x x Koordinatenrichtung y y

Koordinatenrichtung z

Senkrecht

Parallel

z

Kurzzusammenfassung

Kollisionen an Kreuzungen, insbesondere sogenannte Abbiege- und Einbiegen-/Kreuzen-Unfälle, stellen einen der Schwerpunkte des Unfallgeschehens zwischen Pkw dar. Bisher wird sich im Bereich von Forschung und Entwicklung zur Adressierung dieser Szenarien auf die Einhaltung der Vorfahrtsregelung durch den wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer fokussiert. Von einer Vollausstattung des Fahrzeugbestands mit entsprechenden Schutzfunktionalitäten ausgehend, lassen sich auf diese Weise alle Kollisionen zwischen Pkw zumindest in ihren Unfallfolgen signifikant lindern. Berücksichtigt man zusätzlich die Marktentwicklung solcher Systeme, so ist es aber zumindest mittelfristig zur Steigerung der Verkehrssicherheit zielführend, auch direkt den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer vor einer Vorfahrtmissachtung durch aktive Maßnahmen zu schützen.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Frage, wie eine solche Schutzfunktionalität im Detail ausgestaltet sein kann und wie groß das damit verbundene Wirkpotential ist. Ziel des ersten Abschnitts ist dabei die Klärung, welche Maßnahmen für die vorliegende Konstellation eines vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmers, unter Berücksichtigung der Besonderheiten des Kreuzungsszenarios, grundsätzlich in Frage kommen, wann diese initiiert und wie im Detail umzusetzen sind. Aufbauend auf einer Analyse der Besonderheiten des Kreuzungsszenarios, die sich insbesondere aus den unterschiedlichen Bewegungsrichtungen der Beteiligten, sowie deren Rollenverteilung ergeben, wird gezeigt, dass unter dem Gesichtspunkt der potentiellen Akzeptanz gegenüber einem Eingriff ein solcher erst dann zu empfehlen ist, wenn das Hindernisobjekt die Kollision nicht mehr eigenständig vermeiden kann. In den vorliegenden, untersuchten Konstellation ist selbst unmittelbar vor der Kollision noch mit einer Reaktion des wartepflichtigen Verkehrsteilnehmers zu rechnen, so dass, unter dem Aspekt, ein Szenario durch den automatisierten Eingriff nicht noch zu verschlimmern, nur ein die Kollision räumlich vermeidendes Notbremsmanöver oder aber zeitlich vermeidendes bzw. die Folgen linderndes Manöver in Bewegungsrichtung des Hindernisses in Frage kommen.

Zusätzlich werden die mit einer solchen Funktionalität einhergehenden Anforderungen an die maschinelle Umfelderfassung hergeleitet und anhand des Stands der Technik und Forschung bewertet. Für den Großteil der möglichen Konstellationen erscheint die Bereitstellung des notwendigen Informationsbedarfs mittels einer Fusion von fahrzeugautarken Sensorkonzepten und Fahrzeugkommunikation möglich. Ein Eingriff auf ein noch verdecktes Hindernis, wie für manche Szenarien zur Kollisionsvermeidung notwendig und auch unter den hergeleiteten Randbedingungen zulässig, scheint auf Basis des Stands der Forschung jedoch nicht darstellbar, so dass auch diese Konstellationen erst bei Sichtkontakt zwischen den beiden Objekten adressiert werden können.

Zur Bewertung des Potentials eines Schutzkonzepts für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer werden zwei Funktionsalgorithmen vorgestellt. Hierbei handelt es sich um ein kollisionsvermeidendes Ausweichmanöver, mit dem Ziel, vor dem kreuzenden Hindernis zu passieren, sowie ein kollisionsfolgenlinderndes Manöver, welches unter der Randbedingung, den Kollisionspunkt vor die Fahrgastzelle der Beteiligten zu verlagern, die Kollisionsgeschwindigkeit des Egofahrzeugs minimiert. Für beide Konzepte wird die notwendige Funktionsgüte und Robustheit gegenüber Unsicherheiten in der Schätzung des Kraftschlussbeiwertes, unter ansonsten idealisierten Randbedingungen, in der Simulation gezeigt.

Die abschließende Bewertung des Wirkpotentials beider Funktionalitäten erfolgt anhand der Nachsimulation von insgesamt rund 330 realer Kreuzungsunfälle in der Fahrdynamiksimulationssoftware IPG CarMaker. Hierbei kann gezeigt werden, dass der gewählte Ansatz gegenüber einer ausschließlichen Notbremsung ein zusätzliches Potential besitzt. Insbesondere Kollisionen mit hoher Egogeschwindigkeit, die durch Notbremssysteme nur eingeschränkt adressiert werden, können teilweise ganz vermieden, und die Anzahl der Kollisionen auf Höhe der Fahrgastzelle eines der Beteiligten deutlich gesenkt werden.

In Summe lassen die Ergebnisse der Arbeit den Schluss zu, dass die vorgestellte Funktionalität zwar grundsätzlich realisierbar erscheint, doch sind die Ergebnisse in weiteren Untersuchungen, insbesondere unter Verwendung einer realistischeren Umfelderfassung sowie der Berücksichtigung des, bis dato vernachlässigten, potentiellen Gegenverkehrs, der das Wirkpotential der Schutzfunktionalität einschränken kann, zu bestätigen.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ausgangslage

Verkehrsunfälle waren 2013, mit 26.025 Toten innerhalb der Europäischen Union (EU)¹, nach wie vor einer der häufigsten Ursachen für Tote und Schwerverletzte im Alltag. Bei Kindern und jungen Erwachsenen ist es sogar die Hauptursache.² Da im Bereich der passiven Sicherheit nur noch geringes Steigerungspotential erwartet wird³, verlangen sowohl die Vorgabe der Europäischen Kommission, die Anzahl der Opfer durch Verkehrsunfälle innerhalb der EU bis 2020 um die Hälfte zu reduzieren⁴, als auch die "Vision Zero" ⁵, nach immer neuen Systemen und komplexeren Funktionalitäten im Bereich der aktiven Sicherheit, die breitere Aspekte des Unfallgeschehens als bisher adressieren,.

So zählen im Längsverkehr Notbremsassistenten (NBA), mit dem Ziel einer Unfallfolgenlinderung durch Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit, mittlerweile in weiten Teilen des Pkw-Marktsegmentes zum Stand der Technik⁶, aber auch Systeme, die im Stadtverkehr, bei geringer Geschwindigkeit, Kollisionen ganz vermeiden können, haben den Einzug in Serienprodukte geschafft⁷. In Forschung und Entwicklung wird zudem mit Notausweichassistenten bereits am nächsten Schritt gearbeitet. Deren Fokus liegt aktuell noch auf Längsverkehrsszenarien und hier aufgrund rechtlicher Rahmenbedingungen und der aktuellen Leistungsfähigkeit der maschinellen Umfelderfassung primär auf Systemen, die innerhalb des eigenen Fahrstreifens bzw. bei Autobahnen oder Autobahn ähnlichen Straßen auf dem eigenen sowie den benachbarten Richtungsfahrstreifen operieren⁸. Einen zweiten Schwerpunkt stellen Ansätze zur Prävention von Kollisionen

¹ Jost und Allsop (2014): Ranking EU Progress on Road Safety, S.7

² World Health Organisation (2009): European status report on road safety, S.1

³ Fleck (2003): Methodische Entwicklung mechatronischer Lenksysteme, S.2

⁴ Europäische Kommission (2011): WHITE PAPER, S.21f

⁵ Europäische Kommission (2007): Leitlinien Bereich der Straßenverkehrssicherheit 2011-2020, S.4

⁶ ADAC (2012): Comparative test of advanced emergency braking systems

⁷ Vgl. z.B. Distner et al. (2009): City Safety - A System adressing Rear-End Collisions at Low Speeds

⁸ Vgl. z.B. Ameling (2002): Steigerung aktive Sicherheit durch Kollisionsvermeidungssystem; Mildner (2004): Erkennung und Vermeidung von Unfällen für Kraftfahrzeuge oder Weber (2012): Untersuchung Potenzial Brems-Ausweich-Assistenz

mit plötzlich auf die Straße tretenden Fußgängern⁹ dar. Da diese in vielen Fällen bereits durch einen geringen Querversatz im Bereich weniger Dezimeter verhindert werden können, kommt eine solche Funktionalität in entsprechender Ausgestaltung ebenfalls ohne ein Verlassen des eigenen Fahrstreifens aus.

Aber auch Schutzfunktionen über diesen Funktionsumfang hinaus, wie zum Beispiel Ausweichassistenten im Längsverkehr, die Bereiche außerhalb des eigenen Fahrstreifens nutzen¹⁰, befinden sich in der Entwicklung, so dass dieser Unfalltyp zumindest seitens der Forschung bereits weitreichend adressiert wird.

Neben den bisher fokussierten Unfällen im Längsverkehr sowie Fahrunfällen sind Kollisionen an Knotenpunkten, differenziert nach Abbiege- sowie Einbiegen-/Kreuzen-Unfälle, der häufigste Unfalltyp auf deutschen Straßen. So ereigneten sich im Kalenderjahr 2012 in Deutschland etwa 36 % aller Unfälle mit Personenschaden an Kreuzungen (vgl. Abbildung 1-1).

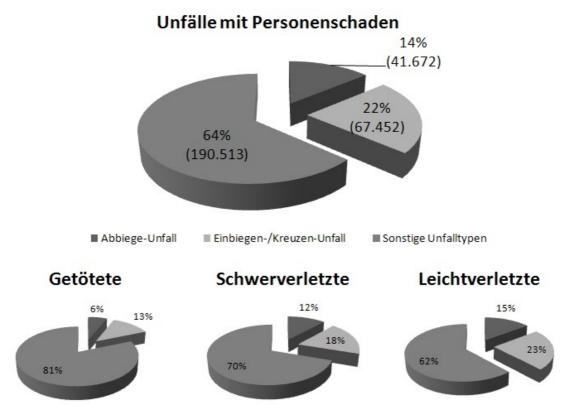


Abbildung 1-1: Absolute und relative Häufigkeit von Unfällen mit Personenschaden in Kreuzungsszenarien sowie deren relative Relevanz bezüglich der Unfallfolgen¹¹

⁹ Vgl. z.B. Dang et al. (2012): Steering an Evasion Assist und Werling et al. (2012): Kombinierte Brems-Ausweich-Assistenz

Galbas et al. (2008): Ausweichfunktion zur Vermeidung von Kollisionen und Giebel et al. (2009): Längs- und Querführung eines Kraftfahrzeugs

¹¹ Statistisches Bundesamt (2013): Verkehr - Verkehrsunfälle, S.284 ff.

Unabhängig vom Unfalltyp ist dabei in rund 71 % eine Vorfahrtsmissachtung, gekennzeichnet durch eine "Vorfahrt gewähren!" Situation, und in immerhin 13 % ein Rotlichtverstoß Ursache für die Kollision.¹²

Im Vergleich zu Längsverkehrskollisionen zeichnen sich Kreuzungskollisionen statistisch betrachtet zwar durch geringere Kollisionsgeschwindigkeiten aus, die Geschwindigkeitsverteilung der Kollisionen liegen für den Verursacher vornehmlich im Bereich von 10-40 km/h und für den Nichtverursacher zwischen 40-60 km/h¹³, da sie mit einem Anteil von 87,3 %¹⁴ hauptsächlich innerorts stattfinden. Sie führen jedoch konstellationsbedingt sehr häufig zu Seitenkollisionen, die, insbesondere wenn die Fahrgastzelle eines der beiden Fahrzeuge von der Kollision betroffen ist, dennoch schwere Unfallfolgen nach sich ziehen können, wie ebenfalls Abbildung 1-1 zu entnehmen ist.

Hauptursachen von Kreuzungsunfällen sind Fehleinschätzungen über die Geschwindigkeit und den Abstand des kreuzenden Verkehrs sowie dessen Nichtwahrnehmens infolge Unachtsamkeit oder aufgrund von Sichtverdeckungen¹⁵, so dass hier eine gezielte Unterstützung des Fahrers ein großes Potential zur Steigerung der Verkehrssicherheit verspricht.

Auch wenn Kreuzungsassistenzsysteme bisher noch nicht den Einzug in Serienfahrzeuge gehalten haben, so ist dieser Themenkomplex dennoch ein Schwerpunkt im Bereich der Forschung. ¹⁶ Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über den Stand von Technik und Forschung im Bereich der Kreuzungsassistenz und leitet darauf aufbauend den Forschungsbedarf sowie die Zielsetzung dieser Arbeit ab.

1.2 Stand der Technik und Forschung Kreuzungsassistenz

Die bekannten Systeme der Kreuzungsassistenz lassen sich in einem ersten Schritt nach dem gewählten Assistenzansatz, d.h. nach der Funktionsverteilung und der Informationsbereitstellung, dem Assistenzziel, d.h. der adressierten Szenarien, sowie der Art der Assistenz kategorisieren.

¹² Auswertung der GIDAS (German In-Depth Accident Study) Datenbank (2012)

¹³ Vgl. Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH (2013): Data Analysis of real Accidents

 $^{^{14}}$ Vgl. Mages (2009): Top-Down-Funktionsentwicklung Einbiege- und Kreuzenassistenten, S.17 $\,$

¹⁵ Vgl. Hoppe et al. (2007): Beurteilung Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von Kreuzungsunfällen, oder Pierowicz et al. (2000): Intersection Collision Avoidance, S.22

¹⁶ Vgl. Kapitel 1.2 Stand der Technik und Forschung Kreuzungsassistenz

1.2.1 Ansätze

Hinsichtlich des Assistenzansatzes gilt es nach infrastrukturbasierten und fahrzeugbasierten Ansätzen zu differenzieren. Ausschließlich infrastrukturbasierte Ansätze, wie beispielsweise die unter anderem aus dem amerikanischen und asiatischen Raum bekannte Anzeige der Restdauer einer Phase einer Lichtzeichenanlage (LZA)¹⁷ oder auch dynamische Geschwindigkeitsempfehlungen¹⁸, erfordern die Ausrüstung der Kreuzung mit entsprechender Hardware und sind daher besonders für Unfallschwerpunkte geeignet. Der Funktionsumfang dieser Ansätze beschränkt sich jedoch auf die optische Information bzw. Warnung der Verkehrsteilnehmer, so dass speziell der Aspekt der Unaufmerksamkeit nicht gezielt adressiert werden kann. Vorteilhaft bei dieser Ausprägung ist allerdings, dass die Funktionalität nach der Installation der Hardware allen Verkehrsteilnehmern uneingeschränkt zur Verfügung steht.

Den für die vorliegende Arbeit weitaus relevanteren Teil stellen die fahrzeugbasierten Ansätze dar, die sich wiederum in fahrzeugautarke, kommunikationsbasierte und kooperative Ansätze unterscheiden lassen.

Ein fahrzeugautarker Assistenzansatz zeichnet sich dadurch aus, dass sämtliche Hardware im Fahrzeug untergebracht ist, und die Funktionalität somit unabhängig vom sonstigen Umfeld ist. Die Qualität der Informationsbereitstellung hängt in diesem Fall jedoch stark von den räumlichen Gegebenheiten ab, insbesondere der direkte Sichtkontakt zu den relevanten Objekten ist von essentieller Bedeutung. Ein Szenario kann hier immer dann adressiert werden, wenn das entsprechende Fahrzeug ausgerüstet ist, wodurch die adressierbare Gesamtanzahl folglich proportional zur Ausstattungsrate ist.

Rein kommunikationsbasierte Ansätze wiederum ermöglichen eine Informationsbereitstellung, je nach Ausführung, auch unabhängig vom Sichtkontakt. Die Güte der Daten hängt dabei direkt von der Qualität der Eigenlokalisierung der beteiligten Fahrzeuge ab, da die übertragenen Daten ohne eine Relativpositionierung zwischen den beteiligten Fahrzeugen nur eingeschränkt in Bezug zueinander gebracht werden können. Da eine Kommunikation nur möglich ist, wenn beide sich einer Kreuzung nähernde Verkehrsteilnehmer entsprechend ausgerüstet sind, folgt der Anteil der adressierbaren Unfälle lediglich proportional zum Quadrat der Ausstattungsrate. Insbesondere bei geringen Ausstattungsraten ist die Verfügbarkeit einer passenden Assistenzkonstellation somit sehr gering.

Bei der dritten Gruppe der sogenannten kooperativen Ansätze handelt es sich um eine Kombination aus den beiden zuvor genannten, die die Vorteile beider miteinander verbindet und zusätzlich auch infrastrukturbasierte Informationen nutzt, sofern diese vorliegen.

-

¹⁷ Ibrahim et al. (2008): Digital Count-Down Display on Signalized Junction, S.479-482

¹⁸ Teply und Schnableger (1990): Variable speed advisory signals, S.90-94

1.2.2 Assistenzziel

In Bezug auf den adressierten Unfalltyp werden Kreuzungsassistenzsysteme nach Abbiege- und Einbiegen-/Kreuzen-Assistenz untergliedert¹⁹. Gemäß dem Institut für Straßenverkehr²⁰ beschreibt ein Abbiege-Unfall eine Kollision zwischen einem abbiegenden und einem sich aus gleicher oder entgegengesetzter Richtung nähernden Verkehrsteilnehmer, während es sich bei einem Einbiegen-/Kreuzen-Unfall um einen Unfall handelt, der durch einen Konflikt zwischen einem einbiegenden oder kreuzenden Wartepflichtigen und einem vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer ausgelöst wird.

1.2.2.1 Einbiegen-/Kreuzen-Assistenz

Im Bereich der Einbiegen-/Kreuzen-Assistenz steht der aktuelle Forschungs- und Entwicklungsfokus auf der Einhaltung der Vorfahrtsregelung durch den wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer. Der vermeintlich einfachste Fall stellen dabei die durch STOP-Schilder²¹ oder Lichtzeichenanlagen²² (LZA) geregelten Kreuzungen dar, da diese ohne eine Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer auskommen.

Die nicht notwendige Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer bei der STOP-Schild-Assistenz folgt dabei aus dem unabhängig vom Verkehrsgeschehen Bestand habenden Haltegebot gemäß Straßenverkehrsordnung (StVO)²³. Voraussetzung für eine mögliche Intervention ist einerseits die Detektion des STOP-Schildes, bspw. kamerabasiert²⁴, und andererseits die Erfassung der jeweiligen Fahrerabsicht. Eine Intervention hat nur dann zu erfolgen, wenn sichergestellt werden kann, dass der Fahrer nicht die Absicht hat, am Verkehrszeichen bzw. der zugehörigen Haltlinie anzuhalten. Hierbei gilt es unter dem Aspekt der Akzeptanz aber auch das reale Fahrverhalten mit zu berücksichtigen, da situationsabhängig, auch wenn vorgeschrieben, nicht immer bis in den Stillstand verzögert wird. Eine zu frühe bzw. unnötige wie auch immer geartete Intervention, eine so genannte Falsch-Positiv-Reaktion, gilt es aus Akzeptanzgesichtspunkten so weit wie möglich zu vermeiden.

Ganz ähnlich sieht die oft als solche bezeichnete "Ampelassistenz" aus. Zusätzlich zur STOP-Schild-Assistenz ist hier allerdings noch die Berücksichtigung von Phasenwech-

¹⁹ Einen Überblick zu bestehenden Ansätzen gibt Mages et al. (2012): Kreuzungsassistenz, S.572 ff.

²⁰ Vgl. Institut für Straßenverkehr - Verband der Schadenversicherer (GDV) (1998): Unfalltypen-Katalog, S.10 ff.

²¹ Meitinger (2009): Top-Down-Entwicklung Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen, S.37 ff.

²² Kosch und Ehmanns (2006): Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen, S.2 ff.

²³ Vgl. §41 StVO (1) "Wer am Verkehr teilnimmt, hat die durch Vorschriftzeichen nach Anlage 2 angeordneten Ge- oder Verbote zu befolgen."

²⁴ Priese et al. (1997): Verkehrszeichenerkennung mittels Echtzeit-Farbbildanalyse, S.599 ff.

seln der LZA notwendig, denn während an einem Stoppschild unabhängig von der Verkehrslage immer gehalten werden muss, gilt dies für eine LZA nur bei Rot-Phase zum Zeitpunkt des Erreichens der Markierungslinie. Eine Erfassung der Phase kann beispielsweise kamerabasiert²⁵ oder auch infrastrukturbasiert²⁶ auf Basis von Kommunikation erfolgen. Bei der Bewertung einer vorliegenden Situation gilt es aber zusätzlich noch zu berücksichtigen, dass zwischen dem Zeitpunkt der Detektion einer Phase und dem Erreichen der Haltelinie die Phase wechseln kann.

Komplexer stellt sich die Situation bei Vorfahrtachten- bzw. Rechts-vor-links- Kreuzungen dar. An diesen Kreuzungen ist ein Anhalten des wartepflichtigen Verkehrsteilnehmers nur in Situationen mit tatsächlich vorhandenem kreuzendem Verkehrsteilnehmer notwendig. Im Vergleich zu den vorherigen Assistenzsystemen setzt dies eine zuverlässige rechtzeitige Detektion möglicherweise existenter vorfahrtberechtigter Verkehrsteilnehmer voraus. Darüber hinaus ist auch hier die Erfassung der Fahrerintention – hat dieser das Hindernis erkannt und beabsichtigt darauf gemäß der StVO zu reagieren – zur Ableitung möglicher Maßnahmen von essentieller Bedeutung.

1.2.2.2 Abbiege-Assistenz

Die zweite Gruppe der Unfalltypen - der Abbiege-Unfall - kann in unterschiedlichsten Konstellationen auftreten. Der primär durch Assistenzansätze adressierte Fall stellt jedoch das Linksabbiegen eines Fahrzeugs bei Gegenverkehr dar. Der sogenannte Linksabbiegeassistent²⁷ weist im Vergleich zu den vorhergenannten einige besondere Herausforderungen auf. So existiert, sofern kein separater Linksabbiegefahrstreifen vorhanden ist, beispielsweise kein eindeutig definierter Abbiege-Punkt und damit zusammenhängend folglich eine große Anzahl an möglichen Abbiege-Trajektorien²⁸. Dies erschwert zusätzlich die Prädiktion einer kritischen Situation, wodurch der Analyse des Fahrerverhaltens, insbesondere der Erfassung des Abbiegewunsches, eine besonders große Bedeutung bei der Einleitung eines Systemeingriffs zukommt.

1.2.3 Assistenzstrategie

Je nach verfügbarem Zeitbudget, d.h. der verbleibenden Restzeit, innerhalb der eine Intervention spätestens erfolgt sein muss, stehen zur Vermeidung bzw. zur Linderung der Folgen einer Kollision mit der Warnung welche bspw. optisch, akustisch und/oder haptisch erfolgen kann, einem Teil- oder auch Vollbremseingriff unterschiedliche Maß-

²⁵ Chiang et al. (2011): Detecting and Recognizing Traffic Lights, S. 6919 ff.

²⁶ Wertheimer und Klanner (2011): Cooperative Perception Driver Assistance, S.1 f

²⁷ BMW Group PressClub 16.05.2011

²⁸ Meitinger et al. (2006): Linksabbiegeassistenz, S.6 f

nahmen zur Adressierung einer kritischen Situation zur Verfügung. Hierbei ist zwischen ausschließlich warnenden, kollisionsvermeidenden und kollisionsfolgen-lindernden Systemen zu unterscheiden.

Warnende Systeme

Ziel der Fahrerwarnung, einschließlich des Bremsrucks, häufig als "haptische Warnung" bezeichnet, ist die Aktivierung des Fahrers in einer kritischen Situation, so dass dieser die Kollision noch "eigenständig" vermeiden kann.

Mages²⁹ stellt hierzu beispielsweise einen Assistenzansatz vor, der abhängig von der verfügbaren Zeitreserve für einen kollisionsvermeidenden Eingriff durch den Fahrer des Egofahrzeugs zwischen einer Vorwarnung (visueller Hinweis) und einer Akutwarnung (visueller Hinweis, akustische Warnung und Teilverzögerung) unterscheidet. Die Akutwarnung wird dabei insbesondere bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten oder abgebrochenen Anhaltevorgängen notwendig, da in diesen Fällen eine Gefahrensituation erst sehr spät erkannt werden kann und somit eine alleinige Warnung bei zu erwartenden Reaktionszeiten häufig nicht ausreicht, um die Kollision noch rechtzeitig vermeiden zu können.

An Kreuzungen gilt es zwischen der zeitlichen und räumlichen Kollisionsvermeidung zu differenzieren. Unter zeitlicher Vermeidung ist zu verstehen, dass das Annäherungsverhalten des Egofahrzeugs bspw. durch bremsen oder ausweichen derart beeinflusst wird, dass dieses die Kreuzung entweder erst erreicht, nachdem das potentielle Hindernisobjekt die Kreuzung bereits wieder verlassen hat, oder aber selbst die Kreuzung schon passiert hat, bevor das Hindernisobjekt diese erreicht, während bei einer räumlichen Vermeidung das Egofahrzeug vor Erreichen des Kreuzungsbereichs in den Stillstand gebracht wird.

Aufgrund der Komplexität einer zeitlichen Kollisionsvermeidung an Kreuzungen, in Bezug auf die Umgebungserkennung und Situationsbewertung, werden bei Mages sämtliche Eingriffe deaktiviert, sobald eine räumliche Kollisionsvermeidung nicht mehr möglich ist.

Kollisionsvermeidende Systeme

Reagiert der Fahrer weder auf die Warnung noch auf einen Teileingriff, so verbleibt zur Vermeidung einer Kollision nur noch der Volleingriff. Eine solche Assistenzstrategie wird beispielsweise von Klanner³⁰ vorgeschlagen. Reagiert der Fahrer weder auf die Information noch die um eine Teilverzögerung ergänzte Warnung, so wird im vorgeschlagenen Ansatz eine jederzeit vom Fahrer übersteuerbare Vollverzögerung so getriggert, dass die Kollision gerade noch räumlich, d.h. das Egofahrzeug kommt vor dem Erreichen eines potentiellen Kollisionsbereichs zum Stillstand, vermieden wird.

³⁰ Klanner (2008): Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten, S.79 ff.

7

²⁹ Mages (2009): Top-Down-Funktionsentwicklung Einbiege- und Kreuzenassistenten, S.106 ff.

Ein alternativer Ansatz, der auf eine zeitliche Vermeidung der Kollision, durch Passieren hinter dem kreuzenden Verkehrsteilnehmer abzielt, wird beispielsweise von Brännström et al. ³¹ thematisiert. Sobald in einer kritischen Situation kein Fahrereingriff mehr zu erwarten ist, wird in diesem Ansatz der entsprechende Notbremseingriff getriggert. Die Entscheidung hierüber fällt auf Grundlage der zur Vermeidung der Kollision durch Bremsen oder Ausweichen notwendigen Fahrdynamik im Vergleich zu jeweils definierten Grenzwerten.

Kollisionsfolgenlindernde Systeme

Ist eine Kollision aufgrund einer zu späten Detektion der kritischen Situation nicht mehr vermeidbar, oder soll diese, um beim Fahrer keine Risikoadaption in Form einer Anpassung seines Fahrverhaltens anzutrainieren³², grundsätzlich nicht vermieden werden, verbleibt als letzte Maßnahme noch ein die Kollisionsfolgen lindernder Eingriff. Ein exemplarischer Ansatz wird von Heck et al.³³ vorgestellt, der ausgehend von einem definierten Eingriffszeitpunkt bei einer (Time-to-Collision) t_{tc} =0,6 s, beschrieben als Quotient aus Abstand zum potentiellen Kollisionspunkt d_{coll} und Fahrzeuggeschwindigkeit v_{ego} , ein kollisionsfolgenlinderndes Bremsmanöver initiiert. Abhängig von der jeweiligen Ausgangskonstellation wird dieser Eingriff, falls notwendig, so dosiert, dass der Kollisionspunkt auf einen Bereich vor oder hinter der Fahrgastzelle verlagert wird, um auf diese Weise die Folgen einer Kollision möglichst effektiv zu lindern.

Haltefunktion

Einen Sonderfall stellt die sogenannte Haltefunktion dar. Hierunter ist eine Funktionalität zu verstehen, die das Anfahren des Egofahrzeugs aus dem Stillstand in kritischen Situationen verhindert, da in diesen Fällen ein Einfahren in die Kreuzung weder durch eine Warnung noch durch einen Bremseingriff vermieden werden kann.³⁴

³¹ Brännström et al. (2011): Intersection Collision Avoidance System, S.9794 ff.; Brännström et al. (2010): Threat Assessment for Avoiding Vehicle Collisions, S.664

³² Vgl. z.B. Pfafferott und Huguenin R. D. (1991): Adaptation nach Einführung von Sicherheitsmassnahmen, S.77

³³ Heck et al. (2013): Collision Mitigation for Crossing Traffic, S.562 ff. und Heck et al. (2012): Situatives adaptiertes Entscheidungsverfahren, S.2 ff.

³⁴ Mages (2009): Top-Down-Funktionsentwicklung Einbiege- und Kreuzenassistenten, S.112

1.3 Zwischenfazit und Ableitung des Forschungsbedarfs

1.3.1 Bewertung Stand der Technik

Der Fokus bekannter Kreuzungsassistenzsysteme liegt primär auf der Adressierung des wartepflichtigen Verkehrsteilnehmers, mit dem Ziel, diesen in kritischen Situationen vor dem Einfahren in die Kreuzung durch eine Warnung und/oder einen der unterschiedlichen vorgestellten Systemeingriffe zu bewahren.

Bei Annahme einer Ausstattungsrate des Fahrzeugbestands von 100 %, sowie einer zuverlässigen rechtzeitigen Erfassung kritischer Situationen, wären diese Ansätze hinreichend, um zumindest alle adressierbaren Unfälle zwischen motorisierten Fahrzeugen an Kreuzungen zu vermeiden oder in ihren Folgen signifikant zu lindern. Betrachtet man sich jedoch die Marktentwicklung vergleichbarer aktiver Systeme, so zeigt selbst eine sehr optimistische Abschätzung der zukünftigen Entwicklung, wie jene des ESC (Electronic Stability Control)³⁵, dass nach einer potentiellen Markteinführung zumindest mittelfristig nicht von einem solchen Szenario ausgegangen werden kann. Bei einer gegebenen Ausstattungsrate solcher Assistenzfunktionen hängt der Anteil tatsächlich adressierbarer Szenarien darüber hinaus zusätzlich noch von der Art der Informationsbereitstellung ab. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, entspricht dies bei fahrzeugautarken Assistenzsystemen der Ausstattungsrate, während er bei rein kommunikationsbasierten Systemen statistisch betrachtet dem Quadrat der Ausstattungsrate entspricht, da hier immer beide beteiligten Verkehrsteilnehmer die entsprechende Hardware aufweisen müssen.

Beide Aspekte berücksichtigend bietet es sich geradezu an, in Situationen, in denen eine Vorfahrtmissachtung droht, auch den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer durch Assistenzansätze direkt zu unterstützen. Neben der damit verbundenen grundsätzlichen Steigerung der Anzahl der tatsächlich adressierten Unfälle führt eine solche Funktionalitätserweiterung auch dazu, dass das, sich bewusst für ein solches System entscheidende, Individuum unabhängiger vom Kaufverhalten der anderen und damit der Ausstattungsrate von Assistenzsystemen in der Fahrzeugflotte wird. Je nach Art der Informationsbereitstellung würde dieser Verkehrsteilnehmer jetzt unabhängig von der Art seiner Beteiligung, sei es als wartepflichtiger oder als vorfahrtberechtigter Teilnehmer, in allen grundsätzlich adressierbaren Fällen eine Unterstützung erfahren, ohne darauf angewiesen zu sein, dass das vorfahrtmissachtende Fahrzeug entsprechend ausgerüstet ist. Wie eine solche Assistenz im Detail aussehen könnte, ist bisher allerdings noch offen.

9

³⁵ Ausstattungsrate 2012: 17 Jahre nach Markteinführung sind 86% der Neuwagen und 62 % des Fahrzeugbestands mit ESC ausgestattet: Vgl. DAT Deutsche Automobil Treuhand GmbH (2013): DAT Report 2013

Grundsätzlich bestehen unterschiedliche Alternativen, den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer in einem kritischen Kreuzungsszenario zu adressieren. Eine mögliche Alternative stellt die Übertragung des, in weiten Bereichen erforschten, Notbremsmanövers auf diese Szenarien dar. Darüber hinaus ist aber auch denkbar, einem kreuzenden Objekt auszuweichen, oder die Kollisionsfolgen durch ein gezieltes Brems-bzw. ein kombiniertes Ausweich/Brems-Manöver zu lindern.

Im Bereich der Forschung werden mittlerweile zwar auch Funktionalitäten für diese Zielgruppe untersucht, doch fokussieren diese bisher auf primär fahrdynamische Gesichtspunkte, wie der Frage, wann eine Kollision durch den Fahrer nicht mehr zu vermeiden ist. Eine umfassende Diskussion rechtlicher Aspekte und insbesondere Fragen nach der Akzeptanz in Bezug auf den Eingriffszeitpunkt aus Sicht des vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmers stehen hier noch aus.

Kollisionsfolgenlindernde Ansätze basieren in der Regel auf einer Minimierung der Kollisionsgeschwindigkeit. Ein Beispiel für die Berücksichtigung der Kollisionskonstellation bei der Manöverauslegung liefern Heck et al. 36 . Da dieser Ansatz jedoch unabhängig vom jeweiligen Szenario bei einer t_{tc} von 0,6 s eingreift, ist davon auszugehen, dass hier je nach Einzelfall nicht das volle Linderungspotential ausgeschöpft werden kann.

Kollisionsvermeidende Ansätze setzen sowohl auf eine räumliche als auch eine zeitliche Kollisionsvermeidung. Berücksichtigt werden hierbei aber kaum die möglichen Folgen einer nicht auszuschließenden doch noch stattfindenden Reaktion des Hindernisobjektes während der Annäherung. Darüber hinaus beschränken sich diese Ansätze bisher auf Notbremsmanöver. Ausweichmanöver finden lediglich zur Bestimmung des Eingriffszeitpunktes Berücksichtigung³⁷, werden dabei aber nicht so detailliert betrachtet, als dass sich daraus die Regelungsvorgaben an ein die Kollision vermeidendes Ausweichmanöver ableiten ließen.

.

³⁶ Heck et al. (2013): Collision Mitigation for Crossing Traffic, S.562 ff.

³⁷ Vgl. z.B. Kaempchen et al. (2009): Situation Assessment of an Autonomous Emergency Brake, S.680f oder Hillenbrand et al. (2006): Multilevel Collision Mitigation Approach, S.531f

1.3.2 Forschungsziele und -methodik

Aus der Zielsetzung, den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer in Kreuzungsszenarien vor einem Fehlverhalten des wartepflichtigen Teilnehmers durch eine der erwähnten Maßnahmen zu schützen, leiten sich direkt die folgenden Fragen und damit der Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit ab:

Wie kann ein Kreuzungsassistent für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer, unter Berücksichtigung von rechtlichen Aspekten und insbesondere Gesichtspunkten der Nutzerakzeptanz, mit dem Ziel der Steigerung der Verkehrssicherheit, umgesetzt werden, und wie groß ist das damit theoretisch realisierbare Potential zur Steigerung der Verkehrssicherheit?

Aus dieser zentralen Fragestellung leiten sich das, auf einem Top-down-Ansatz basierende, methodische Vorgehen sowie die Untersuchungsgegenstände der vorliegenden Arbeit ab. Die Basis bildet dabei die Analyse des Kreuzungsszenarios an sich, sowie die daraus folgenden Anforderungen an ein solches Schutzkonzept. Aufbauend hierauf gilt es, die grundlegenden Fragen nach dem zulässigen bzw. empfehlenswerten Zeitpunkt des Systemeingriffs (Information, Warnung, Teil- und Volleingriff) einschließlich dessen Einflussfaktoren sowie nach der Wahl der geeigneten Maßnahme zu beantworten. Ähnlich den Längsverkehrsszenarien wird es auch in Kreuzungsszenarien nicht die eine dominante Strategie geben, die unter den gegebenen Randbedingungen das größte Potential zur Steigerung der Verkehrssicherheit bietet, so dass sich hier direkt die Frage nach den Kriterien zur Bestimmung des richtigen Manövers anschließt. Einen wesentlichen Faktor in diesem Zusammenhang stellt das potentielle, aber nicht bekannte Verhalten des Fahrers des Hindernisobjektes während der Annäherungsphase dar. Ausgangspunkt dieser Untersuchung ist ein Modellansatz, der die Besonderheiten des Kreuzungsszenarios berücksichtigt. Hierbei gilt es das Potential einer zeitlichen Kollisionsvermeidung, das sich aus den voneinander abweichenden Bewegungsrichtungen der beteiligten Objekte ergibt, zu berücksichtigen.

An diese mehr theoretischen Überlegungen schließt sich die Frage nach der Umsetzung eines solchen Schutzkonzeptes an, d.h. welche Anforderungen ergeben sich an die für ein aktives Assistenzsystem typischen Komponenten maschinelle Umfelderfassung, Umfeldinterpretation, Situationsanalyse, Eingriffsentscheidung und Trajektorienregelung. Im Fokus der Arbeit stehen dabei die Aspekte Situationsanalyse und Eingriffsentscheidung. Bei der Umsetzung der Funktionalität im Rahmen der Algorithmen für Trajektorienprädiktion und –regelung handelt es sich um eine aus den Anforderungen resultierende Stellvertreterlösung mit dem Ziel, die grundsätzliche Realisierbarkeit der Funktionalität zu zeigen.

Der letzte Fragenkomplex betrifft die Verifikation der vorgestellten Schutzfunktionalität in Bezug auf Güte, Robustheit als auch die Beurteilung deren Wirksamkeit. Hierbei stehen Fragen nach den je nach Maßnahme theoretisch adressierbaren Szena-

rien/Konstellationen als auch die Abschätzung des damit verbundenen Potentials zur Steigerung der Verkehrssicherheit anhand der Simulation statistisch relevanter realer rekonstruierter Unfallszenarien in der Fahrdynamiksimulationssoftware IPG CarMaker³⁸ im Vordergrund.

Die methodische Vorgehensweise, an der sich auch der Aufbau der Arbeit anlehnt, ist Abbildung 1-2 zu entnehmen.

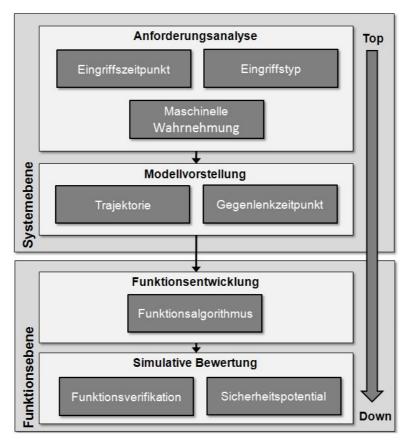


Abbildung 1-2 Methodik und Aufbau der Arbeit

Die Konkretisierung der einzelnen Untersuchungsgegenstände einschließlich der Formulierung der wissenschaftlichen Hypothesen erfolgt in den jeweiligen Kapiteln der vorliegenden Arbeit.

_

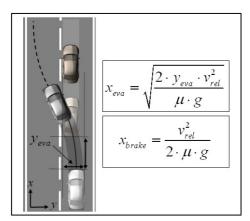
³⁸ Vgl. www.ipg.de

2 Randbedingungen für ein Schutzkonzept

Die Ausgestaltung eines Schutzkonzepts für den an einer Kreuzung bevorrechtigten Verkehrsteilnehmer weist aufgrund der räumlichen und verkehrlichen Gegebenheiten eines Knotenpunktes, aber auch infolge der Rollenverteilung der beteiligten Verkehrsteilnehmer einige Besonderheiten gegenüber dem Stand der Technik der Notausweichbzw. Kreuzungsassistenz auf, die es im Folgenden näher zu betrachten gilt.

2.1 Analyse Kreuzungsszenario

Vergleicht man den für Ausweichmanöver bisher primär im Fokus stehenden Längsverkehr mit den hier adressierten Kreuzungsszenarien, so zeigen sich einige Besonderheiten, die primär auf der abweichenden Bewegungsrichtung des Hindernisobjektes relativ zum Egofahrzeug beruhen. Im Längsverkehr kann aufgrund der als parallel anzunehmenden Bewegung beider Beteiligter, hierbei spielt es keine Rolle, ob diese sich in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung bewegen, von einem nahezu konstanten Versatz zwischen den beteiligten Fahrzeugen y_{eva} , den es durch das Ausweichmanöver zur Vermeidung der Kollision zu überwinden gilt, ausgegangen werden. In Abbildung 2-1 (links) wird auf Basis dieser Größe, in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit v_{rel} , zwischen den beiden Objekten, sowie der vorliegenden Straßenverhältnisse, beschrieben durch den Kraftschlussbeiwert-Reifen-Fahrbahn μ , der Abstand, zu dem ein Bremsoder Ausweichmanöver, unter Vernachlässigung kombinierter Manöver³⁹, spätestens initiiert werden muss, hergeleitet.



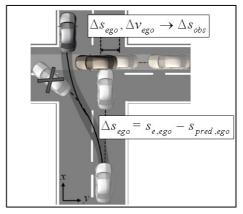


Abbildung 2-1 Schematische Darstellung eines Längsverkehrs- und eines Kreuzungsszenarios

-

³⁹ Die Maximierung des streckenbezogene Querversatzes $y_{eva}(x)$ wird durch ein Ausweichmanöver mit zusätzlicher Verzögerungskomponente erreicht – vgl. Schmidt et al. (2005): Letztmögliches Ausweichmanöver für stehende und bewegte Hindernisse, S. 132f

Das zu absolvierende Manöver muss dabei lediglich die Realisierung des notwendigen streckenbezogenen Lateralersatzes $y_{eva}(x)$ sicherstellen. Wie die Trajektorie im Detail umgesetzt wird, d.h. insbesondere welche Längsverzögerungskomponente damit verbunden ist, ist für eine erfolgreiche Manöverdurchführung nebensächlich. Hier ist daher nicht zwingend die Umsetzung einer tatsächlichen Trajektorie erforderlich, sondern lediglich die Realisierung eines definierten Pfades. Je größer die mit dem Manöver verbundene Geschwindigkeitsreduktion, desto größer ist aber das Linderungspotential für den Fall, dass die Kollisionsvermeidung aufgrund unerwarteter Ereignisse⁴⁰ doch fehlschlagen sollte.

In einem Kreuzungsszenario besitzt jedes Hindernisobjekt zusätzlich eine, vom jeweiligen Kreuzungswinkel ϕ abhängige, Geschwindigkeitskomponente $v_{obs,\perp}$ senkrecht zur Bewegungsrichtung des Egofahrzeugs (vgl. Abbildung 2-2), die bei jeder Verhaltensveränderung des Egofahrzeugs eine Änderung der vorliegenden Situation⁴¹ nach sich zieht.

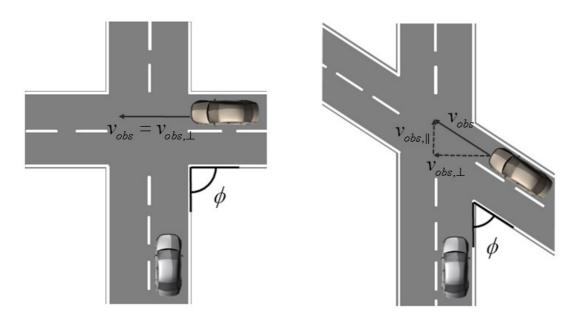


Abbildung 2-2 Beispiele für Kreuzungswinkel ϕ

Zum einen führt jede Geschwindigkeitsänderung des Egofahrzeugs, wie im Längsverkehrsszenario auch, zu einer zeitlichen Verschiebung der Kollision. Dieser zeitliche Effekt zieht bei unverändertem Pfad des Egofahrzeugs in einem Kreuzungsszenario, aufgrund der parallel stattfindenden Bewegung des Hindernsobjektes, aber auch eine

 $^{^{40}}$ z.B. unerwartetes Verhalten des vorausbefindlichen Fahrzeugs oder auch ein plötzlicher unerwarteter Abfall des Kraftschlussbeiwertes μ

^{41 &}quot;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." vgl. Geyer et al. (2013) Ontology for generating test and use-case catalogues

Änderung der Kollisionskonstellation und damit auch direkt des zur Vermeidung der Kollision notwendigen Lateralversatzes y_{eva} nach sich. Darüber hinaus übt auch die mit dem Ausweichpfad verbundene zusätzliche Wegstrecke Δs_{ego} , verglichen mit der Geradeausfahrt, einen Einfluss auf die vorliegende Situation aus, da diese selbst bei konstanter Geschwindigkeit wiederum eine zeitlichen Verschiebung der Kollision nach sich zieht. Folglich reicht in Kreuzungsszenarien der realisierbare Ausweichpfad zur vollständigen Analyse einer Situation nicht aus. Zusätzlich ist die Kenntnis des zu einer definierten erreichbaren Position gehörigen Zeitpunktes notwendig, da andernfalls der potentielle Ausweichpfad nicht mit der Bewegung des Hindernisobjektes in Bezug gesetzt werden kann, und somit keine sichere Planung eines die Kollision situationsunabhängig vermeidenden Manövers möglich ist.

Ein zweiter Einflussfaktor ergibt sich aus der Größenordnung des notwendigen Lateralversatzes y_{eva} . Um eine Bevormundung des Fahrers so weit wie möglich zu vermeiden, sollte ein Eingriff erst im letztmöglichen, die Kollision gerade noch vermeidenden, Zeitpunkt erfolgen. Ein solches "optimales" Ausweichmanöver, das den notwendigen Lateralversatz y_{eva} schnellstmöglich realisiert, impliziert ein Zurückführen des Fahrzeugs auf den ursprünglichen Fahrbahnverlauf erst bei bzw. nach Passieren des Hindernisobjektes. Aufgrund obiger Zusammenhänge, aber auch der ganz grundsätzlichen geometrischen Gegebenheiten, so ist bspw. ein Pkw als Hindernisobjekt schlicht und einfach deutlich länger als breit, kann der möglicherweise notwendige Ausweichversatz y_{eva} im Kreuzungsszenario, je nach Konstellation, deutlich größer sein als im Längsverkehr. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die verfügbare Straßenbreite für ein solch *optimales*, Ausweichmanöver nicht immer ausreicht, sondern räumlich betrachtet bereits früher gegengelenkt werden muss, da andernfalls die Straße verlassen werden würde.

Auf die ethische Diskussion, ob ein bewusstes Verlassen der Fahrbahn sowohl aus individueller als auch gesamtgesellschaftlicher Sichtweise ggf. eine zielführende Alternative im Vergleich zur prädizierten Kollision darstellen könnte, wird an dieser Stelle bewusst verzichtet. Aus diesem Grund gilt für alle weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit, dass ein Systemeingriff auschließlich unter der Randbedingung ausgeführt wird, dass dadurch keine Kollisionen mit Dritten, oder ein Verlassen der Fahrbahn hervorgerufen werden⁴².

Fasst 80 % aller Kollisionen finden an Kreuzungen mit jeweils einem Richtungsfahrstreifen und die verbleibenden 20 % der Kollisionen an Kreuzungen mit mindestens zwei Richtungsfahrstreifen für zumindest den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer statt. ⁴³ Bei einem Richtungsfahrstreifen und vorhandenem Gegenverkehr verbleibt

⁴² Ausgenommen hiervon ist das Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer – z.B. das Auffahren auf das Egofahrzeug durch Notbremsung aufgrund von zu geringem Abstand oder Unaufmerksamkeit des nachfolgenden Teilnehmers.

⁴³ Mages (2009): Top-Down-Funktionsentwicklung Einbiege- und Kreuzenassistenten, S.16f

somit lediglich der eigene Fahrstreifen als verfügbarer Ausweichraum. Bei zwei Fahrstreifen je Richtung, stehen je nach genutztem Fahrstreifen gegebenenfalls zusätzlich der Nachbarfahrstreifen zur Verfügung. Bei einem sich von rechts nähernden Hindernisobjekt können darüberhinaus zumindest theoretisch noch der bzw. die Gegenfahrstreifen als zusätzlicher Ausweichraum genutzt werden.

Je nach räumlicher Gegebenheit führt dies dazu, dass zumindest in einem Teil der möglichen Szenarien das Gegenlenken, zur Vermeidung des Verlassens der vorhandenen Fahrbahn und Zurückführung des Fahrzeug auf den eigenen Fahrstreifen, deutlich früher erfolgen muss als bei einem *optimalen* Ausweichmanöver. Folglich ist dieser Aspekt bereits bei der Situationsanalyse und hier insbesondere bei der Planung des möglicherweise notwendigen Ausweichmanövers und der darauf folgenden Manöverinitiierung zu berücksichtigen.

Zusammengefasst erfordert die Situationsanalyse eines vorliegenden Schutzkonzeptes, infolge der räumlichen Gegebenheiten und zur Beurteilung des Ausweichpotentials einen Modellansatz, der sowohl den zeitlichen Verlauf des realisierbaren Ausweichpfades beschreibt als auch den dabei von den räumlichen Gegebenheiten abhängigen letztmöglichen Gegenlenkzeitpunkt berücksichtigt.

2.2 Eingriffszeitpunkt

Ein wesentlicher Aspekt bei der Betrachtung automatisierter Noteingriffe ist die Frage nach dem zulässigen bzw. empfehlenswerten Eingriffszeitpunkt. Hierbei gilt es einerseits den rechtlichen Rahmen zu wahren und andererseits aber auch die potentielle Wirksamkeit gegenüber der Akzeptanz eines solchen Eingriffs abzuwägen. Je früher eine Warnung oder ein Eingriff erfolgt, desto größer ist tendenziell das zu erwartende Wirkpotential eines solchen Systems. Es steigt aber auch die Gefahr, dass ein Eingriff durch den Nutzer nicht akzeptiert, und die Funktionalität folglich gegebenenfalls abgeschaltet wird, so dass dann gar kein Nutzen generiert werden kann.

Abgeleitet aus dem Fokus der Arbeit, der Beurteilung der Realisierbarkeit einer Assistenzfunktion für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer, gilt es daher im ersten Schritt die grundsätzliche Fragestellung zu beantworten, ob sich unter den rechtlichen Rahmenbedingungen ein situationsunabhängiger eindeutiger Eingriffszeitpunkt bestimmen und in entsprechende Kriterien umsetzen lässt, der einerseits eine Akzeptanz seitens der Nutzer und andererseits aber auch ein Potential zur Steigerung der Verkehrssicherheit erwarten lässt. Dies führt zu folgender Untersuchungshypothese:

H 1. Für jede kritische Kreuzungssituation, beschreibbar durch das Annäherungsverhalten der beiden Beteiligten sowie der prädizierten Kollisionskonstellation, lässt sich ein eindeutiger, die rechtlichen Rahmenbedingungen und Akzeptanzgesichtspunkte berücksichtigender, Eingriffszeitpunkt bestimmen, der zeitlich vor der eigentlichen Kollision liegt.

2.2.1 Rechtlicher Rahmen und Umsetzung in der Praxis

Fahrerassistenzsysteme, insbesondere aktive Sicherheitssysteme, weisen einen Bezug zur Fahraufgabe auf, so dass sich daraus Anforderungen aus der Straßenverkehrsordnung (StVO) und dem sonstigen Straßenverkehrsrecht ergeben. Nach herrschender Meinung besitzt in diesem Zusammenhang das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr (WÜ)⁴⁴ entscheidenden Einfluss auf die Zulässigkeit von, mit diesen Systemen verbundenen, automatisierten Fahrfunktionen. Nach WÜ muss jedes in Bewegung befindliche Fahrzeug einen Führer haben⁴⁵, und dieser dauernd⁴⁶ und unter allen Umständen⁴⁷ sein Fahrzeug beherrschen können. Lediglich vereinzelt wird die Ansicht vertreten, dass die entsprechenden zugrundeliegenden Artikel keine zulassungsrechtlichen Fragestellungen betreffen und somit in diesem Zusammenhang nicht zum Tragen kommen⁴⁸.

Unter *beherrschen* wird in diesem Zusammenhang das eigenbestimmte Verfügen über eine Sache oder einen Geschehensablauf verstanden⁴⁹, was wiederum die jederzeitige Übersteuerbarkeit eines in die Fahrzeugbewegung eingreifenden Systems durch den Fahrer bedingt⁵⁰. Als zulässig werden aber auch solche aktive Systeme erachtet, die in Situationen eingreifen, die der Fahrer selbst nicht mehr zeitgerecht beherrschen kann, insofern der Eingriff dem Willen des Fahrers entspricht.⁵¹ Bei der Bewertung des Fahrerwillens wird vorausgesetzt, dass er nicht bewusst einen Unfall herbeiführen will, da

⁴⁴ Gelau et al. (2012): Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit, S.29ff.

⁴⁵ Artikel 8 I WÜ: "Jedes Fahrzeug und miteinander verbundene Fahrzeuge müssen, wenn sie in Bewegung sind, einen Führer haben."

⁴⁶ Artikel 8 V WÜ: "Jeder Führer muss dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder sein Tier führen können."

⁴⁷ Artikel 13 I WÜ: "Jeder Fahrzeugführer muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen. [...]"

⁴⁸ Bewersdorf (2003): Vereinbarkeit von nicht-übersteuerbaren Fahrerassistenzsystemen

⁴⁹ Albrecht (2005): Die rechtlichen Rahmenbedingungen Fahrerassistenzsystemen zur Geschwindigkeitsbeeinflussung, S. 186–198

⁵⁰ Gelau et al. (2012): Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit, S.29ff.

⁵¹ Seeck und Gasser (2006): Rechtliche Rahmenbedingungen Einführung moderne FAS, S.2

er andernfalls gegen die Grundsätze von § 1 StVO⁵² verstoßen würde. Als Beispiele für solche Systeme werden häufig das ESC oder auch Notbremssysteme herangezogen. Bei zweitem wird ein Eingriff beispielsweise dann als zulässig erachtet, wenn ein Ausweichen objektiv nicht mehr möglich ist, und somit kein Widerspruch zum potentiellen Fahrerwillen bestehen kann. Hierbei wird häufig von einem Eingriff zum letztmöglichen, die Kollision gerade noch vermeidenden, Zeitpunkt gesprochen, da die Situation andernfalls unweigerlich zu einer Kollision führen würde. Dieser Zeitpunkt lässt sich auf Basis verschiedener Zeit- oder Beschleunigungskriterien, aus Annahmen über die maximal realisierbaren Verzögerungen oder Querbeschleunigungen bei einer gegebenen Situation bestimmen, wobei in der Regel von einem konstanten Verhalten des vorausbefindlichen Hindernisobjektes ausgegangen wird⁵³. Eine den Verlauf des Szenarios im Längsverkehr signifikant beeinflussende Handlung des vorausbefindlichen Fahrzeugs kann nahezu ausgeschlossen werden. Denn entweder ist die kritische Situation infolge zu geringen Abstands zum vorausbefindlichen Fahrzeug aufgrund eines Bremsmanövers desselben überhaupt erst hervorgerufen worden, oder aber das Egofahrzeug nähert sich mit Geschwindigkeitsüberschuss dem vorausfahrenden Fahrzeug ohne eine rechtzeitige Reaktion durch Anpassung der Geschwindigkeit. In beiden Fällen besteht keinerlei Anlass, der eine plötzliche Verhaltensänderung des vorausfahrenden Fahrzeugs begründen könnte, sofern die Fahrsituation dies nicht grundsätzlich, beispielsweise aufgrund einer vorausbefindlichen Kurve oder einem Stauende, erfordert. Ein unnötiges, starkes Abbremsen würde darüber hinaus sogar §4 StVO⁵⁴ widersprechen, wonach eine starke Verzögerung ohne zwingenden Grund untersagt ist. Darüber hinaus ist selbst unter der Annahme, der Fahrer des vorausbefindlichen Fahrzeugs nähme die Annäherung wahr, ein Beschleunigen oder gar der Versuch eines Ausweichmanövers des vorausfahrenden Fahrzeugs als Maßnahme auf diese Situation als eher unwahrscheinlich zu beurteilen. Einerseits hängt es von der Verkehrssituation ab, ob dies überhaupt möglich wäre, andererseits kommt ein solches Verhalten auch keiner üblichen Schreckreaktion gleich oder stellt ein erlerntes Handlungsmuster dar. Letztendlich besitzt ein solches Manöver bei einem üblichen Pkw im Vergleich zu einer Vollbremsung auch nur geringes fahrdynamisches Potential.

Insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten ist jedoch situationsabhängig sehr häufig ein Ausweichen noch später möglich als ein kollisionsvermeidendes Notbremsmanöver. Hieraus wiederum wird ersichtlich, weshalb die auf dem Markt befindlichen aktiven Systeme lediglich in der Lage sind, Kollisionen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich

-

^{§ 1} StVO: (I) Die Teilnahme am Straßenverkehr erfordert ständige Vorsicht und gegenseitige Rücksicht. (II) Wer am Verkehr teilnimmt hat sich so zu verhalten, dass kein Anderer geschädigt, gefährdet oder mehr, als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird.

⁵³ Winner (2012): Frontalkollisionsschutzsysteme, S.528ff.

⁵⁴ § 4 I 1 StVO: "Wer vorausfährt, darf nicht ohne zwingenden Grund stark bremsen."

zwischen 15 km/h⁵⁵ und 30 km/h⁵⁶ ganz zu vermeiden. Bei höheren Geschwindigkeiten können sie, wenn sie überhaupt dafür ausgelegt sind, lediglich die Kollisionsfolgen lindern.⁵⁷

Über diesen Funktionsumfang hinausgehende aktive Systeme werden nach aktuellem Recht als unzulässig erachtet. Änderungen im Wiener Übereinkommen sind jedoch gemäß Art. 49 WÜ⁵⁸ explizit möglich. Es ist deshalb durchaus denkbar, dass in Zukunft auch Systeme mit einem weitaus größeren Funktionsumfang zulässig werden könnten.

2.2.2 Erweiterung auf vorrangige Verkehrsteilnehmer

Das Kreuzungsszenario weist bezüglich des potentiellen Eingriffszeitpunktes, insbesondere aus Sicht des vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmers, zwei Besonderheiten auf. Einerseits betrifft dies den Handlungsspielraum der Beteiligten, da in dieser Konstellation durchaus beide Fahrer zumindest theoretisch in der Lage sind, auf eine kritische Situation kollisionsvermeidend oder kollisionsfolgenlindernd zu reagieren, unabhängig davon, ob sie vorfahrtberechtigt sind oder nicht. Andererseits betrifft dies aber auch die potentiellen Möglichkeiten der Kollisionsvermeidung, die neben der aus dem Längsverkehr bekannten räumlichen Vermeidung auch zeitlich möglich ist⁵⁹.

Während eine räumliche Kollisionsvermeidung in Kreuzungsszenarien ausschließlich durch eine Verzögerung in den Stillstand darstellbar ist, ein vollständiges Wenden des Fahrzeugs vor Erreichen des Kollisionsbereichs wird als potentielle Handlungsalternative an dieser Stelle ausgeschlossen, ist eine zeitliche Vermeidung der Kollision zumindest theoretisch betrachtet entweder durch eine Verzögerung, eine Beschleunigung oder aber ein Ausweichen in bzw. entgegen der Bewegungsrichtung des Hindernis realisierbar⁶⁰.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Zusammenhänge mit Einfluss auf den Eingriffszeitpunkt diskutiert, die sich aus der Tatsache ergeben, dass beide Beteiligte einen erheblichen Einfluss auf den Verlauf einer kritischen Situation besitzen. Hierbei gilt es insbesondere den Einfluss der großen Bandbreite an unterschiedlichen Kollisi-

⁵⁵ Vgl. z.B. "Volvo City Safety": Volvo (2012): Volvo S60 Owner's Manual, S.168ff.

Vgl. z.B. "Fiat City Emergency Braking": http://de.euroncap.com/de/rewards/fiat_cbc.aspx (letzter Zugriff am 09.07.2014) oder "Subaru Eyesight": http://www.subaru.com.au/about/eyesight/pre-collision-braking-system (letzter Zugriff am 09.07.2014)

⁵⁷ Vgl. z.B. "Audi Pre Sense Front": http://de.euroncap.com/de/rewards/audi_pre_sense_front.aspx (letzter Zugriff am 09.07.2014)

⁵⁸ Artikel 49 I 1 WÜ: "Ist dieses Übereinkommen ein Jahr in Kraft gewesen, so kann jede Vertragspartei eine oder mehrere Änderungen des Übereinkommens vorschlagen."

⁵⁹ Vgl. Kapitel 1.2.3

⁶⁰ Vgl. Kapitel 2.3

onskonstellationen in Kreuzungsszenarien, der Vorfahrtberechtigung des Egofahrzeugs und des Handlungsspielraums des wartepflichtigen, potentiellen Kollisionsobjekts in Bezug auf einen automatisierten Systemeingriff im Egofahrzeug zu analysieren. Die daraus resultierenden Folgen für das Potential einer räumlichen und/oder zeitlichen Kollisionsvermeidung aus Sicht des Egofahrzeugs sind dann wiederum Bestandteil des sich daran anschließenden Kapitels.

2.2.2.1 Folgen der geometrischen Zusammenhänge des Kreuzungsszenarios

Unter der durchaus gerechtfertigten Annahme keiner kurzfristigen Verhaltensänderung des Fahrers des vorausbefindlichen Fahrzeugs im Längsverkehr⁶¹, kann eindeutig ein "letztmöglicher Zeitpunkt" bestimmt werden, zu dem situationsabhängig in einem solchen Szenario eine Kollision entweder durch Notbremsen oder durch Notausweichen gerade noch vermieden werden kann.

In Kreuzungsszenarien stellt sich die Situation grundlegend anders dar. Eine übliche Kreuzung annehmend, nähern sich beide beteiligten Fahrzeuge einander in einem Winkel, bei dem beide Fahrer, potentielle Sichtverdeckungen außer Acht lassend, grundsätzlich die gleichen Voraussetzungen besitzen, den jeweils anderen wahrzunehmen. Nach Knote et al. liegen die Winkel zwischen den durch die Kreuzung miteinander verknüpften Straßen üblicherweise zwischen 76,5° und 108° 3, wobei wenn möglich immer eine rechtwinklige Kreuzung oder Einmündung anzustreben ist. Diese Empfehlung spiegelt sich beispielsweise auch in der von Mangel durchgeführten Analyse der Kreuzungen der Stadt München wider, wonach dort 77 % aller X-Kreuzungen und ca. 67 % aller Einmündungen einen Kreuzungswinkel von 90°±20° aufweisen. Das Unfallgeschehen an Kreuzungen, basierend auf einer Auswertung der GIDAS Datenbank bekräftigt diese Annahme zusätzlich. Ungefähr 75 % aller Unfälle finden an nahezu rechtwinkligen X-Kreuzungen und weitere 19 % an T-Kreuzungen statt, wobei in dieser Auswertung unter nahezu rechtwinklig ein Winkel zwischen 75 und 105° verstanden wird.

Darüber hinaus besitzen beide Beteiligte zumindest rein fahrphysikalisch betrachtet, unter Vernachlässigung Fahrzeugtyp bedingter Unterschiede, das identische Potential,

20

⁶¹ Vgl. Kapitel 2.2.1

⁶² Vgl. Knote et al. (2011): Straßenverkehrstechnik, S.380

⁶³ Bei Knote et al. (2011) wird die Hilfsmaßeinheit des Gon zur Angabe der Winkelweite ebener Winkel verwendet, wobei 1 $gon = \frac{2\pi \cdot rad}{400} = 0,9^{\circ}$ entspricht.

⁶⁴ Vgl. Mangel (2012): Inter-vehicle communication at intersections, S. 99 ff.

⁶⁵ Vgl. Mages (2009): Top-Down-Funktionsentwicklung Einbiege- und Kreuzenassistenten, S.14 ff.

um auf die Situation reagieren zu können. Im Unterschied zum Längsverkehrsszenario, in welchem das vorausbefindliche Fahrzeug kaum Einfluss auf den Verlauf der kritischen Situation besitzt⁶⁶, wäre in der vorliegenden Konstellation zumindest theoretisch, abhängig vom Zeitpunkt der jeweils ersten Wahrnehmung, beiden Beteiligten durch ein rechtzeitiges Bremsmanöver die Vermeidung der andernfalls folgenden Kollision, unabhängig davon, wie sich der andere verhält, möglich.

Davon ausgehend, dass beide Beteiligte ihrer Sorgfaltspflicht nachkommen und nicht bewusst eine Kollision herbeiführen wollen, ist, sobald einer der beiden Fahrer die Situation erkennt und diese richtig interpretiert, sogar von einer entsprechenden Reaktion auf die Annäherung auszugehen. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um den an die Verkehrsregeln haltenden vorfahrtberechtigten Fahrer oder den die Regeln missachtenden wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer handelt. Verschiedene Studien bestätigen diese Hypothese⁶⁷. So zeigen beispielsweise Lechner et al.⁶⁸ in ihrer Simulatorstudie, dass der Fahrer in diesen Fällen meist eine Bremsreaktion, gegebenenfalls kombiniert mit einem Ausweichversuch, zeigen wird, selbst wenn ein Ausweichen ohne Verzögerung die effektivste Maßnahme darstellen würde. Ein ähnliches Verhalten konnte von Fleury et al.⁶⁹ anhand der Analyse realer Kreuzungsunfälle in Frankreich belegt werden. Ein kombinierter Ausweichversuch erfolgt dabei tendenziell in die Bewegungsrichtung des Hindernisses, wobei es vom Fahrer abhängt, ob zuerst gebremst oder gelenkt wird.⁷⁰ Eine eindeutige Tendenz lässt sich dies bezüglich aus dieser Studie nicht ableiten.

Bis zu welchem Zeitpunkt vor der Kollision eine solche Reaktion zu erfolgen hat, damit diese noch vermieden werden kann, hängt zum einen vom Annäherungsverhalten, d.h. den jeweiligen Geschwindigkeiten und gegebenenfalls vorliegenden Beschleunigungen der Beteiligten, aber auch von der prädizierten Kollisionskonstellation, beschreibbar durch Stoßwinkel und Stoßpunkt, ab. Zwar lässt sich wie für Längsszenarien auch in Kreuzungsszenarien eine t_{tc} berechnen, doch reicht dieser Kennwert für die Ableitung des notwendigen Eingriffszeitpunktes nur für den Sonderfall einer Kollision vordere Fahrzeugecke auf vordere Fahrzeugecke (Abbildung 2-3 - links) bei einer Kollision mit einem Kollisionswinkel $KW \leq 90^{\circ}$, bzw. für das Fahrzeug, welches das andere in der Seite trifft, aus. In diesen beschriebenen Fällen würde ein entsprechend initiiertes Manöver dazu führen, dass das jeweilige Fahrzeug unmittelbar vor Erreichen des, als Schnittfläche der beiden Trajektorien definierten, Kollisionsbereichs KB zum Stehen

⁶⁷ Vgl. z.B. Adams (1994): Avoidance Maneuvers: Braking versus Steering oder Kosch et al. (2006): Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen

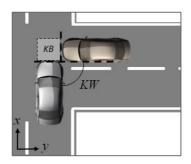
⁶⁶ Vgl. Kapitel 2.2.1, S.18

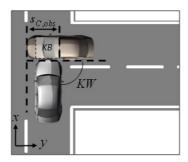
⁶⁸ Vgl. Lechner und Malaterre (1991): Emergency maneuver experimentation

⁶⁹ Vgl. Fleury et al. (1988): Analyse typologique des manoeuvre d'urgence en intersection

⁷⁰ Vgl. Mazzae et al. (1999): Driver Crash Avoidance Behavior, S.6f und McGehee et al. (1999): Drivers' Collision Avoidance Behavior, S.57f.

kommen würde. Die Kollision wäre dann unabhängig vom Verhalten des jeweils anderen räumlich vermieden worden. In diesen Konstellationen hängt der Eingriffszeitpunkt einer die Kollision gerade noch vermeidenden Notbremsung damit ausschließlich vom Annäherungsverhalten des jeweiligen Fahrzeugs ab. Für das jeweils andere Fahrzeug, das dann seitlich getroffene, führt ein an die t_{tc} angelehnter Systemeingriff dazu, dass dieses erst innerhalb des potentiellen Kollisionsbereich KB zum Stehen kommen würde (Abbildung 2-3 – Mitte bzw. rechts), und eine Kollisionsvermeidung dann nur noch durch entsprechendes Verhalten des anderen Beteiligten möglich ist.





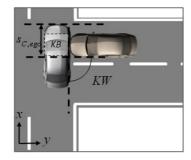


Abbildung 2-3 Beispiele für mögliche Kollisionskonstellationen, beschrieben durch den Kollisionswinkel KW sowie die Positionsverlagerung $s_{c,ego}$ und $s_{c,obs}$ (Mitte und rechts) gegenüber einer Ecke auf Ecke Kollision (links)

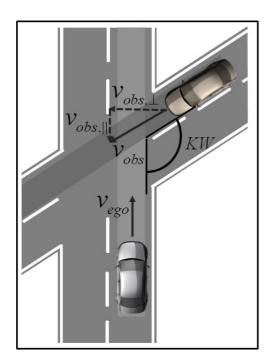
Je größer dabei die jeweilige Verlagerung $s_{c,ego}$ oder $s_{c,obs}$, um die das Fahrzeug in der jeweiligen Kollisionskonstellation in den Kollisionsbereich KB hineinragt, desto früher muss dieses im Vergleich zu dem aus der t_{tc} folgenden Zeitpunkt eingreifen, um eine Kollision räumlich zu vermeiden. Der, die Kollisionskonstellation beschreibende, Offset nimmt bei einer Annäherung im 90°-Winkel maximal Werte entsprechend der Fahrzeugabmessungen, nach den Gleichungen (2.1) und (2.2), an.

$$S_{c,ego,90,\text{max}} = L_{ego} + B_{obs} \tag{2.1}$$

$$s_{c,obs,90,max} = L_{obs} + B_{ego}$$
 (2.2)

Für Winkel ungleich 90° sind die Werte, basierend auf den geometrischen Zusammenhängen, den nachfolgenden Abbildungen zu entnehmen, wobei sich diese grundsätzlich dahingehend voneinander unterscheiden, ob der Annäherungswinkel zwischen den beiden Fahrzeugen größer oder kleiner 90° ist.

Dies ist insbesondere in der winkelabhängigen Geschwindigkeitskomponente des Hindernisobjektes parallel zur Bewegungsrichtung des Egofahrzeugs $v_{obs,\parallel}$ begründet. Ist der Annäherungswinkel kleiner 90°, so sind diese gleichsinnig, während sie andernfalls gegensinnig wirken (vgl. Abbildung 2-4).



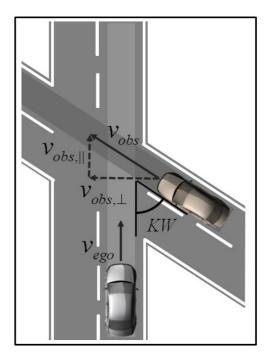


Abbildung 2-4 Beispiele für den Einfluss des Annäherungs- bzw. Kollisionswinkels KW auf die Aufteilung von v_{obs} in die Komponenten senkrecht und parallel in Bezug zu v_{ego}

Dies hat zur Folge, dass bei kleineren Annäherungswinkeln, von den theoretisch denkbaren, in Abbildung 2-5 dargestellten, Kollisionskonstellationen, die grau markierten Bereiche ausschließlich bei Vorliegen eines definierten Geschwindigkeitsverhältnisses auftreten können. So ist eine Kollisionskonstellation zwischen den Grenzen [1] und [3] nur möglich, wenn

$$v_{ego} < v_{obs} \cdot \cos KW \text{ ([1]-[2]) bzw. } v_{ego} < \frac{v_{obs}}{\cos KW} \text{ ([2]-[3])}.$$

Andernfalls würde das Egofahrzeug zeitlich betrachtet in die eigene Längsrichtung eine größere Wegstrecke zurücklegen als das Hindernisobjekt infolge des Annäherungswinkels und eine Kollision wäre in einer solchen Konstellation folglich nicht möglich. Ähnliches gilt für die Konstellationen zwischen den Grenzen [5] und [7], nur dass in diesen Fällen

$$v_{ego} > v_{obs} \cdot \cos KW \ ([5]-[6]) \text{ bzw. } v_{ego} > \frac{v_{obs}}{\cos KW} \ ([6]-[7])$$

gelten muss, da ansonsten das Hindernisobjekt mehr Wegstrecke in Längsrichtung des Egofahrzeugs zurücklegt und das Egofahrzeug folglich hinter dem Objekt passieren würde.

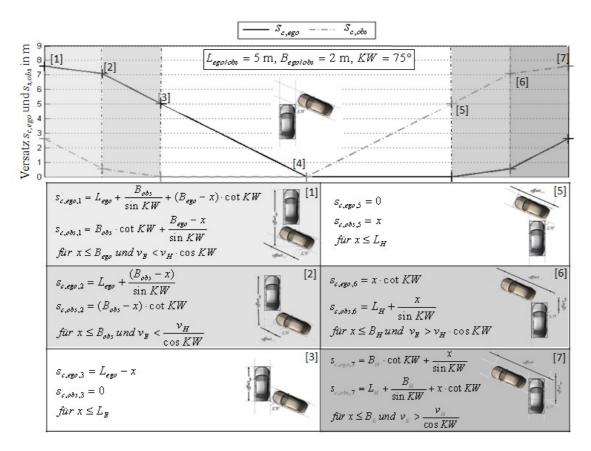


Abbildung 2-5 Geometrischer Zusammenhang der Fahrzeugoffsets zwischen einer die Kollision räumlich vermeidenden Position und der prädizierten Kollisionskonstellation für Kollisionswinkel $KW \le 90^{\circ}$

Bei einer Annäherung in einem Winkel größer 90° sind alle theoretisch denkbaren Konstellationen unabhängig von den jeweiligen Fahrzeuggeschwindigkeiten, wie Abbildung 2-6 zu entnehmen, auch praktisch möglich. Eine Besonderheit dieser Annäherungswinkel ist jedoch, dass hier keine Konstellation existiert, in der für beide Fahrzeuge die t_{tc} gleichzeitig das relevante Kritikalitätsmaß darstellt, da sich unabhängig von der potentiellen Kollisionskonstellation mindestens eines der Fahrzeuge immer innerhalb des Kollisionsbereichs KB befindet.

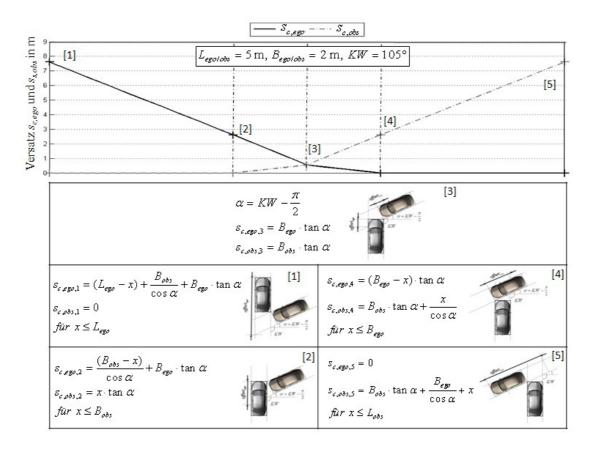


Abbildung 2-6 Geometrischer Zusammenhang der Fahrzeugoffsets zwischen einer die Kollision vermeidenden Position und der prädizierten Kollisionskonstellation für Kollisionswinkel > 90°

Auf diesen Zusammenhängen aufbauend beschreiben die Gleichungen (2.3) - (2.5) abhängig von den beiden Annäherungsgeschwindigkeiten v_{ego} und v_{obs} sowie den jeweiligen Offsets $s_{c,ego}$ und $s_{c,obs}$ die zeitliche Differenz $\Delta t_{b,ego-obs}$ zwischen den letztmöglichen, die Kollision sicher vermeidenden Bremseingriffen für eine nichtbeschleunigte Annäherung.

$$\Delta t_{b,ego-obs} = t_{b,ego} - t_{b,obs} \tag{2.3}$$

mit

$$t_{b,ego} = \frac{\frac{v_{ego}^2}{2 \cdot a_{ego,max}} + s_{c,ego}}{v_{ego}}$$
(2.4)

$$t_{b,obs} = \frac{\frac{v_{obs}^2}{2 \cdot a_{obs,max}} + s_{c,obs}}{\frac{v_{obs}}{v_{obs}}}.$$
(2.5)

Aufgrund der ausschließlichen Differenzbetrachtung werden Systemansprechzeiten an dieser Stelle vernachlässigt.

Der nachfolgenden Abbildung 2-7 sind exemplarisch für drei verschiedene Kollisionskonstellationen und im für innerstädtische Kreuzungsszenarien relevanten Bereich bis max. 20 m/s systematisch variierte Fahrzeuggeschwindigkeiten die resultierenden Zeit-

differenzen zwischen den jeweils letztmöglichen die Kollision räumlich vermeidenden Bremseingriffen zu entnehmen. Es wird ersichtlich, dass sich diese Zeitpunkte bei den hier angenommenen Geschwindigkeiten je nach Konstellation um bis zu maximal 1 s voneinander unterscheiden. Tendenziell muss dabei das Fahrzeug, das in die Seite getroffen wird, früher reagieren, um noch rechtzeitig in den Stillstand zu kommen.

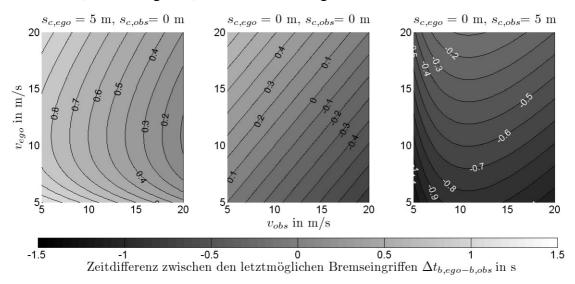


Abbildung 2-7 Beispiel für die Zeitdifferenzen zwischen den letztmöglichen eine Kollision vermeidenden Bremseingriff von Egofahrzeug und Hindernisobjekt in Abhängigkeit der Geschwindigkeiten sowie der Kollisionskonstellation beschrieben durch $s_{c,ego}$ und $s_{c,obs}$

In Kreuzungsszenarien gibt es somit für jedes der Fahrzeuge einen "letztmöglichen Zeitpunkt" die Kollision zu vermeiden, wobei sich die Frage stellt, welcher dieser Zeitpunkte maßgeblich für die Zulässigkeit eines Systemeingriffs im Egofahrzeug ist. Ist es für einen Systemeingriff im Egofahrzeug bereits hinreichend, dass dieses die Kollision andernfalls nicht mehr eigenständig vermeiden kann, oder muss für einen Systemeingriff auch das Hindernisobjekt die Kollision nicht mehr vermeiden können?

2.2.2.2 Fahrerakzeptanz gegenüber Systemeingriff

Im Rahmen dieser Arbeit wird keine Diskussion bzw. Auslegung des rechtlichen Rahmens angestrebt, inwieweit der Begriff "letztmöglicher Zeitpunkt" auf ein Kreuzungsszenario anzuwenden ist, ob sich dieser alleine auf das jeweilige Fahrzeug bezieht oder die ganze Szenerie. Einen alternativen Zugang zu diesem Komplex verspricht jedoch die Thematik der potentiellen Nutzerakzeptanz. Da das globale Potential aktiver Sicherheitssysteme direkt von deren Ausstattungsrate abhängt, und diese, sofern nicht gesetzlich vorgeschrieben, stark durch die Einstellung des Nutzers gegenüber diesem System getrieben wird, gilt es bei dessen Ausgestaltung die Akzeptanz seitens des Nutzers in den Vordergrund zu stellen.

Einen wesentlichen Aspekt in diesem Zusammenhang stellt die Falscheingriffsrate, die sogenannten "Falsch-Positiv-Reaktionen"⁷¹, dar. Bereits geringe Fehlerraten können das Vertrauen in ein System erheblich einschränken⁷². Aus diesem Grund besitzt das Thema "Falschauslösung" im Rahmen der Entwicklung solcher Systeme höchste Priorität.⁷³ Aufgrund der Prädiktion unsicherer Größen wird deren vollständige Vermeidung kaum möglich sein, doch gilt es diese, durch eine entsprechende Funktionsauslegung, zumindest zu minimieren. Eine Reduktion der "Falsch-Positiv-Reaktionen" geht bei gegebener Eingriffsschwelle, allerdings mit einer Steigerung der "Falsch-Negativ-Reaktionen"⁷⁴ einher. Je weiter die Anzahl an Fehleingriffen reduziert wird, desto eher kommt es dazu, dass in Situationen, die eines Eingriffs bedürfen, kein Eingriff stattfindet.

Bei einem, im Stand der Technik aufgezeigten, Kreuzungsassistenten für den wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer ist, Sonderfälle wie beispielsweise einen abgebrochenen Anhaltevorgang außer Acht lassend, in der Regel frühzeitig detektierbar, ob der Fahrer vor einer Kreuzung oder Einmündung anhalten wird oder nicht. Aufgrund der eindeutigen Verkehrsregelungen kann hier das Potential einer Eingriffskaskade beispielsweise bestehend aus Warnung, Teil- und Volleingriff, komplett ausgeschöpft werden, und das Fahrzeug selbst bei ausbleibender Fahrerreaktion nach einer Warnung noch eigenständig vor Erreichen der Kreuzung in den Stillstand gebracht werden. Bei geeigneter Wahl der Zeitpunkte für Warnung und/oder Systemeingriff⁷⁵ sind diese für den Fahrer, aufgrund seines potentiellen Fehlverhaltens auch entsprechend nachvollzieh- und somit tolerierbar.

Im hier vorliegenden Fall des vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmers ist die Situation jedoch eine grundlegend andere, da dieser im Normalfall, Geschwindigkeitsüberschreitungen außer acht lassend, kein die Verkehrsregeln missachtendes Verhalten zeigt. Nach § 1 Abs. 1 StVO⁷⁶ ist das Vorfahrtrecht zwar kein absolutes Recht⁷⁷, d.h. wenn eine Kollision durch maßvolles Bremsen des zur Vorfahrt berechtigten Fahrzeuges hätte vermieden werden können, so trifft dessen Fahrer bei einer Kollision zumindest eine Mitschuld⁷⁸. In der StVO gilt aber auch der so genannte "Vertrauensgrundsatz", abgelei-

⁷¹ Definition: Eingriff hat stattgefunden obwohl dieser objektiv betrachtet nicht notwendig gewesen war.

⁷² Vgl. Lerner et al. (1996): Inappropriate Alarm Rates and Driver Annoyance, S.15ff. und Kiefer et al. (1999): Functional Definitions and Evaluations Procedures for Collision Warning/Avoidance Systems

⁷³ Vgl. Breuer und Mücke (2007): Bewertung Sicherheitssystemen in Fahrversuch, S.119-129

⁷⁴ Definition: Eingriff hat nicht stattgefunden obwohl dieser objektiv betrachtet notwendig gewesen war.

⁷⁵ Vgl. z.B. Klanner (2008): Entwicklung kommunikationsbasierter Querverkehrsassistenten oder Mages (2009): Top-Down-Funktionsentwicklung Einbiege- und Kreuzenassistenten

⁷⁶ § 1 Abs. 1 StVO: "Die Teilnahme am Straßenverkehr erfordert ständige Vorsicht und gegenseitige Rücksicht"

⁷⁷ Vgl. OLG Karlsruhe (Az.: 3 Ss 6/01)

⁷⁸ Vgl. OLG München (Az. 10 U 2595/12))

tet aus § 1 Abs. 2 StVO⁷⁹, nach dem sich ein vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer grundsätzlich darauf verlassen darf, dass die anderen sein Vorfahrtsrecht kennen und sich danach richten. Dieser Grundsatz ermöglicht erst einen flüssigen Verkehrsablauf, da andernfalls jede Situation im Einzelfall neu entschieden werden müsste.

"Rechts vor Links" Knotenpunkte, bei denen auch vom Grundsatz der "halben Vorfahrt⁸⁰" gesprochen wird, nehmen hier eine Sonderrolle ein. Jeder Fahrzeugführer ist zwar gegenüber allen von links kommenden Fahrzeugen bevorrechtigt, aber gleichzeitig gegenüber den von rechts kommenden Fahrzeugen wartepflichtig, so dass man sich grundsätzlich mit "mäßiger Geschwindigkeit" und "Bremsbereit" der Kreuzung zu nähern hat, so dass in diesen Konstellationen der Vertrauensgrundsatz kaum zum Tragen kommt. Bei durch Verkehrszeichen oder LZA geregelten Kreuzungen spielt der Vertrauensgrundsatz jedoch eine große Rolle. Hier geht man als Fahrer davon aus, dass sich alle Beteiligten entsprechend der geltenden eindeutigen Regelungen verhalten. Dies spiegelt sich auch in der bereits in der Einleitung kurz betrachteten Unfallstatistik wider. Fast 84 % aller Kollisionen finden an durch LZA oder durch das Verkehrszeichen "Vorfahrt gewähren!" geregelten Kreuzungen statt⁸¹, was die Vermutung nahelegt, dass dies zumindest anteilig auf die Erwartungshaltung des vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmers zurückzuführen ist.

Dies zeigt zwar einerseits die Notwendigkeit bzw. das Potential einer Unterstützung des vorfahrtberechtigten Fahrers, macht andererseits aber auch dessen Verhaltensgewohnheiten deutlich, wonach dieser in klar geregelten Situationen häufig kaum oder auch gar nicht auf nachrangige Verkehrsteilnehmer achtet. Unter diesen Gesichtspunkten hat die Wahl des richtigen Zeitpunktes einer Intervention, sei es eine Warnung oder ein aktiver Eingriff, eine noch größere Bedeutung als sie es ohnehin schon bei Kreuzungsassistenten für den wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer besitzt.

Jeder objektiv unangebrachte oder subjektiv als so empfundene Eingriff besitzt einerseits einen negativen Einfluss auf den Verkehrsfluss und steigert die Unfallgefahr für den auf der Vorfahrtsstraße nachfolgenden Verkehr, wird darüber hinaus aber auch die Akzeptanz gegenüber dem System negativ beeinflussen. Die Frage, die sich dabei stellt, ist, in welchen Fällen ein vorfahrtberechtigter Fahrer einen Systemeingriff voraussichtlich tolerieren würde. Zweifelsohne wird er dies tun, wenn durch diesen Eingriff eine ansonsten unvermeidbare Kollision verhindert oder zumindest signifikant in ihren Folgen gelindert worden ist. Die Notwendigkeit eines Eingriffs zeigt sich für den Fahrer jedoch erst im Resultat des Eingriffs. Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, gibt es durchaus Konstellationen, in denen die Notwendigkeit eines Eingriffs für das vorfahrt-

⁷⁹ § 1 Abs. 2 StVO: "Wer am Verkehr teilnimmt hat sich so zu verhalten, dass kein anderer geschädigt, gefährdet oder mehr, als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird."

 $^{^{80}}$ Vgl. BGH, 21.06.1977, Az.: VI ZR 97/76

⁸¹ Siehe Kapitel 2.1

berechtigte Egofahrzeug bereits zu einem deutlich früheren Zeitpunkt zutrifft als für das potentielle Hindernisobjekt. Sicherlich ist an dieser Stelle die Frage zulässig, wie wahrscheinlich es ist, dass der Fahrer des Hindernisses tatsächlich in diesem möglicherweise verbleibenden Zeitraum noch reagiert, wenn er es bisher noch nicht getan hat. Es wurde jedoch ebenfalls bereits gezeigt, dass er für den Fall, dass er die Situation noch wahrnimmt, auch mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf reagieren wird. ⁸² In einem solchen Fall, in dem der Fahrer des Hindernisobjektes zwar sehr spät, aber dennoch rechtzeitig handelt, würde ein simultaner Eingriff im Egofahrzeug dazu führen, dass beide Fahrzeuge beispielsweise noch vor der Kreuzung zum Stillstand kommen. Die Kollision wäre somit zwar verhindert worden, doch wäre diese Konstellaion für den Fahrer des vorfahrtberechtigten Fahrzeugs schwer nachvollziehbar und würde mit hoher Wahrscheinlichkeit von diesem als Falscheingriff (Falsch-Positiv-Reaktion) interpretiert werden.

Die tatsächliche Akzeptanz gegenüber einer Systemauslegung kann erst in einer späten Entwicklungsphase in Form von Probanden- oder Feldversuchen bestimmt werden. Bei einer konservativen Systemauslegung folgt jedoch aus den bisherigen Überlegungen die Unvermeidbarkeit der Kollision durch das potentielle Kollisionsobjekt als notwendiges Kriterium für einen Systemeingriff im Egofahrzeug, auch wenn dies den Anteil an vermeidbaren Szenarien potentiell negativ beeinflusst. Dies wiederum führt zu einem signifikant geringeren Zeitbudget zur Kollisionsvermeidung oder –folgenlinderung, womit das Potential einer Warnung als Vorstufe zum aktiven Systemeingriff, wie in Systemen des Längsverkehrs oder der Kreuzungsassistenz üblich, in einem hier betrachteten Szenario zu vernachlässigen ist. Eine entsprechende Ausprägung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) ist eher als Information des Fahrers über den Systemeingriff einzuordnen.

2.2.2.3 Konstellation zum frühestmöglichen Eingriffszeitpunkt

Auf Basis der bisherigen Überlegungen kann die Position des Egofahrzeugs relativ zum prädizierten Kollisionsbereich und damit auch der situationsabhängige Zeitpunkt, zu dem seitens des Egofahrzeugs, unter den getroffenen Annahmen, frühestmöglich eingegriffen werden sollte, hergeleitet werden.

Entsprechend der nachfolgenden Gleichungen (2.6) - (2.8) kann ausgehend von einer durch die Fahrzeuggeschwindigkeiten v_{ego} und v_{obs} sowie die prädizierten Offsets $s_{c,ego}$ und $s_{c,obs}$ definierten Kollisionskonstellation auf die Positionen der Fahrzeuge, zum Zeitpunkt, zu dem das Hindernisobjekt die Kollision gerade noch vermeiden kann, zurückgerechnet werden. Hierbei ergibt sich der Abstand des Egofahrzeugs zum Kollisionsbereich aus der Wegstrecke, die das Egofahrzeug während des letztmöglichen Bremsvorgangs des Hindernisobjektes zurücklegt, abzüglich des Offsets $s_{c,ego}$ und zu-

-

⁸² Siehe Kapitel 2.2.2.1

züglich der Wegstrecke, die das Egofahrzeug wiederum aufgrund des Offsets $s_{c,obs}$ zurücklegt.

$$t_{brake,obs} = \frac{v_{obs}}{2 \cdot a_{\text{max},obs}} \tag{2.6}$$

$$s_{ego,t_{brake,obs}} = t_{brake,obs} \cdot v_{ego} = \frac{v_{obs}}{2 \cdot a_{max,obs}} \cdot v_{ego}$$
 (2.7)

$$S_{KB,ego} = S_{ego,t_{brake,obs}} - S_{C,ego} + S_{C,obs} \cdot \frac{v_{ego}}{v_{obs}}$$
(2.8)

Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2-8 nochmal grafisch, für den einfachen Fall einer rechtwinkligen Annäherung aufgearbeitet, abgebildet.

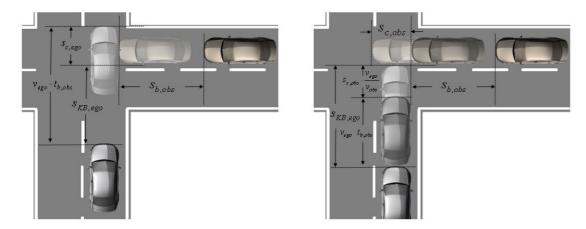


Abbildung 2-8 Grafische Darstellung der Rückrechnung auf die Positionen zum frühestmöglichen Eingriffszeitpunkt am Beispiel einer 90° Kreuzung

Abbildung 2-9 zeigt die Auswertung von Gleichung (2.8) für einen Geschwindigkeitsbereich für beide Fahrzeuge bis 20 m/s sowie dreier exemplarischer Offset-Kombinationen. Die abgebildeten Isolinien beschreiben Kombinationen von Fahrzeuggeschwindigkeiten, die einen gleichen Abstand zum prädizierten Kollisionsbereich zum Zeitpunkt des zulässigen Eingriffs nach sich ziehen. Von der grundsätzlichen Tendenz her steigt der Abstand zum Kollisionsbereich, zu dem seitens des Egofahrzeugs eingegriffen werden könnte, erwartungsgemäß mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit an. Einen nicht unwesentlichen Einfluss besitzt aber auch die jeweilige Kollisionskonstellation. Insbesondere bei niedriger Hindernisgeschwindigkeit v_{obs} und einer prädizierten Kollisionskonstellation mit $s_{c,ego} > 0$ (linkes Diagramm), gleichbedeutend mit einer Kollision in die Seite des Egofahrzeug, befindet sich das Egofahrzeug nahezu unabhängig von der eigenen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt eines zulässigen Eingriffs bereits innerhalb des Kollisionsbereichs KB. In einer solchen Konstellation lässt sich durch Bremsen weder die Kollision vermeiden noch deren Folgen maßgeblich lindern. Die Schwere einer potentiellen Kollision wird hier primär durch das Verhalten des Hindernisobjektes bzw. der aus diesem Verhalten folgenden Kollisionsgeschwindigkeit $v_{C,obs}$ bestimmt.

Andererseits zeigt sich aber auch, dass bei Konstellationen mit $s_{c,obs} > 0$ (rechtes Diagramm) und niedriger Hindernisgeschwindigkeit v_{obs} , bereits bei großen Abständen des Egofahrzeugs zum Kollisionsbereich ein Eingriff zulässig wäre. Hier scheint wiederum Bremsen das Mittel der Wahl zu sein.

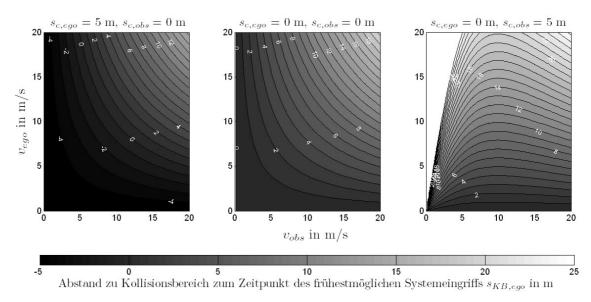


Abbildung 2-9 Abstand des Egofahrzeugs zum Kollisionsbereich zum Zeitpunkt der Unvermeidbarkeit durch das Hindernisobjekt für ausgewählte Konstellationen und *KW*=90°

In Bezug auf die Untersuchungshypothese kann an dieser Stelle somit festgehalten werden, dass sich auf Basis des Kriteriums der Unvermeidbarkeit der Kollision seitens des Hindernisobjektes ein vom jeweiligen Szenario abhängiger aber eindeutiger Abstand zum Kollisionsbereich KW bestimmen lässt, der als notwendiges Kriterium für einen Systemeingriff aus Sicht des vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmers herangezogen werden kann, der den getroffenen Randbedingungen entspricht. Ob ein Eingriff zu diesem Zeitpunkt tatsächlich schon notwendig ist oder die Kollision bereits nicht mehr vermieden werden kann, hängt maßgeblich von der Bewegung des Egofahrzeugs und den nachfolgend betrachteten realisierbaren Eingriffstypen ab.

2.3 Eingriffstyp

Im vorherigen Abschnitt ist, basierend auf dem Kollisionsvermeidungspotential des potentiellen Hindernisses, eine obere Schranke für den frühestmöglichen Systemeingriff im Egofahrzeug hergeleitet worden. Hierauf aufbauend gilt es abzuleiten, welche die Kollision vermeidende Maßnahmen zu diesem Zeitpunkt noch erfolgreich möglich und wann einzuleiten sind bzw. wie Folgen noch möglichst effektiv gelindert werden können.

2.3.1 Kollisionsvermeidung

An Kreuzungen sind grundsätzlich die, Abbildung 2-10 zu entnehmenden, Maßnahmen der räumlichen und zeitlichen Kollisionsvermeidung denkbar. Das die Kollision räumlich vermeidende Notbremsmanöver ist durchaus bekannt und in weiten Bereichen erforscht und wird daher in den folgenden Überlegungen innerhalb dieses Kapitels nicht weiter vertieft.

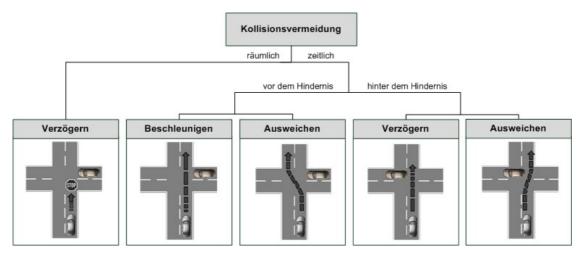


Abbildung 2-10 Theoretisch mögliche Eingriffstypen zur räumlichen und zeitlichen Vermeidung einer potentiellen Kollision in einem Kreuzungsszenario

Bei einem die Kollision zeitlich vermeidenden Manöver ergibt sich ganz grundlegend die Frage nach der Richtung, in die es relativ zum potentiellen Kollisionsobjekt ausgeführt werden sollte – in oder entgegen dessen Bewegungsrichtung.

Eine zeitliche Vermeidung durch Passieren vor dem Hindernis mit dem Ziel, den Kollisionsbereich wieder verlassen zu haben, bevor das Hindernis diesen erreicht, ist entweder durch ein Ausweichen in Bewegungsrichtung des Hindernisses oder aber ein Beschleunigen des Egofahrzeugs darstellbar; vergleiche Fall 2 und 3 von rechts beginnend in Abbildung 2-10. Ein Beschleunigen ist allerdings aufgrund des zusätzlichen Risikopotentials im Fehlerfall für eine Schutzfunktionalität abzulehnen. Im Falle eines misslungenen Manövers würde die zusätzlich in das System eingebrachte kinetische Energie die Situation im Vergleich zur Ausgangskonstellation noch verschärfen.

Eine zeitliche Vermeidung der Kollision durch Passieren hinter dem Hindernis, hat wiederum das Ziel, den Kollisionsbereich erst dann zu erreichen, nachdem das Hindernis diesen bereits wieder verlassen hat. Dies ist durch Ausweichen entgegen der Bewegungsrichtung des Hindernisses bzw. Verzögerung des Egofahrzeugs möglich, wobei auch kombinierte Manöver in Frage kommen; vergleiche wiederum Fall 4 und 5 in Abbildung 2-10.

Es hängt von der jeweiligen Konstellation ab, welche der Varianten als letzte noch möglich ist. Je später die Konstellation aus Sicht des Egofahrzeugs, d.h. je größer $s_{c,obs}$,

und je schneller das Hindernisobjekt, desto eher ist tendenziell eine Vermeidung hinter dem Hindernisobjekt zu präferieren.

Eine erfolgreiche zeitliche Kollisionsvermeidung verlangt, wie bereits in Kapitel 2.1 diskutiert, grundsätzlich nach der Realisierung eines vom jeweiligen Szenario abhängigen Querversatzes relativ zum Hindernisobjekt y_{rel} . Dies lässt sich einerseits durch eine räumliche laterale Verlagerung des Egofahrzeugs $y_{e,ego}$ realisieren. In Szenarien mit einem bereits stehenden oder sich ausschließlich parallel zum Egofahrzeug fortbewegenden Hindernisobjekt, hierbei ist es gleichgültig, ob sich dieses in dieselbe oder die entgegengesetzte Richtung bewegt, stellt dies die einzige Möglichkeit dar, um den zur Kollisionsvermeidung notwendigen Relativversatz aufzubauen.

Zusätzlich besitzt ein Ausweichmanöver in Kreuzungsszenarien aber auch noch eine zeitliche Komponente. Bedingt durch die mit dem Ausweichpfad verbundene zusätzliche Wegstrecke $s_{e,ego}$, verglichen mit der Geradeausfahrt als Referenz $s_{e,ref}$, kommt das Egofahrzeug selbst unter der Annahme einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{ego,0}$ um die Zeitdauer

$$\Delta t_{e,ego}(x) = \frac{s_{e,ego}(x) - s_{e,ref}(x)}{v_{ego.0}}$$
 (2.9)

später am potentiellen Kollisionsbereich KB an. Abbildung 2-11 zeigt hierzu exemplarisch für verschiedene Ausweichtrajektorien mit steigendem Lateralversatz den zur Realisierung eines definierten Longitudinalversatzes zusätzlichen Zeitbedarf $\Delta t_{e,ego}$ in s für eine als konstant angenommene, d.h. nichtbeschleunigte, Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h⁸³.

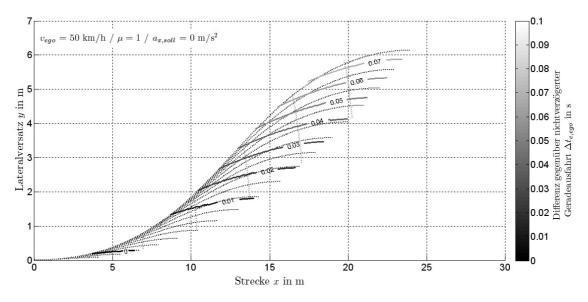


Abbildung 2-11 Differenz in der Manöverdauer des Ausweichens gegenüber der Geradeausfahrt aufgrund der längeren Wegstrecke bei Annahme $v_{ego,0}$ = konst = 50 km/h.

-

⁸³ Für den diesen Kurven zugrundeliegenden Modellansatz siehe Kapitel 3

Die Geschwindigkeitskomponente des Hindernisobjektes senkrecht zur Bewegungsrichtung des Egofahrzeugs führt nun dazu, dass sich das Hindernis gegenüber der Ausgangskonstellation, entsprechend seiner Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung ebenfalls um die Strecke $\Delta t_{e,ego}(x) \cdot v_{obs,\perp}$ weiterbewegt hat.

Die zeitliche Komponente wird dabei nicht nur von der vom Ausweichpfad abhängigen zusätzlichen Wegstrecke beeinflusst, sondern insbesondere auch durch Geschwindigkeitsänderungen des ausweichenden Egofahrzeugs. So führt ein verzögertes Ausweichmanöver, zu einem deutlich größeren $\Delta t_{e,ego}$ als ein nichtverzögertes Manöver. Bereits eine Fahrzeugverzögerung von -1 m/s² während des Manövers führt bei ansonsten gleichen Ausgangsbedingungen, wie in Abbildung 2-12 ersichtlich, zu versatzabhängigen zeitlichen Verzügen von bis zu ca. 0,2 s⁸⁴.

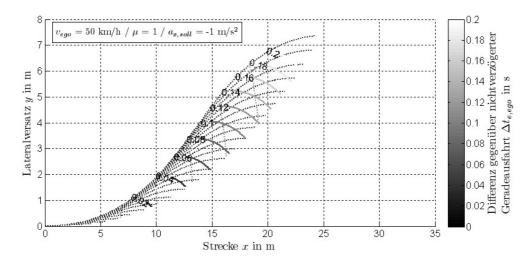


Abbildung 2-12 Differenz in der Manöverdauer des Ausweichens gegenüber der Geradeausfahrt aufgrund der längeren Wegstrecke sowie der Annahme einer konstanten Längsverzögerung während des Manövers (a_x = -1 m/s²) und einer Ausgangsfahrzeuggeschwindigkeit v_{ego} = 50 km/h

Bezogen auf die Beurteilung der Gesamtsituation führt dieser zusätzliche zeitliche Aspekt ebenso zu einem Relativversatz zwischen den beiden Objekten wie der eigentliche Ausweichversatz $y_{e,ego}$. In einem üblichen Kreuzungsszenario, mit einem sich fortbewegenden potentiellen Kollisionsobjekt, ergibt sich somit der wegabhängige Relativversatz zu

$$y_{rel}(x,\gamma) = y_{e,ego}(x,\gamma) + \Delta t_{e,geo}(x,\gamma) \cdot v_{obs,\perp}, \qquad (2.10)$$

wobei mit γ der, unter der Annahme einer optimalen Kraftschlussausnutzung, aus der mit dem Manöver verbundenen Längsverzögerung resultierende Winkel des wirksamen Beschleunigungsvektors beschrieben wird⁸⁵. Je nach Ausweichrichtung und somit je nach wirkender Richtung der Geschwindigkeitskomponente des Hindernisobjektes

⁸⁴ weitere Fahrzeuggeschwindigkeiten siehe Anhang 8.1.1

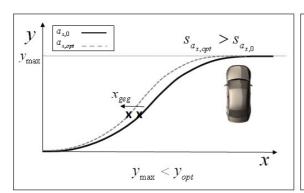
⁸⁵ Vgl. Kapitel 4.2

vergrößert (entgegengesetzte Bewegung) oder reduziert (gleichgerichtete Bewegung) die zeitliche Komponente $\Delta t_{e,ego}(x) \cdot v_{obs,\perp}$ den Relativversatz y_{rel} . Zur Realisierung eines spätestmöglichen Eingriffs gilt es, unabhängig von der Bewegungsrichtung die Relativverlagerung $|y_{rel}|$ des Egofahrzeugs zu maximieren.

2.3.1.1 Zeitliche Vermeidung in Bewegungsrichtung des Hindernisses

Schmidt et al. 86 haben in ihren, auf dem Ansatz des Kammschen Kreis beruhenden Untersuchungen gezeigt, dass sich der streckenbezogene Lateralversatz durch ein kombiniertes Lenk-/Bremsmanöver optimieren lässt, wobei der zu wählende Verzögerungsanteil von der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{ego} abhängt, mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit geringer wird und sich immer mehr einem nichtverzögerten Ausweichen annähert.

Bei der Optimierung des Manövers zur zeitlichen Kollisionsvermeidung in Bewegungsrichtung des potentiellen Kollisionsobjektes gilt es bezüglich des verfügbaren Ausweichraums y_{max} , der über den damit verbundenen letztmöglichen Zeitpunkt des Gegenlenkens t_G den Abstand zum Kollisionsbereich bei Manöverinitierung bestimmt, zwei Fälle zu unterscheiden. Dieser kann entweder größer gleich oder aber kleiner als der für ein, in Bezug auf den Auslöseabstand, optimales Ausweichmanöver notwendige Versatz sein. Bei einem optimalen Manöver würde erst beim Passieren des Hindernisses gegengelenkt werden. Abbildung 2-13 zeigt für beide Fälle ein Beispiel.



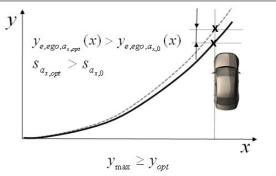


Abbildung 2-13 Beispiele für die Optimierung des streckenbezogenen Lateralversatzes in Abhängigkeit der verfügbaren maximalen Ausweichbreite

Für den Fall $y_{max} < y_{opt}$ (Abbildung 2-13 – links) führt die Optimierung des Beschleunigungsvektors γ in Bezug auf den streckenbezogenen Lateralversatz zu einem ebenfalls streckenbezogenen früheren Gegenlenken, besitzt aber zumindest, was den Zeitpunkt des Passierens des Hindernisses betrifft, keinen Einfluss auf den realisierten Versatz $y_{e,ego}$, der idealerweise weiterhin identisch y_{max} ist, so dass auf diese Weise y_{rel} nicht positiv beeinflusst werden kann. Dafür ist jedoch die mit dem optimierten Beschleuni-

⁸⁶ Schmidt et al. (2005): Letztmögliche Ausweichmanöver stehende und bewegte Hindernisse, S.129 ff.

gungsvektor verbundene Wegstrecke $s_{ax,opt}$ marginal länger als $s_{ax,0}$ ohne zusätzliche Verzögerungskomponente. Hinzu kommt das ohnehin größere $\Delta t_{e,ego}$ aufgrund der größeren Verzögerungskomponente $a_{x,opt}$.

Eine Optimierung von y_{rel} kann folglich unter Ausnutzung des verfügbaren Ausweichraums ausschließlich über eine Minimierung von $\Delta t_{e,ego}$ erfolgen. Da beschleunigte Manöver aufgrund der Gefahr der "Verschlimmbesserung" ausgeschlossen sind, muss es Ziel sein, dass Ausweichmanöver, soweit wie möglich, bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit durchzuführen. Jede Verzögerung während des Manövers führt dazu, dass sich das Hindernis bis zum Passieren dieses durch das Egofahrzeug weiterbewegt hat, wodurch sich bei gegebener Ausweichbreite der realisierbare Relativversatz y_{rel} verringert und folglich die Anzahl der adressierbaren Szenarien reduziert.

Etwas anders stellt sich die Situation im Falle eines "nicht beschränkten" Ausweichraums (vgl. Abbildung 2-13 rechts) dar. In diesem Fall muss das Egofahrzeug erst bei/nach Passieren des Hindernisses wieder auf den Fahrbahnverlauf zurückgeführt werden, wodurch sich die Situation zumindest bis zu diesem Zeitpunkt auf ein Ausweichmanöver ohne Zurücklenken reduzieren lässt. In diesem Fall führt eine Optimierung des Beschleunigungsvektors bei gegebenem Auslöseabstand zu einem streckenbezogen größerem Versatz $y_{e,ego}$. Zusätzlich muss jedoch auch hier das mit steigender Verzögerung ebenfalls größer werdende $\Delta t_{e,ego}$ Berücksichtigung finden.

Der Beschleunigungsvektor γ ist folglich so zu wählen, dass in Abhängigkeit der Geschwindigkeitskomponente des Hindernisses senkrecht zur Bewegung des Egofahrzeugs, der Relativversatz y_{rel} maximiert wird. Bei der zeitlichen Komponente $\Delta t_{e,ego}$ gilt es zu bedenken, dass hier nicht nur die zusätzliche Zeitdauer zum Aufbau des Lateralversatzes zu berücksichtigen ist, sondern auch die Phase des Passierens des potentiellen Kollisionsbereiches KB mit einer dann geringeren Geschwindigkeit als im nichtverzögerten Fall.

Berechnungen, basierend auf dem in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Modellansatz, zeigen, dass der aus einem solchen optimierten Manöver gegenüber dem nichtverzögerten Manöver resultierende Wegvorteil, (der auf einer definierten Wegstrecke zusätzlich realisierte Lateralversatz), wie in Abbildung 2-14 exemplarisch für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 15 m/s dargestellt⁸⁷, für weite Wegstrecken lediglich im Bereich weniger cm liegt. In diesem Beispiel nimmt der streckenbezogene Lateralversatz mit steigender Längsverzögerung erst leicht zu, bis er dann aufgrund des immer geringer werdenden Querbeschleunigungsanteils unter das Niveau des nichtverzögerten Manövers abfällt. Es wird ersichtlich, dass grundsätzlich erst eine gewisse Wegstrecke zurückzulegen ist, bis das kombinierte Manöver überhaupt einen Vorteil gegenüber dem nichtverzögerten aufweist. In den unteren Diagrammen von Abbildung 2-14 ist für variierte Längsverzögerung und drei exemplarische Positionen in longitudinale Bewe-

-

⁸⁷ Abbildungen zu weiteren Fahrzeuggeschwindigkeiten sind Anhang 8.1.2 zu entnehmen

gungsrichtung die jeweils maximal zulässige Geschwindigkeit des Hindernisobjektes v_{obs} (schwarze durchgezogene Linie) aufgetragen, für die das streckenbezogen optimierte Manöver dem nichtverzögerten vorzuziehen wäre. Der geringe zusätzliche Lateralversatz Δy , wird aufgrund des größeren Zeitbedarfs zum Zurücklegen der jeweiligen Wegstrecke Δt , infolge der gleichzeitig anliegenden Fahrzeugverzögerung bereits bei geringer Geschwindigkeit der Hindernisobjektes v_{obs} , im Bereich kleiner 2 m/s, überkompensiert.

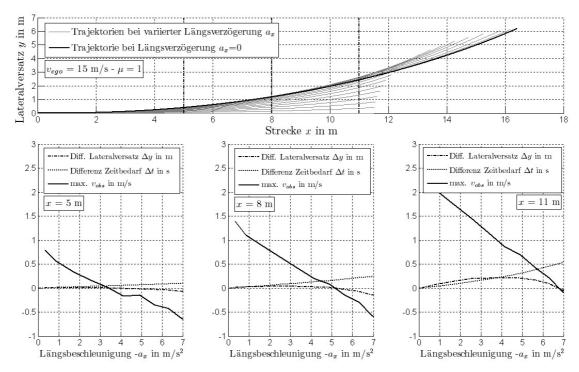


Abbildung 2-14 Beispiel für den Einfluss des Beschleunigungsvektors (bzw. der Längsverzögerung) auf den streckenbezogenen Lateralversatz bei v_{ego} = 15 m/s und μ = 1 (oben). Grenzgeschwindigkeit des Hindernisobjekts, bis zu der das kombinierte Brems-Ausweichmanöver einen größeren Relativversatz realisiert als das nichtverzögerte, in Abhängigkeit der Längsverzögerung für drei exemplarische Wegstrecken (unten).

Hieraus folgend sollte demnach zur Optimierung des Relativversatzes y_{rel} in Bewegungsrichtung des Hindernisobjektes, unabhängig vom verfügbaren Ausweichraum, das primär durch die Geschwindigkeitsreduktion des Egofahrzeugs bedingte $\Delta t_{e,ego}$ minimiert, d.h. die Fahrzeuggeschwindigkeit sollte möglich konstant gehalten, und unter dieser Randbedingung der streckenbezogene Lateralversatz $y_{e,ego}$ abhängig der örtlichen Gegebenheiten maximiert werden.

Wie groß der durch Ausweichen in Bewegungsrichtung des Hindernisses maximal realisierbare Relativversatz y_{rel} ist, hängt primär von den Geschwindigkeiten der beiden beteiligten Fahrzeuge ab. Abbildung 2-15 zeigt für unterschiedliche Geschwindigkeiten des Egofahrzeugs und gegebene max. Manöverbreiten y_{max} die maximal zulässige Geschwindigkeitskomponente des Hindernisobjektes senkrecht zur Bewegungsrichtung des Egofahrzeugs um einen definierten Relativversatz y_{rel} realisieren zu können. Zwar wurde zuvor gezeigt, dass ein solches Ausweichmanöver wenn möglich mit konstanter

Geschwindigkeit zu durchfahren ist, doch ist dies unter der Randbedingung keine zusätzliche Energie dem System zuzuführen aufgrund von Fahrwiderständen während des Ausweichens nicht darstellbar. In den vorliegenden Betrachtungen ist daher, eine in der Simulation und Fahrversuchen bestätigte, mittlere Verzögerung von -1 m/s² während des Ausweichvorgangs angenommen worden.

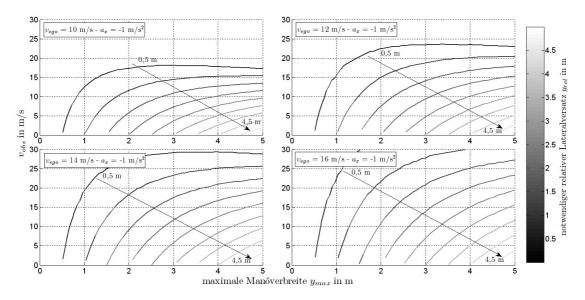


Abbildung 2-15 Maximaler Relativversatz y_{rel} in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Ausweichraums sowie der Geschwindigkeit des Hindernisobjektes v_{obs} , für exemplarische Fahrzeuggeschwindigkeiten v_{ego} .

Wie zu erwarten nimmt mit steigender Geschwindigkeit des Hindernisobjektes v_{obs} und geringer werdende maximale Manöverbreite y_{max} der maximal realisierbare Relativversatz y_{rel} ab. Ein Ausweichen in Bewegungsrichtung scheint somit ganz grundsätzlich nur für Szenarien mit einem relativ langsamen Hindernisobjekt und/oder einer sehr frühen Kollisionskonstellation, d.h. $s_{c,ego} > 0$, die lediglich einen geringen Versatz erfordern, in Frage zu kommen. Relativversätze $y_{rel} > 3$ m lassen sich dabei beinahe unabhängig von der Egogeschwindigkeit nur bei sich langsam bewegenden Hindernisobjekten realisieren.

2.3.1.2 Relativversatz entgegen der Bewegungsrichtung des Hindernisses

Auch bei einer zeitlichen Kollisionsvermeidung entgegen der Bewegungsrichtung gilt es den Relativversatz y_{rel} zu maximieren. Im Unterschied zum Ausweichen in Bewegungsrichtung wirken hier jedoch beide Summanden von Gleichung (2.10) gleichgerichtet. Sowohl der Versatz des Egofahrzeugs $y_{e,ego}$ als auch das spätere Eintreffen sorgen dafür, dass sich die Positionen beider Fahrzeuge in die gewünschte Richtung zueinander verlagern. Aus diesem Grund kann auf die Betrachtung, inwieweit überhaupt ein Relativversatz zwischen den beiden Beteiligten realisiert werden kann, an dieser Stelle verzichtet werden. Es gilt jedoch zu klären, durch welche Manöverausgestaltung

der streckenbezogene Relativversatz y_{rel} maximiert wird. Ein stark verzögertes Manöver führt tendenziell zu einer geringen räumlichen, dafür aber einer größeren zeitlichen Komponente und umgekehrt. Wie der Beschleunigungsvektor in diesem Fall zu wählen ist, hängt somit insbesondere von der Geschwindigkeit des Hindernisobjektes v_{obs} ab. Je schneller dieses, desto stärker wirkt sich die zeitliche Komponente auf den Relativversatz aus und je langsamer desto mehr muss der Versatz durch das Egofahrzeug selbst realisiert werden.

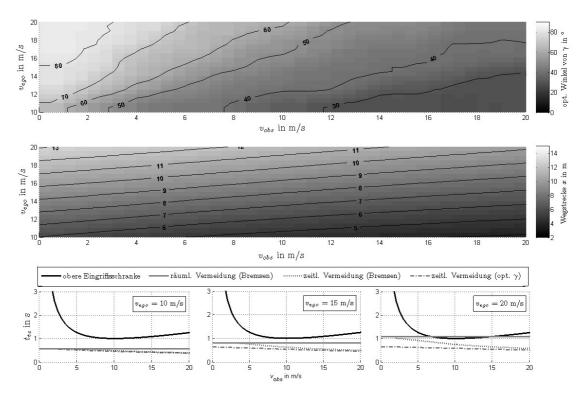


Abbildung 2-16 Beispiel für die optimale Wahl des Beschleunigungsvektors für ein Ausweichmanöver entgegen der Bewegungsrichtung des Hindernisobjektes in Abhängigkeit von v_{obs} für variierte v_{ego} ($y_{rel,soll}$: 2 m - KW: 90° - μ : 1)

Diese Zusammenhänge werden nochmals exemplarisch in Abbildung 2-16 für einen zu realisierenden Sollversatz von 2 m bei einem potentiellen Kollisionswinkel der beiden Fahrzeuge KW=90° sowie einem Kraftschlussbeiwert μ =1 verdeutlicht⁸⁸. Im oberen Diagramm der Abbildung ist für variierte Fahrzeuggeschwindigkeiten beider Beteiligter der, die Wegstrecke für die Realisierung des gewünschten Sollversatzes minimierende, Winkel γ des Beschleunigungsvektors, gemäß Gleichung (2.11)

$$\gamma = \arctan(\frac{a_y}{a_x}), \qquad (2.11)$$

unter Annahme einer optimalen Kraftschlussausnutzung, aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass wie zu erwarten mit größer werdendem Verhältnis v_{ego}/v_{obs} der optimale Wert für γ ebenfalls ansteigt. Aber selbst bei sehr hohen Hindernisgeschwindigkeiten besitzt das

⁸⁸ Die Daten beruhen auf dem in Kapitel 4.2 vorgestellten Modellansatz

optimale Manöver immer noch eine gewisse, wenn auch geringe Lateralkomponente. In der mittleren Abbildung sind die zugehörigen Wegstrecken in longitudinaler Richtung aufgetragen, die ebenfalls mit steigendem v_{ego}/v_{obs} ansteigen.

Die unteren Diagramme von Abbildung 2-16 zeigen für drei exemplarische Fahrzeuggeschwindigkeiten den aus unterschiedlichen Manövern entgegen der Bewegungsrichtung resultierenden Eingriffszeitpunkt in Abhängigkeit der Hindernisgeschwindigkeit in Bezug zur im vorherigen Kapitel hergeleiteten oberen Eingriffsschranke. Hierbei wird ersichtlich, dass bei dem hier angenommenen notwendigen Relativversatz yrel eine zeitliche Vermeidung entgegen der Bewegungsrichtung (dargestellt durch die gestrichelten Linien) insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten beider beteiligter Fahrzeuge ein zusätzliches Potential gegenüber der räumlichen Vermeidung besitzt, da auf diese Weise eine Vermeidung dann noch zu einem deutlich späteren Zeitpunkt möglich ist. Darüber hinaus zeigt sich auch der Vorteil eines vom Beschleunigungsvektor her optimierten Manövers gegenüber der reinen zeitlichen Vermeidung durch Bremsen bei niedrigen Geschwindigkeiten des Hindernisobjektes. Auch hier kann ein Eingriff noch später erfolgen. Es wird aber auch ersichtlich, dass ein zeitliches Ausweichen entgegen der Bewegungsrichtung, bei gegebener Kollisionskonstellation, lediglich bei sehr hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten einen Vorteil gegenüber einer räumlichen Vermeidung durch Bremsen, bei Berücksichtigung des zulässigen Eingriffszeitpunktes aufweist. In den meisten Fällen wäre die Kollision bereits durch ein räumlich vermeidendes Manöver zu verhindern.

2.3.2 Kollisionsfolgenlinderung

Für den Fall, dass eine Kollisionsvermeidung aufgrund des Annäherungsverhaltens der beiden Beteiligten, der räumlichen Gegebenheiten oder sonstiger Gründe, z.B. aufgrund von Gegenverkehr, nicht möglich sein sollte, ist es wünschenswert, zumindest die Folgen der dann unausweichlichen Kollision möglichst effektiv zu lindern.

Eine Linderung der Folgen einer Kollision lässt sich primär durch die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit erreichen. Daneben spielt insbesondere bei Seitenkollisionen aber auch die Trefferlage, d.h. der Kollisionspunkt eine entscheidende Rolle. So ist bei ansonsten identischen Randbedingungen davon auszugehen, dass eine Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle eines der Beteiligten, aufgrund von Intrusion und der deutlich geringeren Knautschzone, statistisch betrachtet zu höheren Verletzungsschweren führt als eine Kollision in weniger kritischen Bereichen des Fahrzeugs⁸⁹.

Wie im Stand der Technik gezeigt, findet dieser Aspekt bei der Auslegung von Systemen bisher kaum Berücksichtigung, so dass es abhängig von der Ausgangskonstellation dazu kommen kann, dass durch einen Bremseingriff zwar die Kollisionsgeschwindigkeit

⁸⁹ Vgl. z.B. Otte et al. (2000): Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen

reduziert, aber gleichzeitig die Trefferlage in eine ungünstigere Konstellation verschoben wird. Statt eine Situation zu entschärfen kann ein solches Vorgehen, zumindest für einige der Beteiligten dazu führen, dass diese durch den Eingriff sogar noch verschärft wird. 90

Aus diesem Grund sind in Kreuzungsszenarien beide Aspekte, d.h. die Kollisionsgeschwindigkeit und die Kollisionskonstellation, zu adressieren. Theoretisch erscheint eine Verlagerung des Kollisionspunktes entweder in Bereiche vor oder hinter der Fahrgastzelle in Bezug auf eine Linderung der Unfallfolgen zielführend, wie beispielhaft in Abbildung 2-17 dargestellt.

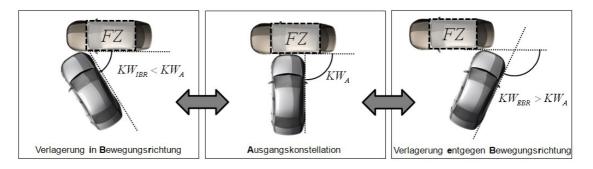


Abbildung 2-17 Möglichkeiten zur Verlagerung der Kollisionskonstellation außerhalb (vor/hinter) der Fahrgastzelle der beteiligten Fahrzeuge

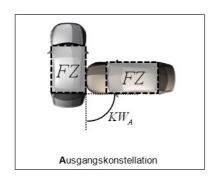
Bei der Kollisionskonstellation besitzt neben dem Stoßpunkt zusätzlich aber auch der Kollisionswinkel *KW* einen Einfluss auf die Unfallfolgen. Je geringer der Winkel zwischen den beiden Kollisionsobjekten desto eher ist gemäß der Zusammenhänge der Kollisionsmechanik zu erwarten, dass diese mehr aneinander abgleiten, und dadurch weniger kinetische Energie während des Kollisionsvorgangs abgebaut und somit die Fahrzeuginsassen weniger belastet werden.

Bei einer Verlagerung des Kollisionspunktes in Bereiche vor die Fahrgastzelle des Hindernisses wird durch die dafür ursächliche Lateralbewegung des Egofahrzeugs automatisch der Kollisionswinkel *KW* reduziert, während er umgekehrt bei einer Verlagerung in die hinteren Fahrzeugbereiche entsprechend größer wird. Aus diesem Grund erscheint es empfehlenswert, wenn möglich die Konstellation immer in Bewegungsrichtung zu verlagern. Eine Verlagerung auf den Fondbereich erscheint nur dann zielführend, wenn aufgrund der Fahrzeuggeschwindigkeiten ein Bereich vor der Fahrgastzelle nicht erreichbar ist.

Bis dato beschränken sich die Überlegungen auf die Fälle, in denen das Egofahrzeug das Hindernisobjekt seitlich trifft. Genauso wahrscheinlich sind jedoch auch die umgekehrten Konstellationen. Hier gilt es das Egofahrzeug maximal zu verzögern, um eine Kollision auf Höhe der eigenen Fahrgastzelle zu vermeiden (siehe Abbildung 2-18). Erst wenn durch die Verzögerung der Kollisionspunkt soweit nach hinten verlagert wird,

⁹⁰ Vgl. Stoff und Liers (2013): Ausweichfunktionalität für Kreuzungsszenarien, S. 183f

dass das Hindernisobjekt wiederum in die Fahrgastzelle getroffen werden würde, ist zusätzlich zu lenken.



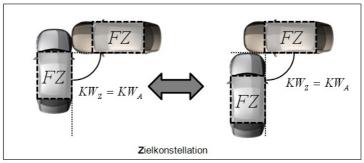


Abbildung 2-18 Verlagerung der Kollisionskonstellation weg von der Fahrgastzelle des Egofahrzeugs durch Verzögerung

Beide Aspekte, d.h. sowohl die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit als auch die Reduktion des Kollisionswinkels besitzen grundsätzlich einen positiven Effekt auf die statistisch zu erwartenden Kollisionsfolgen (Reduktion der Relativgeschwindigkeit zum Kollisionszeitpunkt)⁹¹. Welche der realisierbaren Kombinationen aus Geschwindigkeit und Winkel theoretisch die geringsten Kollisionsfolgen nach sich zieht, soll und kann an dieser Stelle aufgrund der großen Anzahl an weiteren Einflussfaktoren⁹² nicht abschließend beantwortet werden. Mit geringer werdenden Kollisionswinkeln, gleiten beide Kollisionsbeteiligten tendenziell mehr aneinander ab, was für die Primärkollision zwar grundsätzlich positiv zu beurteilen ist, die Vorhersage der Folgen des Kollisionsauslaufs in einem komplexen Kreuzungsszenario aber weiter erschwert und die Wahrscheinlichkeit für Sekundärkollisionen mit anderen Objekten oder Gegenständen erhöht. Im vorliegenden Ansatz wird eine parallele Lateralverlagerung somit erst dann initiiert, wenn durch alleinige Verzögerung eine Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle die Folge wäre, auch wenn ggf. ein weiteres Eindrehen des Egofahrzeugs die Kollisionsfolgen statistisch betrachtet weiter reduzieren würde.

Bei der Manöverauslegung gilt es somit unter der Randbedingung, den Kollisionspunkt außerhalb der Fahrastzelle zu legen, ein einseitiges Ausweichmanöver mit maximaler Längsverzögerung durchzuführen. Auf das bei der Kollisionsvermeidung zwingend notwendige Gegenlenken, um nicht von der Fahrbahn abzukommen und um potentiellen Gegenverkehr den Fahrstreifen möglichst schnell wieder frei zu geben, kann an dieser Stelle aufgrund der ohnehin stattfindenden Kollision verzichtet werden. Bei einem ausschließlich verzögerten Manöver wäre nach wie vor der Gegenfahrstreifen frei, und bei einem kombinierten Manöver würde der Gegenfahrstreifen auch im Falle des Gegenlenkens durch das Hindernisobjekt blockiert werden. Gegenlenken wäre darüber hinaus auch aus Sicht der Kollisionsfolgen kontraproduktiv, da dadurch der Kollisions-

.

⁹¹ Tomasch (2004): Accident Reconstruction Guidelines, S.101f

 $^{^{92}}$ z.B. genaue Treffer
position, Fahrzeugabmessungen, –massen und -steifigkeiten, etc...

winkel wieder vergrößert werden würde. Außerdem müsste um den gleichen Zielversatz, d.h. den gleichen Kollisionspunkt, zu realisieren, bei Berücksichtigung eines Gegenlenkens zu Beginn des Manövers stärker eingelenkt werden, mit entsprechenden Einbußen beim Verzögerungspotential.

2.3.3 Fahrerverhalten und Folgen für Systemauslegung

Den bisherigen Überlegungen liegt die Annahme zugrunde, dass sich das Hindernisfahrzeug auch zukünftig entsprechend der vorliegenden Informationen verhält, oder anders ausgedrückt, keine Änderungen des Fahrerverhaltens des Hindernisses infolge der Annäherung zur Kollision erfolgen.

In Kapitel 2.2.2.1 ist bereits gezeigt worden, dass diese Annahme für den Längsverkehr durchaus plausibel, für Kreuzungsszenarien jedoch zu verwerfen ist. Aus Sicht einer aktiven Schutzfunktionalität im Egofahrzeug ist immer damit zu rechnen, dass das Hindernisobjekt noch reagieren wird.

Eine solche Reaktion des Hindernisfahrzeugs ist dann als unkritisch zu beurteilen, wenn sie so frühzeitig erfolgt, dass sie über die maschinelle Umfeldsensorik erfasst und entsprechend bei der Maßnahmenplanung berücksichtigt werden kann. Problematischer stellt es sich jedoch dar, wenn die Reaktion erst nach einer potentiellen Manöverinitiierung im Egofahrzeug stattfindet, da dieses dann aufgrund des hochdynamischen Manövers, nur noch sehr eingeschränkt auf die Verhaltensänderung reagieren kann.

Die Analyse der im Rahmen des Verbundprojektes Ko-KOMP⁹³ untersuchten Realunfälle hat ergeben, dass in knapp 40 % aller dort betrachteten Fälle das Hindernis selbst noch sehr kurz vor, d.h. innerhalb der letzten Sekunde vor der Kollision eine Bremsreaktion gezeigt hat. In wenigen Fällen konnte auch ein versuchtes Ausweichen oder Beschleunigen beobachtet werden.

Neben der relativen Häufigkeit eines Bremseingriffs des Hindernisses (intuitives Fahrerverhalten in einer kritischen Situation) haben diese Eingriffe in den untersuchten Fällen, aufgrund des im Vergleich zum Beschleunigungspotentials größeren Verzögerungspotentials, auch den größten Einfluss auf die realisierte Trajektorie⁹⁴. Die geringe Anzahl an beobachteten positiven Beschleunigungen besaß hingegen, infolge der im innerstädtischen Verkehr üblichen Kombinationen aus Geschwindigkeit und Gangwahl und dem daraus resultierenden geringem Beschleunigungspotential kaum Einfluss. In keinem Fall wurde eine Abweichung von der zum potentiellen Eingriffszeitpunkt prädizierten Trajektorie > 0,3 m beobachtet. Einen Überblick über die Häufigkeit sowie

-

⁹³ Vgl. Stoff et al. (2014) Ko-Fas – Abschlussbericht, S.21f

⁹⁴ Beispiel: Unter der Annahme eines Systemeingriffs eine Sekunde vor einer potentiellen Kollision, und einem Kraftschlussbeiwert von μ =1 verursacht eine Vollbremsung kurz nach Manöverinitiierung eine Veränderung in der prädizierten Trajektorie des Hindernisses von ca. 5 m.

deren Folgen auf die prädizierte Position zum potentiellen Kollisionszeitpunkt gibt die nachfolgende Abbildung 2-19.

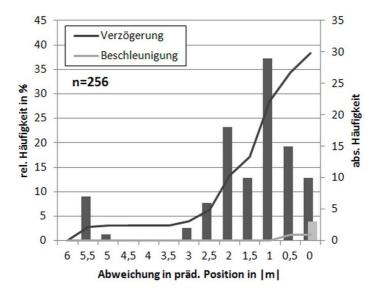


Abbildung 2-19 Einfluss und Häufigkeit einer Reaktion des Fahrers des Hindernisobjektes auf die Annäherung innerhalb der letzten Sekunde vor der Kollision mit dem Egofahrzeug

2.3.3.1 Kollisionsvermeidung

Betrachtet man die Folgen dieser Zusammenhänge in Bezug auf die zuvor diskutierten Eingriffsalternativen zur Kollisionsvermeidung, so zeigt sich, dass eine Verzögerung des Hindernisfahrzeugs dazu führt, dass sich dieses zum Zeitpunkt des Eintreffens des Egofahrzeugs am prädizierten Kollisionsbereich in Bezug auf das Egofahrzeug noch weiter entgegen dessen Bewegungsrichtung befindet. Für ein initiiertes Ausweichmanöver in Bewegungsrichtung des Hindernisses besitzt dies, außer einem zusätzlichen Puffer zum Hindernis, keine Folgen.

Problematischer ist dieser Umstand bei einem Ausweichen entgegen der Bewegungsrichtung zu beurteilen. Je nach Auslegung des Manövers, d.h. je nach gewähltem Puffer zwischen den beiden Fahrzeugen zum Zeitpunkt des geringsten Abstandes, ist der realisierte Versatz schlicht nicht groß genug, um hinter dem Hindernis passieren zu können. Führt man sich nochmals Abbildung 2-19 vor Augen, wird ersichtlich, dass in ca. 25 % aller untersuchten Fälle eine Abweichung von der prädizierten Position in einer Größenordnung von 1 bis zu 3 m die Folge ist. Diese Fälle würden bei einem Ausweichmanöver entgegen der Bewegungsrichtung mit hoher Wahrscheinlichkeit genau zu der Konstellation führen, die vermieden werden sollte - einer Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle des Hindernisobjektes.

2.3.3.2 Kollisionsfolgenlinderung

Ähnlich stellt sich die Situation bei den die Kollisionsfolgen lindernden Manövern dar. Auch hier besteht bei einem Bremsen bzw. Ausweichen auf den Bereich des Fonds des

Hindernisobjektes die Gefahr, statt des gewünschten, jetzt einen weiter vorne befindlichen Bereich wie beispielsweise die Fahrgastzelle zu treffen. Eine Anpassung des Manövers während dessen Durchführung ist zwar grundsätzlich denkbar, je früher und stärker das Hindernis bremst, desto mehr des verfügbaren Kraftschlusspotentials ist seitens des Egofahrzeugs in Querkraft umzusetzen, doch wird durch dieses Vorgehen der Kollisionswinkel weiter vergrößert und nähert sich mehr einer Frontalkollision. Darüber hinaus kann auch weniger kinetische Energie abgebaut werden, wodurch statistisch betrachtet mit schwereren Unfallfolgen zu rechnen ist. Aus diesem Grund ist von einem solchen Manöver ebenfalls Abstand zu nehmen.

Bei einem die Kollisionsfolgen lindernden Manöver in Bewegungsrichtung des Hindernisses ist das Ganze wiederum positiver zu beurteilen. Je nach Eingriffsintensität des Hindernisobjektes kann durch dieses "ungeplante kooperative Verhalten" die Kollision gegebenenfalls sogar ganz verhindert werden. Die beiden Fahrzeuge würden voreinander passieren. Im ungünstigsten Fall könnte der Bremseingriff im Hindernisobjekt jedoch dazu führen, dass das Egofahrzeug vor dem Hindernis "durchrutscht" und dann auf Höhe der eigenen Fahrgastzelle durch das Hindernis getroffen wird. Je nach Manöverausgestaltung in der Ausgangssituation, kann auf diese Konstellation, sofern nicht bereits vollverzögert wird, durch Anpassung des Eingriffs über einen größeren Verzögerungsanteil reagiert werden. Sollte auf diese Weise eine ungünstige Trefferlage nicht vermieden werden können, so wird zumindest die Kollisionsgeschwindigkeit des Egofahrzeugs minimiert.

2.4 Zwischenfazit

In den vorherigen Abschnitten wurde gezeigt, dass aufgrund der räumlichen und verkehrsrechtlichen Gegebenheiten eines Kreuzungsszenarios sowie den notwendigerweise zu berücksichtigenden möglichen Handlungen der Beteiligten für einen Kreuzungsassistenten für den vorrangingen Verkehrsteilnehmer nicht alle grundsätzlich denkbaren Eingriffsalternativen zur Vermeidung einer Kollision in Frage kommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2-20 nochmals grafisch zusammengefasst. Für den Fall, dass eine potentielle Kollision prädiziert wird, und das Hindernisobjekt nicht mehr in der Lage ist, die Kollision eigenständig zu vermeiden, verbleiben, je nachdem ob zu diesem Zeitpunkt $t_{b,ego}$ noch größer oder bereits kleiner null ist, entweder ein die Kollision räumlich vermeidendes Notbremsmanöver $CA_{b,r}$ oder aber ein zeitlich die Kollision vermeidendes Ausweichmanöver in Bewegungsrichtung des Hindernisses $CA_{e,ibr,z}$.

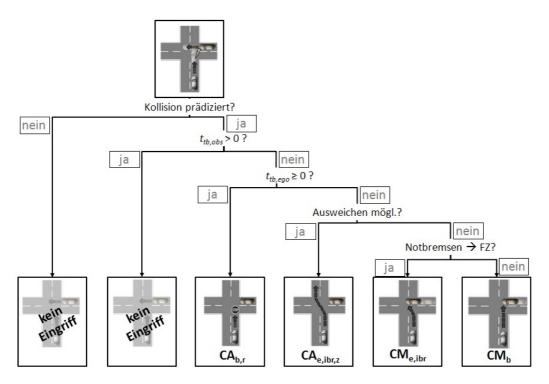


Abbildung 2-20 Ableitung der der verbleibenden Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung bzw. Kollisionsfolgenlinderung in Kreuzungsszenarien

Für den Fall, dass eine Kollision nicht mehr zu vermeiden ist, kommt je nach prädizierter Trefferlage entweder eine kollisionsfolgenlindernde Notbremsung CM_b oder aber, falls durch das Bremsmanöver die Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle eines der beiden Beteiligten verlagert werden würde, ein kombiniertes, wiederum in Bewegungsrichtung des Kollisionsobjektes ausgeführtes, kombiniertes Brems-/Ausweichmanöver CM_{e,ibr} in Frage. Die unterschiedlichen Bewegungsrichtungen der beiden Beteiligten, erfordern abhängig von der jeweiligen Konstellation, verglichen mit Längsverkehrsszenarien, teilweise deutlich größere Querablagen, um eine Kollision durch Ausweichen zu vermeiden. Nicht immer wird der verfügbare Ausweichraum ausreichen, um das Egofahrzeug erst bei Passieren des potentiellen Kollisionsobjektes wieder auf den Fahrbahnverlauf zurückzuführen. Aus diesem Grund wird der Aspekt des Gegenlenkens bereits im Rahmen der Situationsanalyse deutlich stärker in den Fokus rücken, als dies in Längsverkehrsszenarien notwendig ist.

Es ist ebenfalls gezeigt worden, dass eine Übertragung des aus dem Längsverkehr bekannten, die streckenbezogene Querablage maximierenden kombinierten Brems-/Ausweichmanövers auf die hier vorliegenden Szenarien nicht empfehlenswert ist. Selbst bei ausreichender Ausweichbreite wird die auf diese Weise zusätzlich generierbare Querablage durch die mit dem Manöver verbundene Verzögerung selbst bei sehr geringer Geschwindigkeit des Hindernisobjektes überkompensiert. Ein in diesen Szenarien "optimales" Manöver sollte bei möglichst konstanter Geschwindigkeit und maximaler Querbeschleunigung den verfügbaren Ausweichraum so weit wie möglich ausnutzen, um auf diese Weise die Relativablage in Bezug auf das Hindernisobjekt zu maximieren.

3 Maschinelle Umfelderfassung

Voraussetzung für die Realisierung einer hier untersuchten Schutzfunktionalität ist die maschinelle Wahrnehmung des Fahrzeugumfeldes. Gegenstand des folgenden Kapitels ist die systematische Ableitung der aus der Funktionalität folgenden Anforderungen an die maschinelle Umfelderfassung sowie die Bewertung deren Realisierbarkeit anhand des aktuellen Stands der Technik und Forschung auf diesem Gebiet. Zu den hier diskutierten Anforderungen zählen zum einen die mit dem notwendigen Abdeckungsbereich einhergehenden Sensorreichweiten, aber auch die zur sicheren Ausgestaltung und Durchführung des Notmanövers notwendigen Informationen zur Beschreibung des Fahrzeugumfeldes. Ziel ist die Bewertung der Umsetzbarkeit der hier diskutierten Schutzfunktionalität aus Sicht der maschinellen Umfelderfassung auf Basis der folgenden Untersuchungshypothese.

H 2. Die Bereitstellung der notwendigen Umfeldinformationen zur sicheren Planung und Umsetzung einer Schutzfunktionalität für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer, die eingreift, sobald ein potentielles Hindernisobjekt die Kollision nicht mehr eigenständig vermeiden kann, ist mit dem Stand der Technik und Forschung der maschinellen Umfelderfassung unabhängig vom vorliegenden Szenario darstellbar.

3.1 Anforderungen

Voraussetzung für die Realisierung der diskutierten, aktiven Schutzfunktionalität an Kreuzungen für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer ist die rechtzeitige, zuverlässige und präzise Erfassung des, die Situation beschreibenden, Verkehrsumfelds, d.h. sowohl des stationären Umfelds als auch aller relevanten dynamischen Objekte.

3.1.1 Informationsbedarf

Grundlage des vorliegenden Schutzkonzeptes ist die Erfassung der am jeweiligen Knotenpunkt geltenden Verkehrsregelungen, wobei diese statisch, durch Verkehrszeichen bzw. Rechts-vor-Links oder dynamisch durch Lichtzeichenanlagen (LZA) geregelt sein kann. Je nach Situation, d.h. je nachdem, ob der Beteiligte in der aktuellen Situation wartepflichtig oder vorfahrtberechtigt ist, ergeben sich grundsätzlich unterschiedliche Handlungsalternativen.⁹⁵

-

⁹⁵ Vgl. Kapitel 1.2

Hierauf aufbauend bedarf die Identifikation einer kritischen Situation der sicheren Erfassung des potentiellen Primärhindernisses. Für eine verlässliche Kritikalitätsanalyse werden hierzu Informationen über die Relativposition des Hindernisses in Bezug zum eigenen Fahrzeug, aber auch die zusätzlich einer Trajektorienprädiktion und Trajektorienplanung zugrundeliegenden Informationen wie aktuelle Geschwindigkeit, Kursbzw. Gierwinkel und Kurs- bzw. Gierrate, sowie die Längs- und Querbeschleunigungen, aber auch die Konturen des Objektes benötigt.

Die Planung möglicher Handlungsalternativen und damit die eigentliche Eingriffsentscheidung hängen primär vom verfügbaren Ausweichraum in einer vorliegenden Situation ab. Voraussetzung zur Bestimmung dieses ist die zuverlässige Detektion des vorausbefindlichen Straßenverlaufs einschließlich des Fahrbahnrandes sowie vorhandener Fahrstreifenmarkierungen. Bei den hier notwendigen Informationen handelt es sich aber auch um die Erfassung sonstiger stationärer Objekte, wie z.B. in die Fahrbahn hineinragende parkende Fahrzeuge, die direkt den befahrbaren Bereich einschränken. Darüber hinaus ist zur optimalen Auslegung der Ausweichtrajektorie die Kenntnis über den aktuellen sowie vorausbefindlichen Straßenzustand, d.h. insbesondere des vorliegenden maximalen Kraftschlussbeiwertes Fahrbahn-Reifen μ_{max} , erforderlich.

Aufgrund der Gegebenheiten, eines sich je nach Kreuzungswinkel ϕ_k mehr oder weniger senkrecht zum Egofahrzeug bewegenden Hindernisobjektes sowie der unterschiedlichen potentiellen Kollisionskonstellationen kann es je nach Einzelfall für ein kollisionsvermeidendes Ausweichen notwendig sein, den eigenen Fahrstreifen verlassen zu müssen. Dies macht es zusätzlich notwendig, zuverlässig Informationen über potentiellen Gegenverkehr, oder im Fall mehrerer Richtungsfahrstreifen über ggf. mit höherer Geschwindigkeit nachfolgenden Richtungsverkehr zu erhalten.

Während in Längsverkehrsszenarien in der Regel direkter Sichtkontakt zum Primärhindernis besteht, liegt bei Kreuzungsszenarien als Besonderheit sehr häufig eine Sichtverdeckung durch Häuser, Zäune, Bäume, Sträucher, parkende Fahrzeuge oder ähnliches während der Annäherung vor, so dass Hindernisse in einem solchen Szenario erst kurz vor einer potentiellen Kollision zum ersten Mal gesehen werden können, was entsprechend deren Erfassung erschwert.

3.1.2 Sensorreichweite und Öffnungswinkel

Die Anforderungen an die Sensorreichweite lassen sich auf Grundlage der Annäherungsgeschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge, dem damit verbundenen minimalen Bremsweg des Egofahrzeugs sowie der Knotenpunktgeometrie, d.h. dem Kreuzungswinkel ϕ_k , ableiten.

Für das Egofahrzeug wird dabei als Auslegungsgeschwindigkeit eine an die Verkehrsregelungen angelehnte max. Fahrzeuggeschwindigkeit von 60 km/h angenommen. Dies entspricht der üblichen Höchstgeschwindigkeit auf innerstädtischen Straßen von

50 km/h zuzüglich eines Sicherheitspuffers von 20 % zur Berücksichtigung des realen Fahrverhaltens. Für das Primärhindernis und den potentiellen Gegenverkehr ist eine Obergrenze für die Annäherungsgeschwindigkeit aus den Verkehrsregeln schwerlich bestimmbar, da für diese nicht zwingend davon ausgegangen werden kann, dass sie die Verkehrsregeln einhalten. Einen alternativen Zugang zu dieser Problematik bietet das reale Unfallgeschehen. Die nachfolgende Auswertung der Kreuzungskollisionen der GIDAS-Datenbank zeigt, dass 95,5% aller wartepflichtigen Kollisionsbeteiligten eine Kollisionsgeschwindigkeit unter 60 km/h und sogar 98,5 % eine unter 70 km/h aufweisen. Um einerseits die Anforderungen an die maschinelle Umfelderfassung nicht zu sehr von wenigen Extremfällen abhängig zu machen, andererseits aber auch einen möglichst großen Anteils an Kreuzungsszenarien abdecken zu können, wird für die weiteren Betrachtungen von einem Wert für $v_{obs.max} = 70$ km/h ausgegangen.

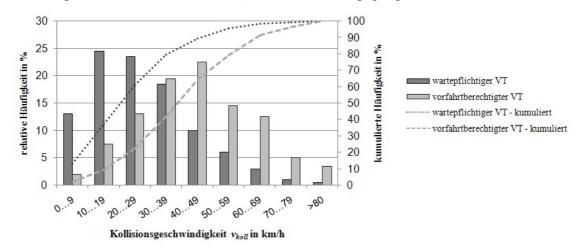


Abbildung 3-1Kollisionsgeschwindigkeiten in Kreuzungsunfällen differenziert nach wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer (Verursacher) und vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer (anderer Beteiligter) – Quelle: GIDAS⁹⁶

Zusätzlich zu den infolge der Fahrzeuggeschwindigkeiten zurückgelegten Wegstrecken ist bei der Bestimmung der notwendigen Sensorreichweite eine Detektionszeit Δt_D , die den Zeitraum von der erstmaligen Erfassung bis zur sicheren Identifikation als reales relevantes Objekt beschreibt, zu berücksichtigen, für die ein Wert von 0,25 s angenommen wird.

Die resultierende notwendige Reichweite der maschinellen Umfelderfassung s_{mU} ergibt sich somit aus zwei Komponenten. Einerseits aus dem Abstand von Egofahrzeug zu Kollisionsbereich zum erstmöglichen Eingriffszeitpunkt zuzüglich der von der Detektionszeit Δt_D abhängigen Wegstrecke (s_{ego}) und andererseits aus der im gleichen Zeitraum zurückgelegten Wegstrecke des Hindernisobjektes s_{obs} . Diese beiden Wegstrecken werden je nach Kreuzungswinkels ϕ_K über den Zusammenhang des Cosinussatzes zu

$$s_{mU} = \sqrt{s_{ego}^2 + s_{obs}^2 - 2 \cdot s_{ego} \cdot s_{obs} \cdot \cos(\phi_K)}$$
(3.1)

⁹⁶ Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH (2013): Data Analysis Real Accidents

miteinander verknüpft.

Wie im vorherigen Kapitel hergeleitet, wird, wenn möglich, eine Kollision räumlich durch ein Notbremsmanöver vermieden. Ein Ausweichen kommt erst dann in Frage, wenn eine räumliche Vermeidung nicht mehr sicher darstellbar ist. Hieraus folgt, dass der maximale Abstand des Egofahrzeugs zum Kollisionsbereich zum erstmöglichen Eingriffszeitpunkt dem minimalen Bremsweg bei Auslegungsgeschwindigkeit entspricht. Zusammen mit Δt_D ergibt sich s_{ego} somit zu

$$s_{ego} = \frac{v_{ego,\text{max}}^2}{2 \cdot a_{\text{max}}} + \Delta t_D \cdot v_{ego,\text{max}}.$$
 (3.2)

Die für das Hindernisobjekt relevante Wegstrecke s_{obs} folgt, unter der Annahme, dass sich das Egofahrzeug, in der zur Kollision führenden Ausgangskonstellation, mit konstanter Geschwindigkeit v_{ego} bewegt, zu

$$s_{obs} = \frac{s_{ego}}{v_{ego,\text{max}}} \cdot v_{obs,\text{max}} = \left(\frac{v_{ego,\text{max}}}{2 \cdot a_{\text{max}}} + \Delta t_d\right) \cdot v_{obs,\text{max}}.$$
 (3.3)

Wie der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen ist, ergeben sich daraus, abhängig vom Kreuzungswinkel ϕ_K , für einen konservativ abgeschätzten Kraftschlussbeiwert $\mu = 0,7$ notwendige Sensorreichweiten von bis zu 46 m.

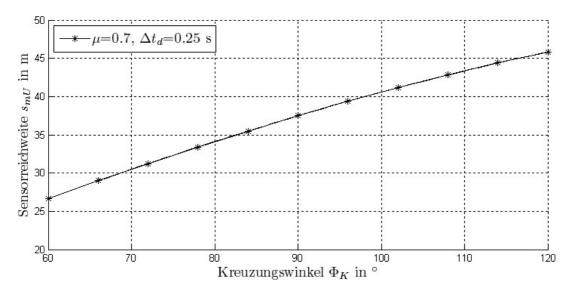


Abbildung 3-2 Abschätzung der notwendigen Sensorreichweiten in Abhängigkeit des Kreuzungswinkels sowie angenommenem v_{ego} = 60 km/h und v_{obs} = 70 km/h sowie μ_{max} = 0,7 und Δt_D = 0.25 s

Ist bei einem Ausweichmanöver darüber hinaus potentieller Gegenverkehr zu beachten, so ist bei der Berechnung der notwendigen Sensorreichweite die vollständige Manöverlänge vom Beginn des Ausscherens über das Passieren des Hindernisses bis zum Wiederverlassen des Gegenfahrstreifens zu betrachten. Aus dem in Kapitel 4 folgenden Modellansatz (Vgl. auch z.B. Abbildung 2-12) ergibt sich für die Auslegungsgeschwindigkeit von 60 km/h sowie einem Kraftschlussbeiwert von 0,7 eine, der folgenden Abbildung 3-3 (links) zu entnehmende, vom zu realisierenden Querversatz $y_{e,ego}$ abhängige

Manöverlänge von bis zu ca. 35 m sowie einer Manöverdauer von maximal ca. 2,2 s zum Erreichen der Zielquerablage. Für den schlechtesten aller Fälle kann davon ausgegangen werden, dass die maximale Querablage exakt zum Zeitpunkt des Passierens des Hindernisobjektes erreicht wird. Unter den vereinfachenden Annahmen, dass das Zurückführen auf den eigenen Fahrstreifen in etwa dieselbe Wegstrecke in Anspruch nimmt, und die Geschwindigkeitsreduktion während des Manövers vernachlässigt wird, führt dies wiederum zu einer Gesamtmanöverdauer t_M von maximal ca. 4,4 s und einer Wegstrecke $s_{ego,GV}$ von ca. 70 m.

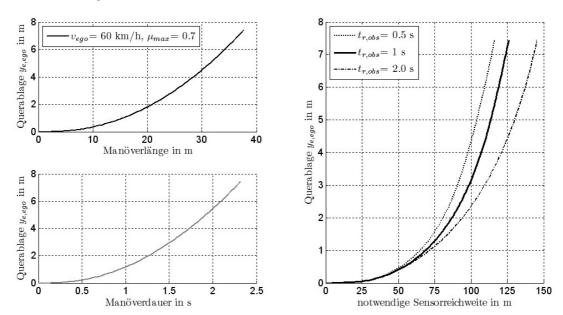


Abbildung 3-3 Notwendige Manöverlängen zur Realisierung einer definierten Querablage und daraus abgeleitete Anforderungen an die Sensorreichweite zur Absicherung eines entsprechenden Ausweichmanövers für v_{ego} =60 km/h, v_{obs} =70 km/h sowie μ =0,7 und verschiedene $t_{r,obs}$

Bei der Berechnung der notwendigen Sensorreichweite ist neben der Wegstrecke des Egofahrzeugs $s_{ego,GV}$ während des Ausweichens zusätzlich diejenige des potentiellen Gegenverkehrs s_{GV} im selben Zeitraum zu berücksichtigen. Für den Gegenverkehr wird davon ausgegangen, dass dessen Fahrer auf das ausweichende Egofahrzeug ebenfalls mit Kollisionsvermeidungsmaßnahmen reagieren wird, wenn er dieses in seinem Fahrstreifen wahrnimmt. Zur Abschätzung der erforderlichen Sensorleistungsfähigkeit wird dabei die Annahme getroffen, dass es sich bei der Reaktion des Gegenverkehrs um eine Vollbremsung mit $a_{x,GV} = -\mu_{max} \cdot g$ handelt, mit dem Ziel, die Zeitlücke zwischen den beiden Fahrzeugen zu maximieren.

In Abhängigkeit der Reaktionszeit des Gegenverkehrs $t_{r,GV}$ sowie der Manöverdauer des Egofahrzeugs t_M gilt es dabei zwei Fälle zur Berechnung von s_{GV} zu unterscheiden.

Fall 1:
$$t_M - t_{r,GV} \ge \frac{v_{GV}}{\left|a_{x,GV}\right|}$$
 (Gegenverkehr kommt zum Stillstand)
$$s_{GV} = v_{GV} \cdot t_{r,GV} + \frac{v_{GV}^2}{2 \cdot \left|a_{x,GV}\right|}$$
(3.4)

Fall 2:
$$0 < t_M - t_{r,GV} < \frac{v_{GV}}{\left|a_{x,GV}\right|}$$
 (Gegenverkehr kommt nicht zum Stillstand)
$$s_{GV} = v_{GV} \cdot t_M + \frac{1}{2} \cdot a_{x,GV} \cdot (t_M - t_{r,GV})^2 \tag{3.5}$$

Die notwendige Erfassungsreichweite ergibt sich nun aus der Summe von $s_{ego,GV}$ und s_{GV} (siehe Abbildung 3-3 - rechts). Bei einer angenommenen Reaktionszeit des Gegenverkehrs $t_{r,GV}$ von 1 s, beträgt die notwendige Vorausschauweite, zur Absicherung eines Ausweichmanövers über den Fahrstreifen des potentiellen Gegenverkehrs, bereits bei mittleren Querablagen von 3 m rund 100 m und für ein Querablage entsprechend des aus dem Straßenprofil folgenden Maximums von 7,5 m sogar rund 125 m. Der Einfluss einer Variation der Reaktionszeit des Gegenverkehrs ist ebenfalls Abbildung 3-3(rechts) zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass selbst bei einer optimistisch geschätzten Reaktionszeit von 0,5 s die Anforderungen an die Sensorreichweite um lediglich rund 8 % geringer ausfallen. Auch bei einer eher pessimistischen Abschätzung von 2 s würden die Anforderungen jedoch lediglich um rund 15 % steigern. Ein großer Anteil der notwendigen Anforderungen ergibt sich bereits aus der durch das Egofahrzeug zurückzulegenden Wegstrecke von bis zu 70 m.

Der erforderliche Abdeckungsbereich der maschinellen Umfelderfassung ergibt sich wiederum direkt aus den adressierten Kreuzungswinkeln ϕ_k im Bereich von 60 – 120 °, zuzüglich einer Überwachung des nachrangigen Verkehrsraums. In Summe ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer Rundum-Überwachung mit einer winkelabhängigen Reichweite für den vorausbefindlichen Straßenverlauf abhängig von der Querablage und der Reaktionszeit des potentiellen Gegenverkehrs auf das ausweichende Egofahrzeug von bis zu 125 m und für den seitlichen Bereich von rund 46 m zur Absicherung der zugrundeliegenden Funktionalität.

3.2 Bewertung anhand Stand der Technik

3.2.1 Sensorreichweite und Öffnungswinkel

Nachdem die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der maschinellen Umfelderfassung für einen Kreuzungsassistenten für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer im vorherigen Abschnitt hergeleitet worden sind, folgt nun eine Bewertung deren Realisierbarkeit anhand des Stands der Technik.

Im Automobilbereich existiert eine Vielzahl von Umfeldsensoren. So finden Ultraschall-Sensoren beispielsweise bei Einparkhilfen Verwendung. Deren Funktionsbereich beschränkt sich jedoch auf einige wenige Meter⁹⁷, so dass sie für die vorliegende Funktionalität nicht in Frage kommt. Für die Erfassung von Objekten in größerer Entfernung,

⁹⁷ Noll und Rapps (2012): Ultraschallsensorik, S. 110–122

wie sie beispielsweise für Adaptive Cruise Control (ACC) oder Notbremsassistenten (NBA) notwendig ist, wird häufig Radar verwendet. Der Vorteil dieses Messprinzips liegt in seiner hohen Zuverlässigkeit und Unempfindlichkeit gegenüber widrigen Wetterverhältnissen, sowie seiner großen Toleranz in Bezug auf Verschmutzung. Radar ist in der Lage, direkt den Abstand sowie über den Dopplereffekt die Relativgeschwindigkeit in radialer Richtung zwischen dem Sensor und einem Objekt zu messen⁹⁸. Es hat dafür aber Probleme die Fahrzeugkontur aufzulösen, so dass die tatsächliche Fahrzeugposition nur Näherungsweise bestimmt werden kann. Ein für ähnliche Anwendungen Verwendung findendes Prinzip ist Lidar, das zwar in Bezug auf den oben genannten Aspekt der Wetterunempfindlichkeit Nachteile besitzt, dafür aber in der Ausführungsform als Scanner die Konturen von Objekten besser erfassen kann⁹⁹. Lidar erlaubt die direkte Messung der Abstände. Prinzipiell wäre auch die Messung der Relativgeschwindigkeit über den Dopplereffekt möglich. Dies ist jedoch aufgrund des höheren Frequenzbereichs, verglichen mit Radar, technisch aufwändiger und somit mit höheren Kosten verbunden, so dass bei Automobilanwendung darauf verzichtet wird. Aus diesem Grund können Relativgeschwindigkeit und Relativbeschleunigung lediglich über die Signaldifferentiation bestimmt werden. 100 Darüber hinaus erlauben die Reflexionseigenschaften der in die Fahrstreifenmarkierungen eingebrachten retroreflektierenden Glasperlen auch die Detektion dieser Markierungen mittels Lidar-Technologie. ¹⁰¹

Einen mittlerweile sehr breiten Anwendungsbereich finden Kameras (Mono und Stereo). Neben der grundsätzlichen Objekterkennung und Objektklassifizierung können durch die Auswertung der Rohdaten auch Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen bzw. Lichtsignalanlagen detektiert werden. Reichweite und Öffnungswinkel sind bei diesem Prinzip vom verwendeten Objektiv abhängig, während ansonsten Grenzen aufgrund des verwendeten bildgebenden Elements und der Bewegungsschärfe bei endlicher Verschlusszeit bestehen.¹⁰²

Einen Überblick über die Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Informationsbereitstellung, sowie die realisierbaren Reichweiten und Öffnungswinkel ist in der nachfolgenden Tabelle 3-1 aufgezeigt.

⁹⁸ Winner (2012): Radarsensorik, S.145f

⁹⁹ Ibeo Automotive (2013): ibeo Lux (2010) Manual

¹⁰⁰ Geduld (2012): Lidarsensorik, S.178f

¹⁰¹ Homm et al.: Lidarbasierte Fahrstreifen- und Randbebauungserkennung

¹⁰² Vgl. z.B. Stiller et al. (2012): Maschinelles Sehen, S. 198–222

Tabelle 3-1 Überblick über die Leistungsfähigkeit der in der Automobilindustrie relevanten Umfeldsensoren (angelehnt an Stiller (2012)¹⁰³)

		Radar	Lidar	Kamera	Ultraschall
Primäre Messung	Position	+	+	-	+
	Geschwindigkeit	+	-	-	-
	Helligkeitsmuster	-	+	+	-
Detektion von	Objekt	+	+	+	+
	Fußgänger/Fahrradfahrer	(+)	+	+	+
	Fahrbahnmarkierung	-	(+)	+	-
	Bordsteine	-	+	+	+
	Verkehrszeichen	-	-	+	-
	Lichtsignalanlage	-	-	+	-
Kennwerte existierender Ausführungen ¹⁰⁴					
Reichweite in m:		SR: 60 MR: 100 LR: 250	200	80	3
Azimut in °:		SR: 120 MR: 60 LR: 20	110	50	120
Elevation in °:		SR: 13 LR: 4	3	20	70

Eine natürliche Grenze dieser auch als fahrzeugautark bezeichneten Sensoren ist deren Abhängigkeit von der direkten Sichtverbindung wie sie auch für das menschliche Auge gilt. Gerade bei den hier diskutierten Kreuzungsszenarien kommt es jedoch sehr häufig, z.B. aufgrund von Bebauung, Bäumen, Sträuchern oder parkenden Fahrzeugen, zu Sichtverdeckungen¹⁰⁵, so dass die bis dato genannten Sensorsysteme dort Prinzip bedingt an ihre Grenzen stoßen. Abbildung 3-4 ist hierzu, für die im Rahmen des Koope-

¹⁰³ Stiller et al. (2012): Maschinelles Sehen, S.220

Radar: Winner (2012): Radarsensorik, S1.152 ff., TRW Automotive (2013): Datenblatt - AC100 Mittelbereichsradar, Continental AG (2012): Datenblatt - SRR 2xx; Lidar: Ibeo Automotive (2013): Datenblatt ibeo LUX; Kamera: Continental AG (2009): Datenblatt - MFC 2 Kamera, TRW Automotive (2013): Datenblatt - Skalierbare Kamera-Familie; Ultraschall: Noll und Rapps (2012): Ultraschallsensorik, S.122,

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

rationsprojektes Ko-KOMP untersuchten Kreuzungskollisionen, die Zeitdifferenz zwischen dem nach Kapitel 2 hergeleiteten zulässigen Eingriffszeitpunkt und dem ersten Sichtkontakt in ihrer kumulierten Häufigkeit zu entnehmen. In ca. 60 % aller untersuchten Einzelfälle gab es grundsätzlich eine Sichtbehinderung während der Annäherung an die Kreuzung. In fast 10 % aller Einzelfälle bestand dabei zum Zeitpunkt des zulässigen Zeitpunktes des Systemeingriffs noch kein direkter Sichtkontakt zwischen den beiden Beteiligten. Für die hier angenommene Zeitdauer zur sicheren Detektion eines Objektes Δt_D von 0,25 s, vergrößert sich dieser Anteil auf ca. 25 %. Zumindest dieser Anteil an Szenarien könnte, aufgrund der zu späten Detektion, durch eine ausschließlich auf fahrzeugautarker Sensorik beruhenden maschinellen Umfelderfassung nicht optimal, d.h. lediglich mit geringerer Wirksamkeit, adressiert werden.

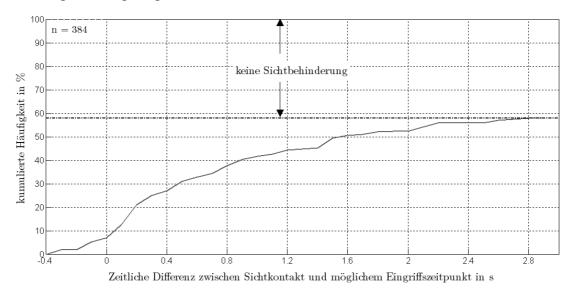


Abbildung 3-4 Kumulierte Häufigkeit des zeitlichen Abstands zwischen erstem Sichtkontakt und möglichem Eingriffszeitpunkt für 384 repräsentative Kreuzungsunfälle

Diese Problematik lässt sich zum Teil mit der in Entwicklung befindlichen Fahrzeug-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation adressieren. Zwar ist der Effekt der Signalbeugung bei dem für Fahrzeugkommunikationsanwendungen Verwendung findenden Frequenzbereich von 5,9 GHz nicht sonderlich stark ausgeprägt, aber dennoch ist durch Signalbeugung und Reflexion ein gewisses "Um-die-Ecke-schauen" möglich. Während insbesondere massive Bebauung einen stark abschirmenden Effekt besitzt, stören Bäume, Sträucher, Verkehrszeichen oder parkende Fahrzeuge die Kommunikation im geringeren Ausmaß. So zeigt beispielsweise Mangel¹⁰⁶ in seiner Arbeit, dass eine Kommunikation an Kreuzungen auch ohne direkte Sichtverbindung mit einer Übertragungswahrscheinlichkeit größer 50 % über eine Distanz bis zum Kreuzungsmittelpunkt von mind. 50 m möglich ist. Die Untersuchungen fanden an verschiedenen X-und T-Kreuzungen bei einem Abstand des Senders zum Kreuzungsmittelpunkt von 30 m bzw. 60 m statt. Eine weitere Alternative zur Adressierung dieser Problematik stellt die

¹⁰⁶ Vgl. Mangel (2012): Inter-vehicle communication at intersections, S. 109 ff.

Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation dar. In diesem Fall werden die gesendeten Daten über beispielsweise an Kreuzungen angebrachte Repeater weitergeleitet und auf diese Weise ein indirektes "Um-die-Ecke-schauen" ermöglicht.

Vorteile der Fahrzeugkommunikation darüber hinaus sind zum einen, dass hier keine so genannten Geister-Objekte auftreten, d.h. eine zeitintensive Objektverifizierung kann entfallen. Andererseits ermöglicht die Datenweitergabe mittels Fahrzeugkommunikation eine sehr schnelle Erfassung von Beschleunigungsänderungen der beteiligten Fahrzeuge, die ansonsten, bei fahrzeugautarker Sensorik, nur über die Signaldifferentiation bestimmt werden können, so dass diese Informationen in höherer Qualität beispielsweise bei der Objektprädiktion berücksichtigt werden können.

Die Herausforderung bei der Bereitstellung von Informationen mittels Kommunikation ist insbesondere deren fehlender relativer Bezug zum Egofahrzeug. Informationen wie die Geschwindigkeit oder die Beschleunigung eines anderen Objektes können ohne relative Positionierung des Hindernisses zum Egofahrzeug nur sehr begrenzt zur Beurteilung einer Situation herangezogen werden. Grundvoraussetzung für die Verwendung von Kommunikationsdaten ist somit eine Absolutpositionierung (Eigenlokalisierung) der beteiligten Fahrzeuge, um darüber die jeweilige Relevanz der übertragenen Daten ableiten zu können. Hierzu sind unterschiedlichste Konzepte, z.B. auf Grundlage von GPS und digitaler Karten¹⁰⁷ oder Landmarken die beispielsweise mittels Laserscannern erfasst werden 108, Gegenstand von Forschung und Entwicklung, wobei je nach Konzept Genauigkeiten von unterhalb 1 m realisierbar erscheinen 109. Selbst bei einer Genauigkeit von 1 m kann dies bei ungünstiger Überlagerung der Einzelfehler der beiden Fahrzeugpositionen zu Fehlern in der Relativposition von bis zu 2 m führen, was in etwa der Breite bzw. der halben Länge eines Pkw entspricht. Eine solche Genauigkeit würde in Kreuzungsszenarien zwar die Detektion eines relevanten Hindernisobiektes erlauben, doch die sichere Prädiktion einer Kollision bzw. Planung der Kollisionsvermeidungsund Kollisionslinderungsmaßnahmen ist alleine auf Basis dieser Daten nicht darstellbar¹¹⁰, so dass hierfür zusätzlich fahrzeugautarke Sensorik wie zum Beispiel Radar und Kamera oder Laserscanner notwendig werden.

Darüber hinaus können per Kommunikation selbstverständlich nur Objekte "erfasst" werden, die mit einer Kommunikationseinrichtung ausgestattet sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass zwei sich der Kreuzung nähernde Fahrzeuge miteinander kommunizieren können, hängt daher sehr stark von der Ausstattungsrate innerhalb der Fahrzeugflotte ab.

¹⁰⁷ Vgl. Schindler (2013): Vehicle Self-Localization Using High-Precision Digital Maps

¹⁰⁸ Vgl. Krzikalla et al. (2013): Positionsbestimmung mit Satelliten und Landmarken, S.45 ff.

¹⁰⁹ Schindler (2013): Vehicle Self-localization with High-Precision Digital Maps, S. 145

¹¹⁰ Stählin (2008): Eingriffsentscheidung Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung, S.64

3.2.2 Kraftschlussbeiwert Reifen-Fahrbahn

Grundlage für die Planung eines realisierbaren hochdynamischen Brems-, Ausweichoder auch kombinierten Manövers ist die Kenntnis über den Straßenzustand, d.h. insbesondere des aktuellen aber auch des vorausbefindlichen maximalen Kraftschlussbeiwertes Reifen-Fahrbahn μ_{max} . Dieser bestimmt in Abhängigkeit der Radlast $F_{Z,w}$ die maximal durch den Reifen w übertragbare Normalkraft $F_{N,w}$.

$$F_{Nw \max} = \mu_{\max} \cdot F_{Zw} \tag{3.6}$$

In der Literatur sind diverse Ansätze zur Schätzung des maximalen Kraftschlussbeiwertes μ_{max} im Fahrzeug bekannt, die nach effekt- und parameterbasierte Verfahren unterschieden werden Effektbasierte Verfahren beruhen auf der Erfassung von Effekten unterschiedlicher Kraftschlussverhältnisse, wie zum Beispiel die übertragenen Kräfte und Momente, Spannungen und Dehnungen im Reifen oder auch akustische Schwingungen Prinzipbedingt eignen sich diese Verfahren lediglich zur Bestimmung des maximalen Kraftschlussbeiwertes μ_{max} an der aktuellen Position der Räder, lassen dort aber durchaus eine Bestimmung des momentanen Wertes mit einer Genauigkeit von ± 0.1 als realistisch erscheinen ± 0.1 als realistisch erscheinen ± 0.1

Zur Abschätzung des vorausbefindlichen Kraftschlussbeiwertes kommt die zweite Gruppe, die sogenannten parameterbasierten Verfahren in Frage. Diese bestimmen die Werte der Parameter, die einen Einfluss auf den Kraftschlussbeiwert besitzen, wie z.B. die Oberflächenrauhigkeit oder das Zwischenmedium zwischen Reifen und Fahrbahn (Wasser, Schnee, Eis) ¹¹⁴, meist mittels optischer Sensoren. Auf Basis von Erfahrungswerten und Modellvorstellungen erlaubt die detektierte Oberflächenrauhigkeit eine Klassifizierung des Straßentyps und zusammen mit dem Zwischenmedium auch eine Abschätzung des Kraftschlussbeiwertes¹¹⁵. Die maximale Vorausschauweite dieser Verfahren hängt von der aktuellen Sichtweite ab, und beträgt selbst ohne Sichtbehinderung bedingt durch die verwendeten Sensorik ca. 60 m¹¹⁶. Der auf diese Weise aus qualitativen Kenngrößen abgeleitete, vorausbefindliche Kraftschlussbeiwert unterliegt jedoch einer größeren Unsicherheit. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des

Müller et al. (2004): Estimation of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient, S. 608 f; Eichhorn (1994): Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn, S. 16 ff.

¹¹² Holzmann (2008): Adaptive cooperation between driver and assistant system, S. 40 ff.

¹¹³ Vgl. z.B. Andersson et al. (2004): Road Friction Estimation, S.15 ff. oder Ahn et al. (2011): Robust Estimation of Road Friction Coefficient, S. 3948–3953

¹¹⁴ Vgl. z.B.: Sato et al. (2007): Recognition Method for Road Friction Condition; Yamada et al. (2005): Road Surface Condition Detection Technique, S.163-168

¹¹⁵ Holzmann et al. (2006): Predictive estimation road-tire friction coefficient, S. 885–890

¹¹⁶ Holzmann (2008): Adaptive cooperation between driver and assistant system, S. 39

vorausbefindlichen Straßenzustands verspricht die C2X-Technologie 117 . Diese Technologie ermöglicht, den in den einzelnen Fahrzeugen lokal abgeschätzten Kraftschlussbeiwert, in Form einer digitalen Karte zu sammeln, und dann wieder bereitzustellen. Die Güte dieser Informationen hängt dabei jedoch insbesondere von der Ausstattungsrate der Fahrzeugflotte mit C2X-Technologie sowie der Güte der Eigenlokalisierung ab, damit ein lokal ermittelter Wert der globalen Karte entsprechend zugeordnet werden kann. Dabei gilt es zusätzlich zu berücksichtigen, dass ein Fahrzeug nicht den Kraftschlussbeiwert über die vollständige Fahrbahnbreite ermittelt, sondern nur jeweils für den tatsächlich von den Reifen überfahrenen Bereich. Wenn auch sehr optimistisch abgeschätzt, so scheint auf diese Weise zumindest theoretisch eine Bestimmung des aktuellen und vorausbefindlichen maximalen Kraftschlussbeiwertes μ_{max} mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ möglich, so dass dies als Basis für die weiteren Betrachtungen herangezogen wird.

3.2.3 Zwischenfazit

Vergleicht man die in Kapitel 3.1 aufgestellten Anforderungen an die maschinelle Umfelderfassung mit der in diesem Abschnitt aufgezeigten Leistungsfähigkeit, so erscheint eine zuverlässige Bereitstellung des notwendigen Informationsbedarfs für den geforderten Abdeckungsbereich wenn, dann nur auf Basis einer Datenfusion ¹¹⁸, d.h. durch Kombination der Vorteile unterschiedlicher Sensorkonzepte, darstellbar. Möglich erscheinen beispielsweise Kamera und Radar oder Lidar zusammen mit Fahrzeugkommunikation, ohne dabei im Rahmen dieser Arbeit im Detail auf die Güte der bereitzustellenden Informationen eingegangen zu sein. Die Fahrzeugkommunikation erlaubt bei Sichtbehinderung eine frühere Detektion relevanter Objekte und darüber hinaus eine sehr schnelle Erfassung von Beschleunigungsänderungen des Hindernisobjektes, während die fahrzeugautarken Sensorkonzepte eine deutlich höhere Güte der Relativpositionierung versprechen.

Aufgrund der bestehenden Ungenauigkeiten bei der Absolutpositionierung der einzelnen Fahrzeuge und der damit verbundenen Unsicherheit über die Relativposition verdeckter Hindernisobjekte in Bezug zum Egofahrzeug, erscheint eine Manöverinitierung bei einem noch verdeckten Hindernisobjekt mit dem Stand der Technik und Forschung der Fahrzeugkommunikation jedoch nicht sicher darstellbar. Zumindest dieser Teilaspekt der Untersuchungshypothese muss als falsifiziert angesehen werden.

Problematisch könnte darüber hinaus die grundsätzlich im innerstädtischen Gebiet beschränkte Sichtweite sein. Je nach Straßenführung ist nicht zwingend davon auszugehen, dass eine Sichtweite in der Größenordnung der hergeleiteten 125 m besteht.

¹¹⁷ Vgl. z.B. Stählin et al. (2011): Straßenzustandsinformationen durch Vehicle2X, S.1 ff.

¹¹⁸ Vgl. Darms (2012): Fusion umfelderfassender Sensoren, S. 237–247

4 Funktionsalgorithmus

Eine der Kernkomponenten des Funktionsalgorithmus des vorliegenden Schutzkonzeptes ist die Situationsanalyse. Ihre Aufgabe ist die Beurteilung der Kritikalität einer vorliegenden Situation und darauf aufbauend die gegebenenfalls notwendige Initiierung eines die Kollision vermeidenden bzw. in ihren Folgen lindernden Notmanövers. Aufbauend auf der durch die Umfeldsensorik erfassten und beschriebenen Situation, besteht die Situationsanalyse aus den Komponenten Umfeldinterpretation einschließlich der Kollisionsprädiktion und darauf folgend der Situationsanalyse im engeren Sinne sowie der Ableitung ggf. notwendiger Maßnahmen in Art und Zeitpunkt.

4.1 Konzept

4.1.1 Umfeldinterpretation

Voraussetzung für die Beurteilung einer potentiell kritischen Situation und die Einleitung ggf. notwendiger Gegenmaßnahmen ist deren rechtzeitige Detektion. Auf Grundlage von Informationen der Fahrdynamik- und Umfeldsensorik ist in der Literatur eine Reihe von Ansätzen zur Prädiktion der zukünftigen Trajektorien der beteiligten Verkehrsteilnehmer bekannt. Die einfachste Alternative der Prädiktion der zukünftigen Trajektorie ist die Extrapolation der bisherigen Fahrzeugbewegung aus dem aktuellen Bewegungszustand auf Basis kinematischer Gleichungen. Je nach Fokus der überlagerten Funktionalität und dem damit verbundenen notwendigen Prädiktionshorizont (zeitliche Vorausschau) finden darüber hinaus beispielsweise noch unterschiedliche auf dem Einspurmodell basierende Ansätze¹¹⁹ und stochastische Modelle wie die Monte-Carlo-Simulation¹²⁰ oder unterschiedliche Erreichbarkeitsanalysen¹²¹ Verwendung.

Die Wahl des Algorithmus hängt primär von der Komplexität der zu erwartenden Manöver und dem notwendigen Prädiktionshorizont ab, wobei es zwischen der Prädiktionsgenauigkeit und der Vorausschauweite abzuwägen gilt. Um eine potentiell kritische Situation rechtzeitig detektieren zu können, ist der Prädiktionshorizont zumindest so

¹¹⁹ Vgl. z.B. Schubert et al. (2008): Advanced Motion Models for Vehicle Tracking, S. 1-6; Caveney (2007): Vehicle Path Prediction, S. 3906–3912 und Barth (2010): Vehicle Tracking and Motion Estimation

¹²⁰ Vgl. z.B. Broadhurst et al. (2005): Monte Carlo Road Safety Reasoning, S.320 ff.

¹²¹ Vgl. z.B. Althoff (2010): Reachability Analysis und Aoude et al. (2011): Mobile Agent Trajectory Prediction, S.6 ff.

groß zu wählen, dass eine Kollision zumindest theoretisch noch vermieden werden kann. Im hier vorliegenden Fall kann der Zeitbedarf zur räumlichen Vermeidung durch Notbremsen als obere Grenze angesehen werden. Der zu wählenden minimale Prädiktionshorizont entspricht daher der zum Zurücklegen des minimalen Bremswegs notwendigen Zeitdauer $t_{s,b}$ zuzüglich der Bremsverlustzeit τ_b , entsprechend nachfolgender Gleichung.

$$t_{s,b}(v_{ego}, \mu_{\text{max}}) = \left(\frac{v_{ego}^2}{2 \cdot \mu_{\text{max}} \cdot g} \cdot \frac{1}{v_{ego}}\right) + \tau_b = \frac{v_{ego}}{2 \cdot \mu_{\text{max}} \cdot g} + \tau_b$$
(4.1)

Für die Auslegungsgeschwindigkeit von 60 km/h, einer maximalen Ausnutzung des konservativ abgeschätzten Kraftschlussbeiwertes μ_{max} =0,7 sowie einer angenommenen Bremsverlustzeit τ_b in der Größenordnung von 0,1 s¹²² ergibt sich ein Wert für t_{sB} von ca. 1,3 s. Zusätzlich gilt es noch die Zeitdauer zum Passieren des Hindernisses mit zu berücksichtigen. Eine Fahrzeuglänge von 5 m und eine Fahrzeugbreite von 2 m annehmend resultiert hieraus eine Wegstrecke von ca. 7 m, was bei Auslegungsgeschwindigkeit zusätzlichen 0,4 s bis zum endgültigen Passieren des Hindernisses entspricht, so dass der Prädiktionshorizont t_{pred} in Summe auf 1,7 s festgelegt werden kann. Von einem größeren Wert für t_{pred} wird an dieser Stelle aufgrund der damit verbundenen steigenden Unsicherheit der prädizierten Trajektorien abgesehen.

Knotenpunkte weisen in den seltensten Fällen einen (stark) gekrümmten Fahrbahnverlauf auf 123 , so dass zumindest in der Phase der Annäherung an einem Knotenpunkt mit keinen großen, plötzlichen Kursänderungen zu rechnen ist. Im vorliegenden Konzept findet aus diesen Gründen für die Prädiktion der Trajektorien beider beteiligter Fahrzeuge ein punktdynamischer Ansatz bei Annahme einer konstanten Längsbeschleunigung/-verzögerung $a_{x,0}$ und konstanter Kursrate $\dot{\psi}_{\kappa,0}$ über den Prädiktionshorizont t_{pred} Verwendung, der einen guten Kompromiss zwischen Vorhersagegenauigkeit und Modellkomplexität verspricht. Die Annahme bezüglich des Verhaltens der Kursrate beruht dabei insbesondere auf der Arbeit von Godthelp 124 , wonach Fahrer in Normalsituationen beim Einlenken in die Kurve konstante Lenkwinkelraten verwenden und bei der Kurvendurchfahrt den Lenkwinkel dann nahezu konstant halten, was zumindest im linearen Bereich unter Annahme einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit näherungsweise einer Fahrzeugbewegung mit konstanter Kursrate entspricht.

Unter der Näherung $\beta(t)$ =0 ergeben sich die Schwerpunktkoordinaten der beteiligten Fahrzeuge j (Egofahrzeug und Hindernisobjekt) zum Zeitpunkt t_{i+1} dabei aus denjenigen

_

¹²² Vgl. Winner (2012): Frontalkollisionsschutzsysteme, S.529

¹²³ Vgl. Klanner (2008): Entwicklung kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten, S. 17 basierend auf einer Auswertung der GIDAS Datenbank

¹²⁴ Godthelp (1986): Vehicle control during curve driving, S.212 ff.

zum Zeitpunkt t_i zuzüglich der im Zeitraum Δt^{125} zurückgelegten, von der Fahrzeuggeschwindigkeit $v(t_i)$ und dem Kurswinkel $\psi_{\kappa}(t_i)$ abhängigen, Wegstrecke zu

$$x_{SP,i}(t_{i+1}) = x_{SP,i}(t_i) + v_i(t_i) \cdot \cos(\psi_{\kappa,i}(t_i)) \cdot \Delta t$$
 (4.2)

$$y_{SP,j}(t_{i+1}) = y_{SP,j}(t_i) + v_j(t_i) \cdot \sin(\psi_{\kappa,j}(t_i)) \cdot \Delta t$$
 (4.3)

mit

$$\psi_{\kappa,j}(t_{i+1}) = \psi_{\kappa,j}(t_i) + \dot{\psi}_{\kappa,0,j} \cdot \Delta t \tag{4.4}$$

$$v_i(t_{i+1}) = v_i(t_i) + a_{x,0,i} \cdot \Delta t$$
 (4.5)

Durch Transformation der Koordinaten $x_{SP,j}$ und $y_{SP,j}$ folgen die jeweiligen Eckpunkte der Fahrzeuge zu

$$\begin{bmatrix} x_{SP,j}(t_{i}) + \cos(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{L_{j}}{2} - \sin(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{B_{j}}{2}, \\ y_{SP,j}(t_{i}) + \sin(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{L_{j}}{2} + \cos(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{B_{j}}{2} \\ x_{SP,j}(t_{i}) + \cos(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{L_{j}}{2} + \sin(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{B_{j}}{2}, \\ y_{SP,j}(t_{i}) + \sin(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{L_{j}}{2} - \cos(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{B_{j}}{2}, \\ x_{SP,j}(t_{i}) - \cos(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{L_{j}}{2} - \sin(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{B_{j}}{2}, \\ y_{SP,j}(t_{i}) - \sin(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{L_{j}}{2} + \cos(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{B_{j}}{2}, \\ x_{SP,j}(t_{i}) - \cos(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{L_{j}}{2} + \sin(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{B_{j}}{2}, \\ y_{SP,j}(t_{i}) - \sin(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{L_{j}}{2} - \cos(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{B_{j}}{2}, \\ y_{SP,j}(t_{i}) - \sin(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{L_{j}}{2} - \cos(\psi_{\kappa,j}(t_{i})) \cdot \frac{B_{j}}{2} \end{bmatrix}$$

$$(4.6)$$

Die Aktualisierung der prädizierten Ego- und Hindernis-Trajektorien erfolgt während der Annäherung an die Kreuzung entsprechend der obigen Schrittweite Δt .

Schneiden sich die beiden Trajektorien räumlich und zeitlich, d.h. berühren sich die durch die jeweiligen Fahrzeugecken, gemäß Gleichung (4.7), aufgespannten Polygone $P_{ego}(t_i)$ und $P_{obs}(t_i)$, so kommt es bei unveränderten Randbedingungen zum prädizierten Zeitpunkt des ersten Kontakts t_{coll} der beiden Polygone zur Kollision (vgl. Abbildung 4-1).

$$P_{i}(t_{i}) := (p_{vL,i}(t_{i}), p_{vR,i}(t_{i}), p_{hL,i}(t_{i}), p_{hR,i}(t_{i}))$$

$$(4.7)$$

_

¹²⁵ Im vorliegenden Fall findet $\Delta t = 10$ ms Verwendung

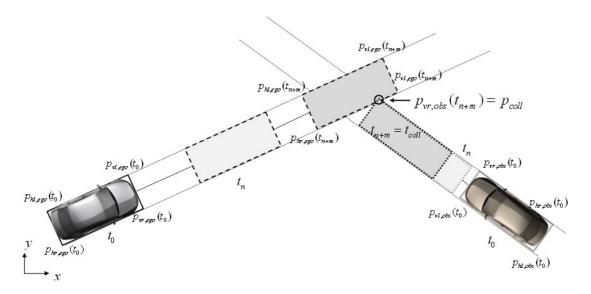


Abbildung 4-1 Beispiel - Trajektorienprädiktion

4.1.2 Situationsanalyse - Kollisionsvermeidung

Gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 2.2 ist ein Eingriff seitens des Egofahrzeugs erst dann zu empfehlen, wenn das potentielle Kollisionsobjekt eine Kollision eigenständig nicht mehr vermeiden kann. Davon ist genau dann auszugehen, wenn das Hindernisobjekt selbst bei einer Vollbremsung nicht mehr vor dem Erreichen des potentiellen Kollisionsbereiches *KB*, definiert als die Schnittfläche der prädizierten Trajektorien beider beteiligter Fahrzeuge (vgl. Abbildung 2-3), zum Stillstand kommen kann.

Für den Fall, dass die Umfeldinterpretation bei gegebener Fahrzeugbewegung eine Kollision vorhersagt, kann die Kritikalität einer Situation, definiert als der verbleibende Zeitraum für diesen letztmöglichen die Kollision vermeidenden Bremseingriff seitens des Kollisionsobjektes, durch Gleichung (4.8) beschrieben werden. Dabei entspricht $s_{KB,obs}$ dem aktuellen Abstand zum potentiellen Kollisionsbereich und $s_{b,obs}$ dem minimalen angenommenen Bremsweg bei maximaler Verzögerung $\mu_{max} \cdot g$.

$$t_{TB,obs} = \frac{s_{KB,obs} - s_{b,obs}}{v_{obs}} \text{ mit } s_{b,obs} = \frac{v_{obs}^2}{2 \cdot \mu_{\text{max}} \cdot g} + \tau_b \cdot v_{obs}$$

$$(4.8)$$

Ab dem Zeitpunkt, zu dem das Hindernisobjekt eine Kollision nicht mehr vermeiden kann, der Kennwert $t_{TB,obs}$ würde folglich einen Wert kleiner 0 annehmen, gilt es mögliche Maßnahmen seitens des Egofahrzeugs hinsichtlich ihres Potentials zu analysieren.

Zur Beurteilung des Potentials einer Notbremsung bietet sich auch für das Egofahrzeug das entsprechend angepasste, zuvor hergeleitete Kriterium nach Gleichung (4.9) an.

$$t_{TB,ego} = \frac{s_{KB,ego} - s_{b,ego}}{v_{ego}} \text{ mit } s_{b,ego} = \frac{v_{ego}^2}{2 \cdot \mu_{\text{max}} \cdot g} + \tau_b \cdot v_{ego}$$
(4.9)

Ist zu obigem Zeitpunkt $t_{TB,ego} > 0$, kann eine Kollision noch durch ein Notbremsmanöver des Egofahrzeugs vermieden werden, andernfalls ist eine Vermeidung unter den

zuvor definierten Randbedingungen in Bezug auf die Eingriffsalternativen, wenn überhaupt, dann nur noch durch ein Ausweichmanöver darstellbar.

Die Beurteilung des Vermeidungspotentials eines Ausweichmanövers bedarf dabei, wie bereits beschrieben, eines räumlich-zeitlichen Abgleiches der Trajektorien beider Beteiligter. Unabhängig davon, wie das zugrunde liegende Ausweichmanöver im Detail umgesetzt wird, ist ein Ausweichen genau so lange noch möglich, wie sich die prädizierte Trajektorie des Hindernisobjektes und die Ausweichtrajektorie des Egofahrzeugs während des einander Passierens nicht berühren. Im Algorithmus erfolgt dies mittels eines Vergleichs, der kontinuierlich prüft, ob sich die durch die Eckpunkte der beteiligten Fahrzeuge beschriebenen und in die Zukunft prädizierten Polygone P_{ego} und P_{obs} schneiden bzw. berühren. Zur Kompensation möglicher Sensor-, Modell- und Regelungsungenauigkeiten ist um das, das Hindernisobjekt beschreibende, Polygon ein zusätzlicher Sicherheitspuffer gelegt. Solange das Kriterium

$$\sum_{t=0}^{t=t_{pred}} P_{ego}(t_i) \cap P_{obs}(t_i) = \{\}$$
 (4.10)

erfüllt ist, ist ein Ausweichmanöver möglich, aber noch nicht notwendig. Die geeignete Wahl des Sicherheitspuffers erlaubt es, diesen zur Identifikation des notwendigen Eingriffszeitpunktes zu verwenden. Wird der Sicherheitspuffer ausreichend groß gewählt¹²⁶, ist das geplante Manöver zu dem Zeitpunkt, zu dem sich die beiden aufgespannten Polygonflächen für einen kompletten Prädiktionsdurchlauf erstmalig berühren/schneiden, d.h. die Summe der Schnittmengen erstmalig keine Leere Menge darstellt, zu initiieren. Zu einem späteren Zeitpunkt ist eine Kollisionsvermeidung unter den gegebenen Randbedingungen nicht mehr mit ausreichender Sicherheit möglich, so dass dann ein Ausweichmanöver abzulehnen ist.

Eine exemplarische grafische Aufarbeitung der zugrundliegenden Algorithmen ist Abbildung 4-2 zu entnehmen.

_

¹²⁶ Unsicherheit + minimaler Abstand zwischen den Beteiligten zum Zeitpunkt der dichtesten Annäherung

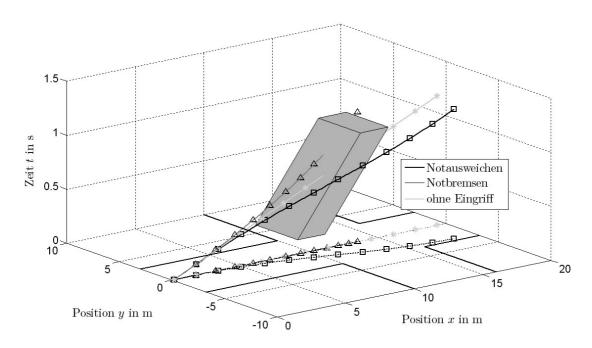


Abbildung 4-2 Beispiel einer grafisch aufbereiteten Situationsanalyse zur Kollisionsvermeidung

Auf der x- und y-Achse sind die korrespondierenden x- und y-Positionen des prädizierten Kollisionsbereichs (grau), gleichbedeutend mit der Position des Hindernisobjektes zuzüglich des Sicherheitsbereiches, sowie der Übersichtlichkeit halber die prädizierte Trajektorie eines Eckpunktes des Egofahrzeugs dargestellt. In diesem Fall, bei einem Ausweichmanöver nach rechts, ist $p_{vl,ego}$ einer der relevanten Bezugspunkte zur Beurteilung des Vermeidungspotentials. Die z-Achse wiederum beschreibt den zeitlichen Verlauf der Trajektorien. Die hellgraue Linie entspricht der prädizierten Trajektorie des Egofahrzeugs ohne Eingriff, während dunkelgrau (Δ) und schwarz (\Box) die beiden Trajektorien bei Vollverzögerung bzw. Notausweichen entsprechen. Berührt oder schneidet eine der Linien den Kollisionsbereich, so führt das jeweilige Manöver bei dem, der Hochachse zu entnehmenden, Zeitpunkt zur Kollision. Im hier dargestellten Beispiel könnte eine Kollision folglich nur noch durch ein Ausweichmanöver vermieden werden.

In diesem Zusammenhang gilt es zusätzlich die Frage zu klären, wie damit umzugehen ist, wenn sowohl ein Notbremsen als auch ein Notausweichen zum definierten Zeitpunkt eine Kollision noch vermeiden können. In Längsverkehrsszenarien wird aufgrund der Problematik der potentiellen Bevormundung des Fahrers in solchen Fällen die tatsächlich letztmögliche Maßnahme gewählt. So besteht dort beispielsweise die Herausforderung, dass Fahrer bei Überholmanövern mit hoher Relativgeschwindigkeit sehr nah auf das vorausfahrende Fahrzeug auffahren, mit dem Bewusstsein noch rechtzeitig auszuscheren. In diesen Fällen darf ein System nicht einschreiten, auch wenn eine Kollisionsvermeidung durch Bremsen folglich nicht mehr möglich ist. Aufgrund der grundsätzlich anderen Situation im Kreuzungsszenario – der Fahrer geht davon aus, dass sich kein Fahrzeug innerhalb seines Pfads befindet – ist ein solches Verhalten hier auszuschließen. Es dürfte sogar sehr unwahrscheinlich sein, dass der Fahrer überhaupt in der Lage ist, in einer solchen Situation den letztmöglichen Ausweichzeitpunkt abschätzen

zu können. Darüber hinaus müsste je nach Konstellation ein Ausweichmanöver über den Fahrstreifen des Gegenverkehrs verlaufen, weshalb es, verglichen mit einem Notbremsmanöver das höhere Risikopotential besitzt. Da dem Fahrerwunsch, die durch das Hindernisobjekt zu verantwortende Kollision zu vermeiden, mit beiden Maßnahmen entsprochen werden kann, ohne dass dadurch der Eindruck einer zu frühen Manöverinitierung entsteht, denn das Hindernis kann die Kollision nicht mehr eigenständig vermeiden, würde in einem solchen Fall durch den Algorithmus das Notbremsmanöver als die Kollision vermeidende Maßnahme gewählt werden. Ein Ausweichmanöver wird somit immer nur dann initiiert, wenn, basierend auf den Daten der Situationsanalyse, zum Zeitpunkt eines zulässigen Manövereingriffs eine Notbremsung die Kollision nicht mehr räumlich vermeiden kann.

4.1.3 Situationsanalyse - Kollisionsfolgenlinderung

Ergibt die zuvor beschriebene Analyse, dass eine Kollisionsvermeidung nicht mehr möglich ist, so verbleibt nur noch die Linderung der Folgen der Kollision.

Wie bereits erwähnt, gilt es bei der Kollisionsfolgenlinderung ein Manöver zu realisieren, das unter der Randbedingung zu keiner Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle zu führen, die Kollisionsgeschwindigkeit minimiert. Die Planung des zugrundeliegenden Manövers beruht auf einem räumlich-zeitlichen Vergleich der realisierbaren Trajektorienschar in Bezug auf einen zu definierenden Sollkollisionspunkt am Hindernisobjekt. Die einzelnen Trajektorien der Trajektorienschar unterscheiden sich unter der Annahme einer nahezu optimalen Kraftschlussausnutzung lediglich in ihrem Beschleunigungsvektor (beschrieben durch dessen Winkel γ^{127}), wobei dieser zwischen 0° (Vollverzögerung) und 90° (maximaler Lenkeingriff ohne Bremseingriff) systematisch variiert wird.

Abhängig von der Bewegungsrichtung des Hindernisses sind auf diese Weise die im Prädiktionszeitraum mit variiertem Beschleunigungsvektor erreichbaren Positionen (vgl. Abbildung 4-3 – Trajektorienschar in hellgrau) der für den Stoßpunkt relevanten vorderen Fahrzeugecke $p_{vl/vr,ego,\gamma}(t_i)$ mit der jeweils prädizierten Position eines zu definierenden Soll-Kollisionspunkts $p_{soll,obs}(t_i)$ für alle zukünftigen Zeitpunkt t_i innerhalb des Prädiktionshorizonts t_{pred} in Bezug zu setzen. Der Soll-Kollisionspunkt ist dabei in Abhängigkeit der Güte von Prädiktion und Regelung so zu wählen, dass trotz ggf. auftretender Abweichungen von der Sollvorgabe eine Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle vermieden wird (z.B. Mitte Vorderwagenlänge des Hindernisobjektes).

_

¹²⁷ Vgl. Kapitel 4.2.1

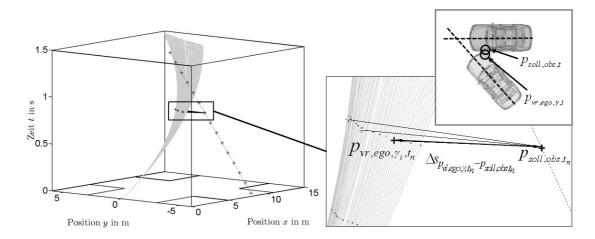


Abbildung 4-3 Beispiel eines grafisch aufgearbeiteten Vergleichs der erreichbare Positionen des Egofahrzeugs bei unterschiedlichen Beschleunigungsvektoren mit einem Soll-Stoßpunkt am Hindernisfahrzeug

Das aus Gleichung (4.11) resultierende Minimum beschreibt den minimalen realisierbaren Abstand zum Sollkollisionspunkt und bestimmt, sofern dieser einen zu definierenden Grenzwert Δs_{max}^{128} nicht überschreitet, über das korrespondierende γ_{coll} , umgerechnet in den zugehörigen Beschleunigungsvektor, die Vorgabe an die Trajektorienregelung.

$$\min \sum_{\gamma=1}^{90} \sum_{t=0,01}^{t_{pred}} (p_{vl/vr,ego,\gamma,t} - p_{soll,obs,t}) = \Delta s_{\gamma_{coll},t_{coll}}$$
(4.11)

Diese Analyse wird auch noch während der Manöverdurchführung kontinuierlich fortgesetzt, um auf diese Weise auf eine plötzliche Änderung der Fahrzeugbewegung des Hindernisobjektes durch Anpassung der Regelungsvorgaben reagieren zu können. Übersteigt $\left|\Delta s_{\gamma_{coll},t_{coll}}\right|$ den Grenzwert Δs_{max} , kann auch durch das kollisionsfolgenlindernde Manöver eine Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle nicht ausgeschlossen werden, so dass in diesem Fall nur noch ein Notbremsmanöver mit dem Ziel der Minimierung der Kollisionsgeschwindigkeit unabhängig von der daraus resultierenden Kollisionskonstellation als letzte Alternative verbleibt.

4.2 Modellannahmen/Modellansatz

Voraussetzung für das vorgestellte Konzept ist die möglichst exakte Prädiktion der zugrundeliegenden Ausweichtrajektorien.

Damit die Trajektorien von Ego- und Hindernisfahrzeug zueinander in Bezug gebracht werden können, hat der Modellansatz dabei neben den Informationen zu den zukünftig

_

¹²⁸ Im Rahmen dieser Arbeit findet ein $\Delta s_{max} = 0.1$ m Verwendung.

erreichbaren Aufenthaltsbereichen auch den jeweils zugehörigen Zeitpunkt bereitzustellen. Darüber hinaus hat er die Planung der zukünftigen Ausweich- oder Notbremstrajektorie unter veränderlichen Randbedingungen, wie dem maximalen Kraftschlussbeiwert und der verfügbaren Ausweichbreite, in Echtzeit zu ermöglichen.

4.2.1 Punktdynamischer Modellansatz

Zur Planung von Ausweichtrajektorien, unter den genannten Randbedingungen, ist aus der Literatur ein Ansatz, basierend auf den durch den Kammschen Kreis definierten, maximal realisierbaren Beschleunigungsvektoren, bekannt¹²⁹, der dort zur Betrachtung von Ausweichmanövern im Längsverkehr herangezogen wird.

Abhängig vom verfügbaren Kraftschlusspotential lassen sich durch den Winkel γ des Beschleunigungsvektors (vgl. Abbildung 4-4) die längs und quer wirkenden maximalen Beschleunigungskomponenten eindeutig beschreiben. Im vorliegenden Fall ist der Winkel dabei so definiert, dass $\gamma=0$ einer ausschließlichen Verzögerung und $\gamma=\pm\pi/2$ einem ausschließlich nach rechts bzw. links beschleunigtem Manöver entspricht.

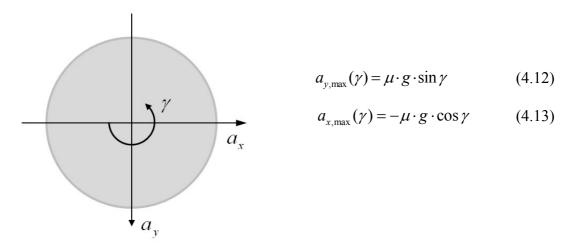


Abbildung 4-4 Definition des Beschleunigungsvektors y

Die erreichbaren Positionen ergeben sich dabei aus zweifacher Integration der Soll-Beschleunigungen $a_{x,ego}$ und $a_{y,ego}$, bei Berücksichtigung der Ausgangsgeschwindigkeit $v_{\theta,ego}$ sowie der Ausgangspositionen $x_{\theta,ego}$ und $y_{\theta,ego}$ entsprechend der nachfolgenden Gleichungen, zu

$$x_{ego}(\gamma, t_i) = \frac{1}{2} a_{x,ego}(\gamma) t_i^2 + v_{x,0,ego} t_i + x_{0,ego}$$
(4.14)

$$y_{ego}(\gamma, t_i) = \frac{1}{2} a_{y,ego}(\gamma) t_i^2 + v_{y,0,ego} \cdot t_i + y_{0,ego}.$$
 (4.15)

Durch Variation von γ lassen sich durch die Gleichungen (4.12) - (4.15) für definierte Zeitpunkte entsprechend der nachfolgenden Abbildung 4-5 die maximal möglichen

67

¹²⁹ Schmidt et al. (2005): Letztmögliche Ausweichmanöver stehende bewegte Hindernisse, S. 129–138

Aufenthaltsbereiche ableiten. Hierbei wird deutlich, dass sich der streckenbezogene Lateralversatz durch ein parallel verzögertes Ausweichmanöver maximieren lässt (schwarze Linie).

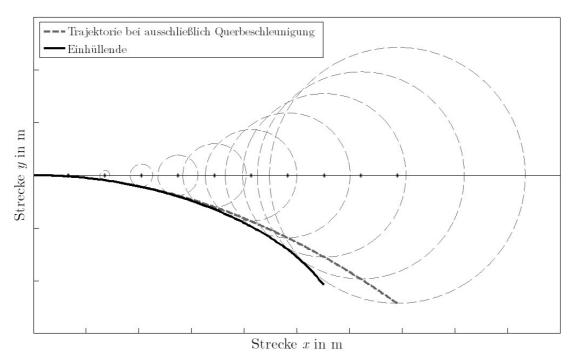


Abbildung 4-5 Aufenthaltsbereiche nach Kammschen Kreis (nach Schmidt et. al. (2005)¹³⁰)

Die Bestimmung der zukünftigen *x*- und *y*-Positionen erfolgt bei diesem Ansatz unabhängig voneinander, d.h. ohne eine Berücksichtigung der aus einem solchem Manöver resultierenden Kurswinkeländerung. Die Folgen dieser Vereinfachung sind der nachfolgenden Abbildung 4-6 zu entnehmen.

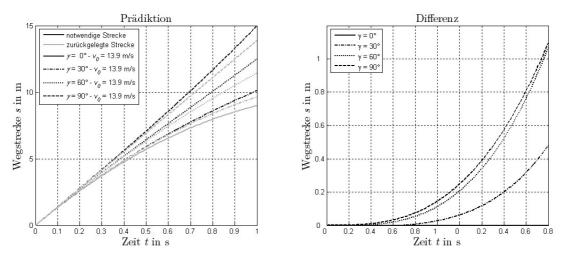


Abbildung 4-6 Vergleich der zur Realisierung der prädizierten Trajektorie notwendigen Wegstrecke mit der der nach obigen Ansatz aufgrund der Ausgangsgeschwindigkeit zurückgelegten Wegstrecke über der Zeit für v_o =50 km/h

¹³⁰ Schmidt et al. (2005): Letztmögliche Ausweichmanöver stehende bewegte Hindernisse, S. 131

Auf der linken Seite sind für verschiedene Beschleunigungsvektoren die aufgrund der Ausgangsgeschwindigkeit tatsächlich innerhalb eines definierten Zeitraum zurückgelegten Wegstrecken (grau) und die mit postulierten Aufenthaltsbereich tatsächlich einhergehende Wegstrecke (schwarz) aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass diese beiden Größen, je nach gewähltem Beschleunigungsvektor, bereits innerhalb von 0,2-0,4 s nach einer Manöverinitiierung sichtbar voneinander abweichen. Dabei ist die mit postuliertem Aufenthaltsbereich verbundene Wegstrecke immer größer als die im verfügbaren Zeitraum realisierbare. Bei großen Querbeschleunigungsanteilen (γ >60°) weichen die Werte bereits innerhalb von 1 s um über 1 m voneinander ab.

Eine definierte durch seine x- und y-Koordinate beschriebene Position wird daher erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht, als vom Modellansatz postuliert. In einem Längsverkehrsszenario ist diese Tatsache unproblematisch, da es hier lediglich gilt, innerhalb einer vorgegebenen Wegstrecke einen definierten Lateralversatz zu realisieren. Die aufgezeigten Abweichungen besitzen hierauf keinen negativen, sondern im Falle eines sich in dieselbe Richtung bewegenden Hindernis sogar einen positiven Einfluss, da das Egofahrzeug einen zusätzlichen Zeitpuffer zur Realisierung des notwendigen Lateralversatzes gewinnt.

Im kreuzenden Verkehr führt der Aspekt des später am potentiellen Kollisionsbereich Eintreffens jedoch, wie bereits diskutiert, dazu, dass sich das kreuzende Hindernisobjekt ebenfalls relativ zum Egofahrzeug weiterbewegt, wodurch der in diesem Fall notwendige Ausweichversatz ansteigt, und das nach obigen Ansatz geplante Manöver einen zu geringen Lateralversatz berücksichtigt. Als Folge kann die gewünschte Kollisionskonstellation nicht mit ausreichender Sicherheit realisiert, bzw. eine Kollision nicht vermieden werden.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit ein alternativer Ansatz zur Planung des Ausweichmanövers und damit auch der Regelungsvorgaben gewählt. Die zukünftige Position kann auch über das zeitliche Integral der prädizierten Fahrzeuggeschwindigkeit unter Berücksichtigung des zugehörigen Kurswinkels $\psi_{\kappa,pr}$ entsprechend der folgenden Gleichungen (4.16) - (4.17) beschrieben werden¹³¹.

$$x_{pr}(t) = \int_{t_0}^{t} v_{pr}(t') \cdot \cos(\psi_{\kappa, pr}(t')) dt'$$
 (4.16)

$$y_{pr}(t) = \int_{t_0}^{t} v_{pr}(t') \cdot \sin(\psi_{\kappa,pr}(t')) dt'$$
 (4.17)

Die prädizierte Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht dabei der Ausgangsgeschwindigkeit v_o zuzüglich des Integrals der zum Zeitpunkt t_0 wirksamen Längsbeschleunigung bzw. Längsverzögerung $a_{x,soll}$ über der Prädiktionsdauer $t_{präd}$. Bei Annahme einer konstanten Längsverzögerung über dem gewählten Prädiktionszeitraum kann dieser Ausdruck gemäß Gleichung (4.18) vereinfacht werden.

_

¹³¹ Mitschke (2003): Dynamik von Kraftfahrzeugen, S. 552

$$v_{pr}(t) = v_{pr}(t_0) + \int_{t_0}^{t_{pr}} a_x(t_0) dt'$$

$$= v_{pr}(t_0) + a_x(t_0)(t_{pr} - t_0)$$
(4.18)

Der Kurswinkel $\psi_{\kappa,pr}$ ergibt sich wiederum, unter Vernachlässigung der nur schwerlich prädizierbaren Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}$, aus dem zeitlichen Integral der Kurswinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}_{\kappa,pr}$. Je nach prädizierter Fahrzeuggeschwindigkeit kann diese durch das Verhältnis von Sollquerbeschleunigung $a_{y,soll}$ zu Fahrzeuggeschwindigkeit, oder insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten, durch das Verhältnis aus Fahrzeuggeschwindigkeit zu minimalen Kurvenradius¹³², je nachdem welcher der beiden Werte der betragsmäßig geringere ist, ausgedrückt werden (vgl. Abbildung 4-7).

$$\psi_{\kappa,pr}(t) = \int_{t_0}^t \dot{\psi}_{\kappa,pr}(t') \cdot dt'$$
(4.19)

$$\dot{\psi}_{\kappa,pr}(t) \approx \operatorname{sgn}\left(a_{y,soll}\right) \cdot \min\left(\left|\frac{a_{y,soll}}{v_{pr}(t)}\right|, \left|\frac{v_{pr}(t)}{r_{\min}}\right|\right)$$
(4.20)

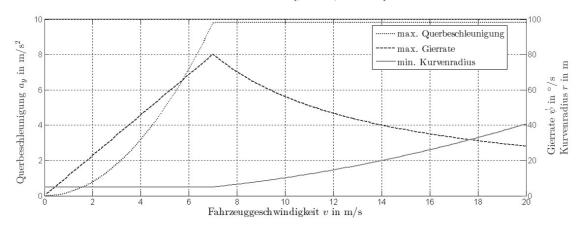


Abbildung 4-7 Begrenzung der max. Gierrate im Modellansatz

Die Vorgabe der Sollbeschleunigungen $a_{x,soll}$ und $a_{y,soll}$ erfolgt wiederum, über die nach Kammschen Kreis maximal übertragbaren Kräfte, die sich bei dem gewählten Punktmassenansatz direkt in die daraus folgenden Beschleunigungen umrechnen lassen. Die maximal übertragbaren Beschleunigungen hängen dabei vom vorliegenden maximalen Kraftschlussbeiwert μ_{max} ab. Die Unsicherheit bei dessen Schätzung (Vgl. Kapitel 3.2.2) findet bei der Planung der Trajektorien entsprechend Berücksichtigung, da es eine Überschätzung des vorliegenden Kraftschlussbeiwertes und damit der übertragbaren Kräfte aufgrund der andernfalls nicht zu realisierenden Trajektorie zu vermeiden gilt.

In der nachfolgenden Abbildung 4-8 sind die auf diese Weise postulierten erreichbaren Positionen im Vergleich zu dem Ansatz nach Kammschen Kreis abgebildet. Es ist ersichtlich, dass es bei gegebener Ausgangsgeschwindigkeit $v_{0,ego} = 50$ km/h ab einer

Angelehnt an Pkw übliche Wendekreise wird im Rahmen der theoretische Betrachtungen von einem minimalen wirksamen Kurvenradius von 5 m ausgegangen

Manöverdauer von ca. 1 s zu einer merklichen Einschnürung des maximal erreichbaren Aufenthaltsbereichs kommt, ansonsten aber grundsätzlich fast identische Positionen realisierbar sind. Ein wesentlicher Unterschied wird aber deutlich, wenn man den zum Erreichen einer definierten Position notwendigen Beschleunigungsvektor γ betrachtet. Der Abbildung ist exemplarisch die Trajektorie beider Ansätze für $\gamma = 90^{\circ}$ zu entnehmen. Es zeigt sich, dass wie zu erwarten, die nach dem vorgeschlagenen, den Kurswinkel berücksichtigenden, Ansatz geplante Westrecke deutlich kürzer ausfällt. Die Abweichungen äußern sich in diesem Fall primär in einer kleineren x-Komponente der Wegstrecke, während ein annähernd identischer Lateralversatz im gleichen Zeitraum realisiert wird. Räumlich betrachtet kann ein definierter Lateralversatz demnach sogar früher erreicht werden als vom vereinfachten Ansatz nach Kammschen Kreis vorhergesagt, was wiederum die Eignung dieses Ansatzes für den Längsverkehr zeigt.

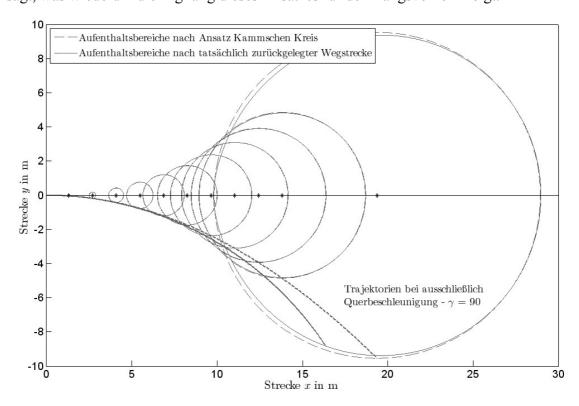


Abbildung 4-8 Mögliche Aufenthaltsbereiche für die zwei Modellansätze bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit v_o =50 km/h

Der Abbildung ist aber ebenfalls zu entnehmen, dass zur "zeitlichen" Maximierung des Lateralversatzes ein Beschleunigungsvektor $\gamma > 90^\circ$ benötigt werden würde, welcher folglich eine Längsbeschleunigungskomponente besitzen würde. Wie in Abbildung 4-9 dargestellt, nimmt der notwendige Beschleunigungsvektor mit steigender Manöverdauer sogar zu und führt folglich zu einer signifikanten Steigerung der Fahrzeuggeschwindigkeit. Bei entsprechender Anpassung der Regelungsvorgaben sind (Abbildung 4-10) annähernd die über den vereinfachten Ansatz geplanten Positionen realisierbar. Selbst nach 1,5 s wäre bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h der absolute Positionsfehler in einem Bereich von lediglich ca. 0,35 m.

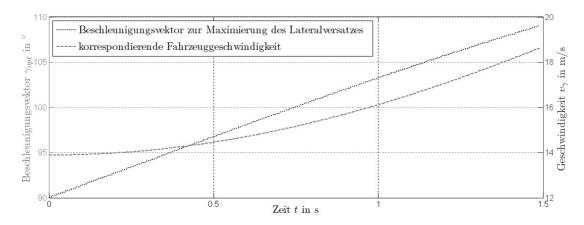


Abbildung 4-9 Entwicklung des notwendigen Beschleunigungsvektors zur Maximierung des zeitlichen Lateralversatzes bei steigender Manöverdauer (v_0 =50 km/h, μ =1)

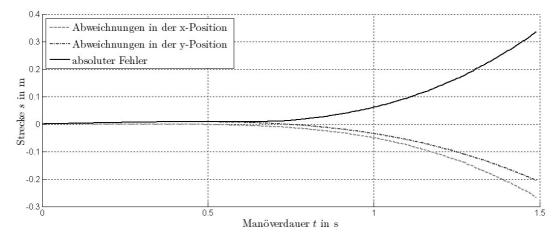


Abbildung 4-10 Positionsfehler bei Optimierung des Beschleunigungsvektors zur Maximierung des zeitlichen Versatzes gegenüber dem einfachen Modell auf Basis des Kammschen Kreises (v_0 =50 km/h, μ =1)

Die Anpassung des Beschleunigungsvektors führt jedoch wie erwähnt zu einer Beschleunigung des Egofahrzeugs; im vorliegenden Beispielfall von v_0 = 50 km/h auf $v_{1.5}$ ≈ 67 km/h nach 1,5 s. Für eine Schutzfunktionalität zur Kollisionsfolgenlinderung ist ein Beschleunigen des Fahrzeugs jedoch abzulehnen.

Eine Beschränkung auf nicht beschleunigte Manöver macht die Unterschiede zwischen den beiden Prädiktionsmodellen deutlich. Bei den in Abbildung 4-11 markierten Bereichen handelt es sich um die Grenzen des Aufenthaltsbereichs, die maximal durch ein nicht beschleunigtes Manöver realisierbar sind. Der realisierbare Kreisausschnitt nimmt dabei mit steigender Manöverdauer ab.

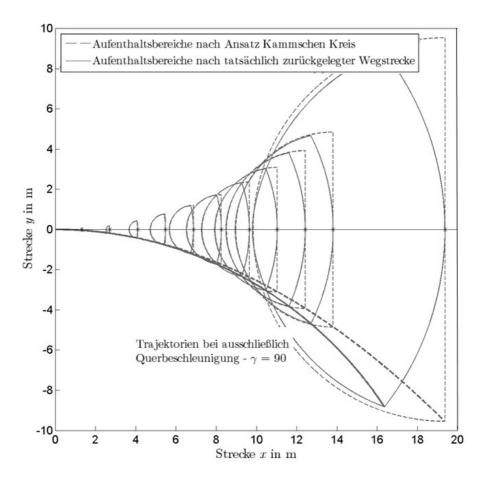


Abbildung 4-11 Maximale Aufenthaltsbereiche bei nicht beschleunigten Manövern nach beiden Modellansätzen (v_0 =50 km/h, μ =1)

Eine Betrachtung der Abweichungen in Bezug auf die Sollposition zeigt hier sehr einprägsam die mit der Manöverdauer wachsende Abweichung zwischen den Ansätzen (Abbildung 4-12).

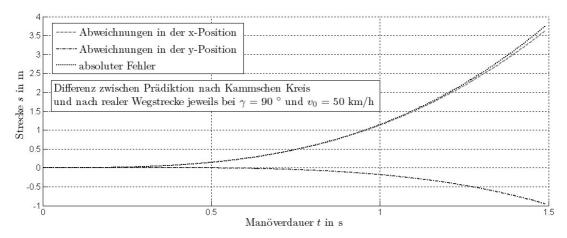


Abbildung 4-12 Positionsfehler des einfachen Modellansatz nach Kamm'schen Kreis bei maximalen Beschleunigungsvektor γ =90° ohne Längsbeschleunigung im Vergleich zur tatsächlich zurückgelegten Wegstrecke (ν_0 =50 km/h, μ =1)

4.2.2 Dynamisches Verhalten und Gegenlenkzeitpunkt

Die Genauigkeit der Prädiktion eines hochdynamischen Ausweichmanövers hängt stark von der Güte der Vorhersage der zeitlichen Beschleunigungsverläufe als auch der Bestimmung des daraus resultierenden Kurswinkels ab. Zusätzlich gilt es, den für ein kollisionsvermeidendes Manöver notwendigen Gegenlenkzeitpunkt situationsunabhängig abzuleiten.

Der Zeitpunkt des letztmöglichen Gegenlenkens hängt dabei primär vom verfügbaren Ausweichraum y_{max} , dem gegebenen Kraftschlussbeiwert μ sowie der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit v_{ego} ab. Eine Möglichkeit für eine näherungsweise Bestimmung dieses Zeitpunktes auf Basis des vorgestellten punktdynamischen Modells ist die zweifache zeitliche Integration der während des Manövers wirksamen Soll-Querbeschleunigung. Abhängig vom zu realisierenden Versatz $y_{e,ego}$ und dem vorhandenem Kraftschlussbeiwert μ setzt sich das Ausweichmanöver, bis zum Erreichen des Sollquerversatzes, dabei aus den folgenden vier Phasen zusammen:

1. Phase: Anlenkphase mit Beschleunigungsaufbau $t_{a,aufb}$

2. Phase: max. Querbeschleunigung $t_{a,max,1}$

3. Phase: Gegenlenkphase (Wechsel der Beschleunigungsrichtung) $t_{a,geg}$

4. Phase: max. Querbeschleunigung in die entgegengesetzte Richtung $t_{a,max,2}$

Die Übergangsbedingungen für die Bestimmung der zeitlichen Länge der Phasen der maximalen Querbeschleunigung $t_{a,max,1}$ und damit des Gegenlenkzeitpunktes $t_{geg} = t_{a,aufb} + t_{a,max,1}$ ergeben sich aus den Nebenbedingungen der nachfolgenden Gleichungen (4.21) - (4.23), wonach am Manöverende idealerweise $v_y = 0$ und $y = y_{max}$ entsprechen sollten.

$$\int_{t_0}^t a_y(t') \cdot dt' = 0 \tag{4.21}$$

$$\int_{t_0}^{t} v_y(t') \cdot dt' = y_{\text{max}} \tag{4.22}$$

mit

$$t = t_{a,aufb} + t_{a,max,1} + t_{a,geg} + t_{a,max,2}$$
 (4.23)

Die nachfolgenden theoretischen Betrachtungen gehen dabei von einer nahezu optimalen Ausnutzung des verfügbaren Kraftschlusspotentials (ca. 90%) während des Notmanövers aus. Um eine Überschätzung des vorhandenen Kraftschlussbeiwertes zu vermeiden, wird das Manöver zusätzlich auf Basis eines um 0,1 kleineren Wertes als geschätzt ausgelegt (vgl. Kapitel 3.2.2). Selbst bei einer Überschätzung des tatsächlichen Reibwertes um diesen Wert sollten demnach immer noch ausreichend Seitenkräfte übertragen werden können, so dass hinsichtlich der Realisierbarkeit des geplanten Manövers keine grundlegenden Änderungen zu erwarten sind.

Der Beschleunigungsaufbau $t_{a,aufb}$, d.h. die Dauer bis zum Aufbau der maximalen Querbeschleunigung (bzw. der Seitenkraft), hängt maßgeblich von der zur Verfügung stehen-

den Aktordynamik ab. Aus fahrdynamischer Sicht ist er darüber hinaus durch den Reifeneinlauf bedingt¹³³, und zusätzlich benötigt die Hinterachse nach dem Einlenken erst einen gewissen Zeitraum, um überhaupt einen Schräglaufwinkel aufzubauen und folglich Kräfte in Seitenrichtung übertragen zu können.

Abbildung 4-13 zeigt hierzu den zeitlichen Verlauf der Querbeschleunigung einer Simulation in IPG CarMaker auf Basis eines Zweispurmodells mit variierten Fahrzeuggeschwindigkeiten und einem initiierten Gegenlenken nach der Realisierung von 1 m Lateralversatz.

Wie ersichtlich, ist die Dauer dieser Phase in den für Ausweichen an innerstädtischen Knotenpunkten relevanten Geschwindigkeitsbereichen zwischen ca. 30 km/h und der Auslegungsgeschwindigkeit von 60 km/h nahezu konstant, so dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit für die Dauer des Querbeschleunigungsaufbaus $t_{a,aufb}$ ein in erster Näherung geschwindigkeitsunabhängiger, durch Simulationsergebnisse gestützter Wert, von 0,35 s angenommen wird.

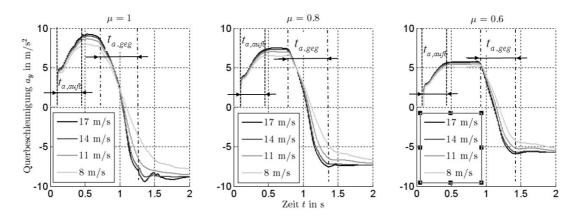


Abbildung 4-13 Zeitlicher Verlauf der Querbeschleunigung bei Ausweichmanöver (Beginn des Gegenlenkens bei 1 m Lateralversatz)

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich in der Gegenlenkphase $t_{a,geg}$, d.h. dem Richtungswechsel während des Ausweichens. Auch diese ist innerhalb des relevanten Bereichs nahezu unabhängig von Geschwindigkeit und Kraftschlussbeiwert (siehe Abbildung 4-13), wobei hier ein Wert von 0,5 s aus der Simulation abgeleitet wird.

Das dynamische Verhalten, insbesondere beim An- und Gegenlenken kann mit dem vorgestellten einfachen punktdynamischen Ansatz jedoch nicht vollständig abgebildet werden. Die Vernachlässigung der nur schwerlich mit einem solchen Ansatz prädizierbaren Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}$, die das zeitliche Verhalten zwischen Kursrate $\dot{\psi}_{\kappa}$ und Gierrate $\dot{\psi}_{\nu}$ beschreibt, würde die aus der vorgegebenen Querbeschleunigung resultierende Gierrate überschätzen, und wird deshalb in Form eines geschwindigkeits-

-

¹³³ Vgl. Haken (2008): Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, S.58

abhängigen Offsets Δt_{ψ}^{134} bei der Ableitung der Kursrate $\dot{\psi}_{\kappa}$ und folglich des Kurswinkels ψ_{κ} aus dem Beschleunigungsverlauf berücksichtigt (siehe Abbildung 4-14).

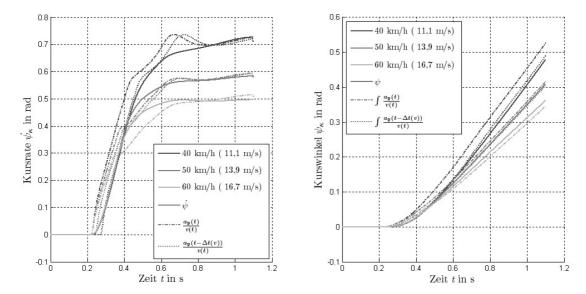


Abbildung 4-14 Verlauf von Kursrate (links) und Kurswinkel (rechts) aus der Simulation sowie durch Schätzung aus dem Querbeschleunigungs- und Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Geschwindigkeiten ($\mu = 1$)

Die beim Aufbau der Längsverzögerung vorhandene Schwellzeit (Zeitdauer bis zum Aufbau der maximalen Verzögerung) findet ebenfalls durch eine entsprechende Ansprechphase $t_{ansp,brake} = 2 \cdot \tau_{brake} = 0,2$ s, für die ein konstanter Anstieg der Längsverzögerung postuliert wird, Berücksichtigung. Die Anlege- bzw. Ansprechzeit der Bremsanlage wird an dieser Stelle vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass ein Anlegen der Bremsbeläge an die Bremsscheibe schon zu einem früheren Zeitpunkt (abhängig von der Situationskritikalität) vor der eigentlichen Manöverinitiierung erfolgt, wie aus sogenannten Electronic Brake Prefill (EBP)-Funktionen¹³⁵ bekannt, und somit keinen weiteren Einfluss auf das eigentliche Manöver besitzt.

Der auf diese Weise nach den Gleichungen (4.21) - (4.23) gewonnene Gegenlenkzeitpunkt t_G ist sehr sensitiv auf Änderungen des vorliegenden Kraftschlussbeiwertes. So führt beispielsweise ein zu gering angenommenes μ_{pred} zu einem deutlich größeren Querversatz als geplant und umgekehrt. Um dies kompensieren zu können, wird t_G nicht als zeitlicher Kennwert genutzt, sondern die diesem Zeitpunkt zugrundeliegende Querablage bei geschätztem Kraftschlusspotential $y(t_G)$. Ist das Kraftschlusspotential nun geringer als geplant, verschiebt sich das Gegenlenken zeitlich nach hinten und bei einem höheren Kraftschlusspotential wird früher gegengelenkt.

Trotz dieser Anpassungen führt das dynamische Verhalten zwischen Aufbau der Querbeschleunigung und dem daraus resultierenden Kurswinkel, sowie die Vernachlässigung

 $^{^{134} 0 - 80 \}text{ ms (für v=} 60 - 30 \text{ km/h)}$

¹³⁵ van Zanten et al. (2012): Bremsenbasierte Assistenzfunktionen, S.388 f.

der Längsverzögerung bei der Berechnung der Gegenlenkposition, zu Abweichungen zwischen der maximal möglichen Manöverbreite y_{max} und der im Modellansatz geplanten Manöverbreite y_{pred} . Wie Abbildung 4-14 zu entnehmen, sind hier die zuvor genannten Abweichungen in Abhängigkeit der maximalen Manöverbreite und der jeweiligen Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen. Diese liegen in einer Größenordnung von ± 0.1 m, und sind bei der Bestimmung der maximal zulässigen Manöverbreite zusätzlich zu den Unsicherheiten die durch die Umfelderfassung zu erwarten sind, entsprechend zu berücksichtigen.

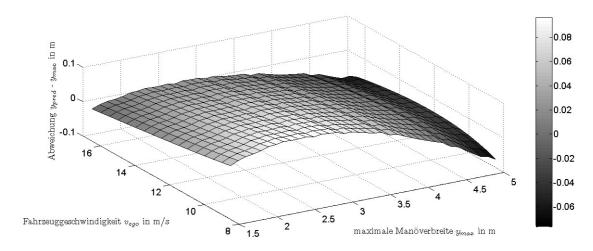


Abbildung 4-15 Modellfehler in Bezug auf den gewünschten maximalen Versatz

4.2.3 Einfluss Gegenlenkzeitpunkt

Als Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Ausweichmanöver gilt, dass der verfügbare Ausweichraum y_{max} größer gleich dem notwendigen Ausweichversatz $y_{e,ego}$ sein muss. Bei einem in Bezug auf den Auslöseabstand "optimal" ausgelegten Manöver würde das Gegenlenken erst bei bzw. nach Passieren des Hindernisses initiiert werden, da ab dem Zeitpunkt des Gegenlenkens der streckenbezogene zusätzlich aufgebaute Lateralversatz abnimmt, bis dieser beim Nulldurchgang der Querbeschleunigung sogar negative Werte annimmt. Je geringer die verfügbare Ausweichbreite y_{max} im Verhältnis zum notwendigen Ausweichversatz $y_{e,ego}$ ist, desto früher muss folglich gegengelenkt werden, und desto größer ist der notwendige Streckenbedarf zur Realisierung eines definierten Lateralversatzes.

In den nachfolgenden Abbildungen sind auf der jeweils linken Seite exemplarisch für Fahrzeuggeschwindigkeiten $v_{ego} = 50$ und 60 km/h sowie Kraftschlussbeiwerte $\mu = 1$ und 0.8 der aus unterschiedlichen Gegenlenkzeitpunkten resultierende Lateralversatz über der Wegstrecke, für ein nicht verzögertes Ausweichmanöver (v_{ego} = konst.), dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass der innerhalb einer gewissen Wegstrecke x realisierbare Versatz mit steigendem v_{ego} oder sinkenden μ geringer ausfällt.

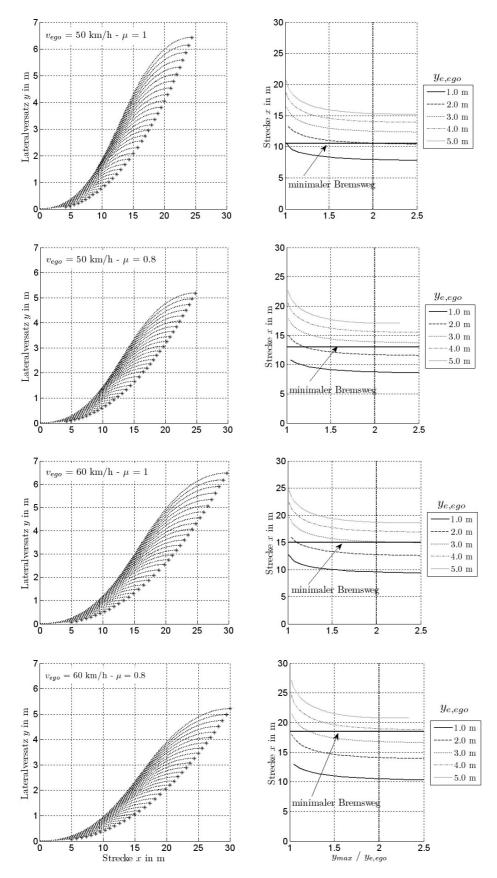


Abbildung 4-16 Beispiele für den je nach Gegenlenkzeitpunkt realisierten Lateralversatz über der Wegstrecke für verschiedene v_{ego} und μ (links) und daraus abgeleitet die notwendige Wegstrecke zur Realisierung eines definierten Versatzes $y_{e,ego}$ bei gegebener maximaler Manöverbreite y_{max} ausgetragen über $y_{max} / y_{e,ego}$ (rechts)

Auf der rechten Seite ist der jeweils notwendige Streckenbedarf zur Realisierung verschiedener definierter Lateralversätze über dem Verhältnis aus verfügbarem Ausweichraum und notwendigen Lateralversatz aufgetragen. Es zeigt sich, dass wie zu erwarten zunächst der notwendige Streckenbedarf mit steigendem Verhältnis $y_{max}/y_{e,ego}$ sinkt. Erst ab einem Verhältnis von ca. 2:1, angedeutet durch die gepunktete Linie, hat ein zusätzlicher Ausweichraum kaum bzw. keinen Einfluss mehr auf den erforderlichen Streckenbedarf. Die schwarze waagerechte Linie stellt dabei für die jeweilige Geschwindigkeit den nach identischen Modellannahmen errechneten minimalen Bremsweg dar. Hierbei wird wiederum deutlich, dass mit geringer werdendem Verhältnis $y_{max}/y_{e,ego}$ bereits bei deutlich kleineren notwendigen Lateralversätzen, als aus einer reinen Betrachtung der Fahrdynamik folgend, das Bremsmanöver die letztmögliche Alternative zur Kollisionsvermeidung darstellt. Beispielsweise benötigt, wie Abbildung 4-16 (oben) zu entnehmen, ein Ausweichmanöver mit 1,5 m Lateralversatz nach den vorliegenden Modellannahmen einen Abstand zum Hindernis von ungefähr 9 m, wenn keine Einschränkungen hinsichtlich des Ausweichraums vorliegen. Sind jedoch nur diese 1,5 m zum Ausweichen zur Verfügung, muss zeitlich früher gegengelenkt werden, und ein erfolgreiches Manöver benötigt entsprechend nahezu 11,5 m Abstand zum potentiellen Hindernis. Bei einem minimalen Bremsweg von etwas über 10 m käme es in diesem Fall alleine aufgrund der räumlichen Gegebenheiten zu einem Wechsel im letztmöglichen die Kollision vermeidenden Manöver.

4.3 Theoretisches Potential

Auf Basis des vorgestellten Modellansatzes sowie der in Kapitel 2 hergeleiteten zulässigen Eingriffszeitpunkte und Eingriffsalternativen, wird folgend das daraus resultierende situationsabhängige theoretische Potential der unterschiedlichen Alternativen in der Simulation hergeleitet. Ziel der nachfolgenden Abschnitte ist dabei die Beantwortung der Fragen nach der konstellationsabhängig effektivsten Eingriffsalternative, d.h. in welchen Fälle ist zumindest theoretisch unter rein fahrdynamischen Gesichtspunkten eine Kollisionsvermeidung möglich, wenn ja, mit welcher Manöverausprägung, und falls nicht, inwieweit lassen sich die Folgen, ausgedrückt durch die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit des Egofahrzeugs, lindern.

4.3.1 Adressierbare Szenarien

Die vorherigen Abschnitte haben gezeigt, dass es insbesondere im Bezug auf die Kollisionsvermeidung nicht das szenarienunabhängig optimale Manöver gibt, sondern dessen Ausgestaltung sehr von der jeweiligen Konstellation abhängt.

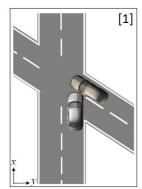
Da sich ein die Kollision zeitlich vermeidendes Manöver entgegen der Bewegungsrichtung des Hindernisses ohne ein aufeinander abgestimmtes kooperatives Verhalten beider

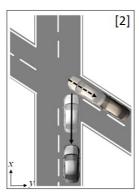
Beteiligter nicht absichern lässt, wird dieses im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet. Für ein kombiniertes, entgegen der Bewegungsrichtung ausgeführtes die Kollisionsfolgen linderndes Manöver gilt selbiges, da dieses aufgrund der damit verbundenen Gefahr der ungünstigen Verlagerung des Kollisionspunktes bei gleichzeitiger Verschlechterung (Vergrößerung) des Kollisionswinkels ebenfalls abzulehnen ist.

In den vorherigen Kapiteln ist hergeleitet worden, dass ein Eingriff für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer erst zum letztmöglichen Zeitpunkt mit dann maximaler Intensität zu empfehlen ist. Letztmöglich ist in diesem Zusammenhang als der Zeitpunkt zu verstehen, zu dem gerade noch eines der beteiligten Fahrzeuge die Kollision vermeiden kann, d.h. aus Sicht des Egofahrzeugs darf erst dann eingegriffen werden, wenn das potentielle Kollisionsobjekt diese nicht mehr vermeiden kann. Eine die Kollision vermeidende Notbremsung kommt zu diesem Zeitpunkt noch dann in Frage, wenn sie die Kollision räumlich vermeidet. Als Alternative zum Bremsen verbleibt gemäß obiger Zusammenhänge noch ein Ausweichen in Bewegungsrichtung des Hindernisses. Je nach Eingriffsziel kommt hierbei entweder ein ausschließlich quergeregeltes (Kollisionsvermeidung) oder kombiniertes (Kollisionsfolgenlinderung) Manöver in Frage. Ziel ist die Minimierung der Kollisionsgeschwindigkeit, unter der Randbedingung eines Kollisionspunktes außerhalb der Fahrgastzelle sicherzustellen, so dass eine Querregelung erst dann in Frage kommt, wenn eine Notbremsung mit maximaler Verzögerung zu einer Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle führen würde. Lässt sich eine solche Konstellation durch keine der Maßnahmen verhindern, so wird im vorliegenden Ansatz zumindest noch die Kollisionsgeschwindigkeit durch eine einfache Notbremsung minimiert. Eine Diskussion der Frage inwieweit ein ausbleibender Eingriff die effektivere Alternative darstellen könnte, wird aufgrund des unsicheren Verhaltens des Hindernisobjektes außer Acht gelassen.

4.3.1.1 Methodik

In den nachfolgenden Abschnitten wird anhand obigen Modellansatzes das theoretische Potential der unterschiedlichen Eingriffsvarianten gemäß des in Abbildung 4-17 skizzierten Vorgehens hergeleitet.





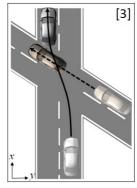


Abbildung 4-17 Zeitlicher Ablauf der Analyse des Vermeidungs- und Linderungspotentials

Ausgehend von einer systematischen Variation der möglichen Kollisionskonstellationen, ausgedrückt durch die Fahrzeuggeschwindigkeiten v_{ego} und v_{obs} , den Annäherungswinkel AW bzw. Kollisionswinkel KW sowie den von diesem abhängigen Kollisionspunkten, beschrieben durch die Fahrzeugverlagerung $s_{c,ego}$ und $s_{c,obs}$ [Position 1], wird auf die jeweiligen Fahrzeugpositionen zum Zeitpunkt, zu dem das Hindernisobjekt die Kollision gerade nicht mehr vermeiden kann [Position 2] zurückgerechnet (siehe Kapitel 2.2.2.3). Ausgehend von diesen Positionen wird dann das Vermeidungspotential eines Notbremsmanövers bzw. Ausweichmanövers untersucht [Position 3], wobei in dieser theoretischen, auf das fahrdynamische Potential abzielenden Betrachtung für das Ausweichmanöver von einer max. Ausweichbreite von 7,5 m ausgegangen wird. Hierbei handelt es sich um eine optimistische Abschätzung, für eine Straße mit zwei Richtungsfahrstreifen bei einer angenommenen Fahrstreifenbreite von 2,5 m.

Die Entscheidung darüber, inwieweit eine Kollision vermieden werden kann, hängt davon ab, ob sich die Fahrzeuge auf der Ausweichtrajektorie berühren oder nicht. Für das Hindernisobjekt wird dabei als zu erwartenden worst-case von einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit ausgegangen, d.h. das Hindernisobjekt reagiert nicht auf die Annäherung.

Innerhalb dieser Analyse werden die Fahrzeuggeschwindigkeiten v_{ego} und v_{obs} , der Kollisionswinkel KW sowie der Kollisionspunkt KP gemäß Tabelle 4-1 variiert, so dass die nachfolgenden Ergebnisse für jeden einzelnen KW auf 171.941 (KW \leq 90°) bzw. 219.373 (KW \geq 90°) Einzelkonstellationen, bestehend aus je einer Ausprägung von v_{ego} , v_{obs} , KW und KP, beruhen.

Tabelle 4-1 Variationsparameter und Ausprägung für Bewertung des theoretischen Potentials

Variationanarameter	Variationsbereich	Schrittweite	Anzahl
Variationsparameter	variationsocieich		Ausprägungen
v_{ego}	1 m/s- 20 m/s 0,25 m/s		77
v_{obs}	1 m/s - 20 m/s	0,25 m/s	77
KW	60° - 120°	15°	5
KP	siehe Kapitel 2.2.2.1	0,5 m	37 (KW≤90°)
			29 (KW>90°)

Allen nachfolgenden Untersuchungen liegt ein Kraftschlussbeiwert Reifen-Fahrbahn von $\mu = 1$ zugrunde.

4.3.1.2 Kollisionsvermeidung

Eine Konstellation wird nachfolgend dann als durch ein Ausweichmanöver vermeidbar definiert, wenn dieses nicht ohnehin bereits durch eine Notbremsung erfolgreich vermieden werden kann, d.h. es werden hier nur Fälle betrachtet, für die der Abstand zum Kollisionsbereich zum Zeitpunkt der potentiellen Auslösung geringer ist als der mini-

male Bremsweg in der jeweils vorliegenden Situation. Es handelt sich somit um eine reine Differenzbetrachtung der zusätzlich, theoretisch durch Ausweichen, vermeidbaren Kollisionskonstellationen.

Global betrachtet ergibt sich bei der hier, nach Tabelle 4-1, gewählten Granularität der Differenzierung der möglichen Ausgangskonstellationen das Tabelle 4-2 zu entnehmende theoretische Potential zur Vermeidung einer Kollision.

Tabelle 4-2 Übersicht über den durch Bremsen oder Ausweichen vermeidbaren Anteil an potentiellen Kollisionskonstellationen in Abhängigkeit des Annäherungswinkels

Annäherungswinkel	Bremsen	Ausweichen	Keine Vermeidung
[in °]	[in %]	[in %]	[in %]
60	50,36	7,63	41,96
75	50,36	7,75	41,89
90	50,02	6,85	43,13
105	50,02	16,87	33,11
120	50,02	20,22	29,76
Ø	50,16	11,86	37,98

Es zeigt sich, dass in annähernd der Hälfte aller simulierten Einzelkonstellationen unabhängig vom Annäherungswinkel AW zum Zeitpunkt des zulässigen Systemeingriffs ein Notbremsmanöver bereits ausreicht, um die drohende Kollision zu vermeiden. Das zusätzliche Potential durch Ausweichen hängt stark vom jeweiligen Annäherungswinkel ab, und variiert zwischen ca. 7 % und 20 %. Der geringere Anteil an durch Ausweichen adressierbaren Szenarien bei kleinen Annäherungswinkeln ist durch die damit verbundenen Bewegungsrichtungen begründet. Die vom Kosinus des Annäherungswinkels AW abhängigen anteiligen gleichgerichteten Geschwindigkeitskomponenten beider Fahrzeuge, führen bei AW kleiner 90° dazu, dass sich der Vorgang des Passierens des Hindernisobjektes über eine größere Wegstrecke und damit auch längere Zeitdauer hinzieht. Da das Hindernisobjekt aber weiterhin auch eine Geschwindigkeitskomponente senkrecht zum Egofahrzeug aufweist, vergrößert sich damit auch automatisch die notwendige Querablage, weshalb eine deutlich geringere Anzahl der betrachteten Kollisionskonstellationen durch ein Ausweichmanöver adressiert werden kann. Umgekehrt verhält es sich bei Annäherungswinkeln größer 90°. Durch die in diesem Fall entgegengesetzt wirkenden Geschwindigkeitskomponenten verkürzt sich das Passieren des Hindernisses merklich, weshalb hier ein größerer Anteil unter den gegebenen Randbedingungen vermeidbar ist.

In den nachfolgenden Abbildung 4-18 - 4-22 sind für die verschiedenen Kombinationen aus Ego- und Hindernisgeschwindigkeit nochmals detailliert die vermeidbaren Konstellationen aufgetragen. Die unterschiedlichen Kollisionspunkte sind dabei entsprechend der unten folgenden Legende in verschiedenen Graustufen und durch entsprechende

Nummerierungen kenntlich gemacht, wobei zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit einige Konstellationen nochmals grafisch hinterlegt sind.

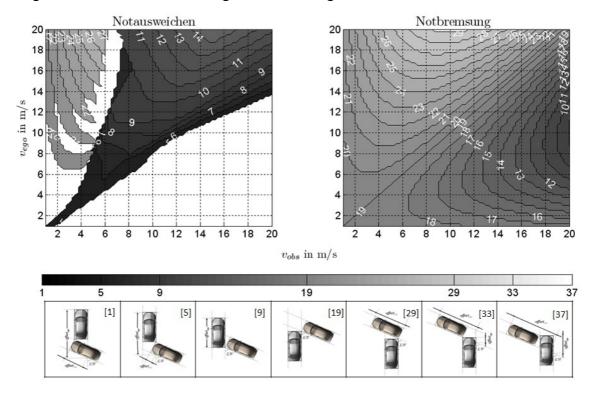


Abbildung 4-18 Durch Bremsen oder Ausweichen vermeidbare Kollisionskonstellationen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeiten für einen prädizierten Kollisionswinkel $\alpha_{koll} = 60^{\circ}$

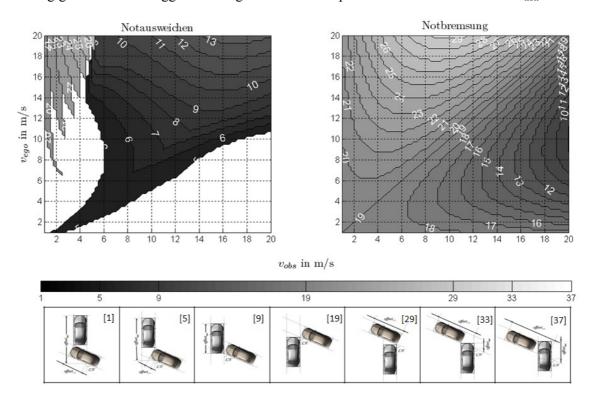


Abbildung 4-19 Durch Bremsen oder Ausweichen vermeidbare Kollisionskonstellationen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeiten für einen prädizierten Kollisionswinkel $\alpha_{koll} = 75^{\circ}$

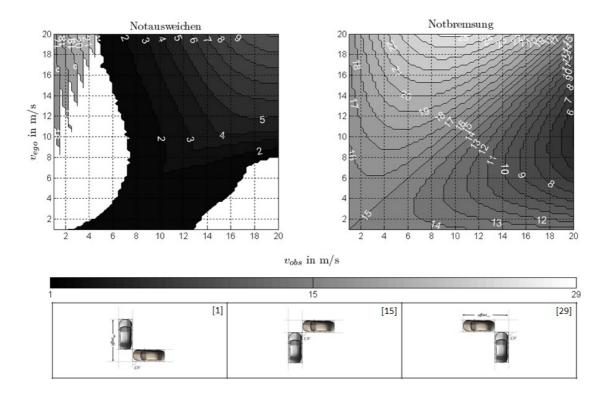


Abbildung 4-20 Durch Bremsen oder Ausweichen vermeidbare Kollisionskonstellationen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeiten für einen prädizierten Kollisionswinkel $\alpha_{koll} = 90^{\circ}$

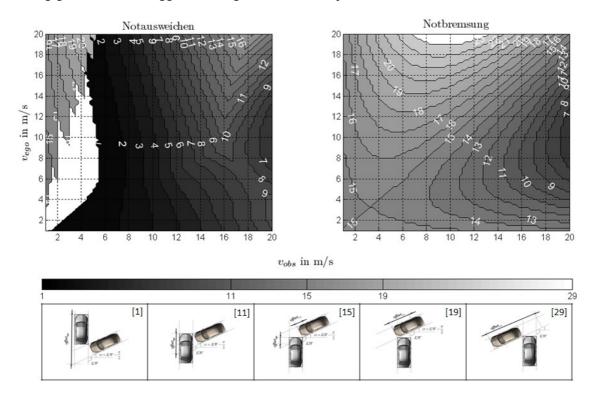


Abbildung 4-21 Durch Bremsen oder Ausweichen vermeidbare Kollisionskonstellationen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeiten für einen prädizierten Kollisionswinkel α_{koll} = 105°

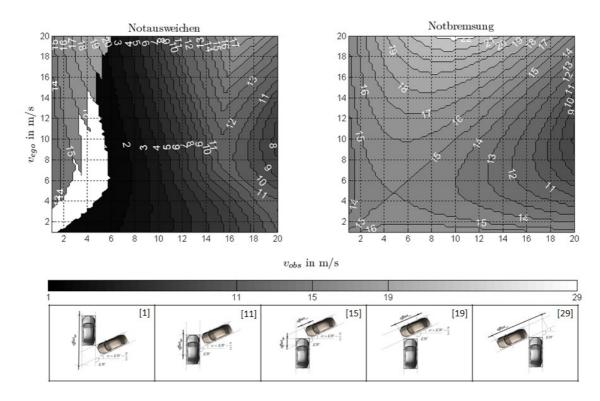


Abbildung 4-22 Durch Bremsen oder Ausweichen vermeidbare Kollisionskonstellationen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeiten für einen prädizierten Kollisionswinkel α_{koll} = 120°

Hierbei wird deutlich, dass, wie nicht anders zu erwarten, grundsätzlich Konstellationen mit einer niedrigen Ordnungszahl, das heißt einer tendenziell geringen notwendigen Querablage für ein Ausweichmanöver prädestiniert sind. Es zeigt sich aber auch, dass insbesondere bei sehr geringen Hindernisgeschwindigkeiten selbst die aus Sicht des Egofahrzeugs letztmögliche Konstellation (Ordnungszahl 1) nicht durch Ausweichen vermeidbar ist. Dies liegt an dem mit dieser Konstellation verbundenen zulässigen Eingriffszeitpunkt. Selbst unmittelbar vor der Kollision wäre hier das Hindernisobjekt noch in der Lage, diese durch Bremsen zu vermeiden, so dass sich das Egofahrzeug bei einer eigenen Manöverinitiierung bereits im Kollisionsbereich befindet, und aufgrund von Systemansprechzeiten und der mit dem Ausweichmanöver verbundenen Geschwindigkeitsreduzierung in der kurzen verbleibenden Zeit kein Relativversatz zum Hindernis realisiert werden kann. Dafür sind unter den gegebenen Randbedingungen aber selbst Konstellationen, die eine sehr große Querablage verlangen (Ordnungszahlen größer 20 – der hellgraue Bereiche in den Diagrammen) bei geringen Hindernisgeschwindigkeiten zusätzlich durch Ausweichen zu vermeiden. Dieser scheinbare Widerspruch lässt sich wiederum durch den mit diesen Kollisionskonstellationen verknüpften zulässigen Eingriffszeitpunkt erklären. Bei den hier betrachteten Trefferlagen und Geschwindigkeitskombinationen befindet sich das Egofahrzeug zu dem Zeitpunkt, zu welchem das Hindernis die Kollision nicht mehr eigenständig vermeiden kann, noch relativ weit entfernt zum Kollisionsbereich, so dass hier zwar keine erfolgreiche Notbremsung mehr möglich, aber ein Ausweichmanöver die Kollision noch vermeiden kann.

Ein weiteres überraschendes Ergebnis ist, dass bei gegebener Egogeschwindigkeit, Konstellationen, die eine größere Querablage erfordern, tendenziell bei höheren Hindernisgeschwindigkeiten möglich sind. Hier besitzt der von der Hindernisgeschwindigkeit abhängige Eingriffsabstand einen größeren positiven Effekt auf den realisierbaren Relativversatz, als dass durch die mit dem Ausweichmanöver verbundene zeitliche Komponente, infolge der höheren Hindernisgeschwindigkeit, verloren geht.

4.3.1.3 Kollisionsfolgenlinderung

Unter dem gegebenen Optimierungsziel der maximalen Reduzierung der Kollisionsgeschwindigkeit unter der Randbedingung der Vermeidung einer Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle eines der Beteiligten, falls möglich, ergeben sich die Tabelle 4-3 zu entnehmenden Manöverausprägungen.

Tabelle 4-3 Übersicht hinsichtlich der Manöverausprägung bei nicht vermeidbaren Konstellationen in Abhängigkeit des Annäherungswinkels

Annäherungswinkel	Bremsen		Kombiniertes	Zeitliche/räumliche
[in °]	[in %]		Ausweichen	Vermeidung
[111]	Sollposition	Fahrgastzelle	[in %]	[in %]
60	35,74	55,60	8,61	0,05
75	35,05	49,81	15,13	0,01
90	37,17	46,44	16,39	≪ 0,01
105	49,63	40,73	9,61	≪ 0,01
120	60,92	31,82	7,26	≪ 0,01

Hier zeigt sich, dass für den mit Abstand größten Anteil der Fälle unabhängig vom Annäherungswinkel ein vermeintlich einfaches Notbremsmanöver die zu empfehlende Alternative darstellt. Es bleibt jedoch auch festzuhalten, dass abhängig vom Annäherungswinkel bei ca. 30 - 55 % der nicht vermeidbaren prädizierten Kollisionskonstellationen ein entsprechendes Manöver eine Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle eines der beiden Beteiligten nicht vermeiden kann. Ein kombiniertes Ausweichmanöver kommt unter den gewählten Auslegungskriterien mit ca. 8 % - 16 % nur in einem relativ geringen Anteil der verbleibenden Fälle zum Tragen. An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass unter der getroffenen Annahme eines sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegenden Hindernisobjektes in einigen wenigen Fällen, unabhängig von der gewählten Manöverausprägung, die Kollision durch räumliches Passieren hinter dem Hindernisobjekt vermieden wird. Die diesen Fällen zugrundeliegenden Konstellationen (schnelles Hindernisobjekt) führen dazu, dass unabhängig von der Art der Reaktion im Egofahrzeug immer ausreichend Relativversatz zum Hindernis aufgebaut wird, so dass das Egofahrzeug hinter diesem passiert. Das theoretische Potential einer zeitlichen Kollisionsvermeidung ist dabei natürlich deutlich höher als die in der Tabelle angegebenen Werte, doch ist dieses Manöver wie bereits erwähnt, für ein vorfahrtberechtigtes Fahrzeug,

ohne ein kooperativ aufeinander abgestimmtes Verhalten beider Beteiligter nicht abzusichern, d.h. es ist mit einem größerem Risiko verbunden.

In Abbildung 4-23 ist die mit obigen Manövern verbundene Reduzierung der Kollisionsgeschwindigkeit des Egofahrzeugs sowie die Reduzierung des Kollisionswinkels als kumulierte Häufigkeitsverteilung aufgetragen. Hierbei wird deutlich, dass aufgrund des teils erst sehr späten Eingriffszeitpunktes winkelunabhängig in ca. 10 % aller Konstellationen keine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit möglich ist, während auf der anderen Seite abhängig vom Annäherungswinkel in ca. 15 % bis 25 % der Fälle das Egofahrzeug noch vor der Kollision in den Stillstand gebracht werden kann. Dies ist jedoch nicht so zu verstehen, dass es in diesen Fällen zu keiner Kollision kommt, sondern dass hier lediglich das Egofahrzeug im Kollisionsbereich zum Stehen kommt und dort im Nachgang seitlich vom Hindernisobjekt getroffen wird.

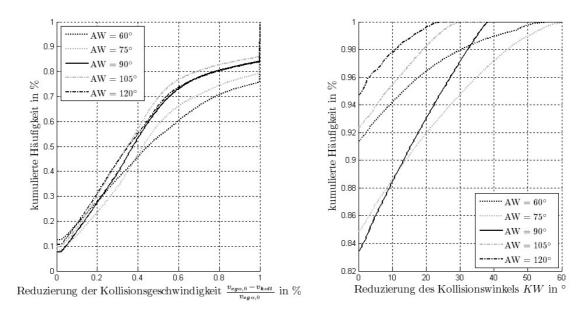


Abbildung 4-23 Kumulierte Verteilung der Reduzierung von Kollisionsgeschwindigkeit und Kollisionswinkel bei den die Unfallfolgen lindernden Systemeingriffen

In Bezug auf den Kollisionswinkel zeigt sich, dass es aufgrund des großen Anteils an Bremsmanövern lediglich in einem geringen Teil <15 % überhaupt zu einer Reduktion des Kollisionswinkels kommt. Je kleiner dabei der Annäherungswinkel desto größer ist dabei die tendenzielle Reduktion. Dies liegt darin begründet, dass bei geringeren Annäherungswinkeln und einem Manöver in Bewegungsrichtung die Kollision im Vergleich zu den anderen Konstellationen zeitlich weiter in die Zukunft verschoben wird, und zwar so, dass das Manöver über eine längere Zeitdauer andauert.

Abschließend zeigt Abbildung 4-24 beispielhaft¹³⁶ für die grafisch aufbereitete Ausgangskollisionskonstellation das Linderungspotential für verschiedene Geschwindigkeitskombinationen in Form des zur Minimierung der Kollisionsgeschwindigkeit zu

¹³⁶ Weitere Konstellationen sind dem Anhang 8.2 zu entnehmen

wählenden Beschleunigungsvektors γ_{CM} , sowie die daraus resultierenden Geschwindigkeits- und Kollisionswinkeländerungen.

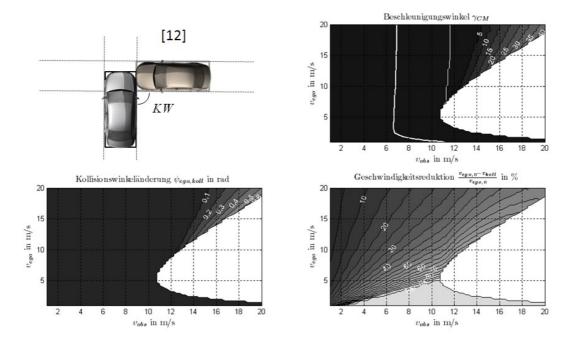


Abbildung 4-24 Beispiel des Linderungspotentials aus Sicht des Egofahrzeugs für eine exemplarische Ausgangskollisionskonstellation bei $AW = 90^{\circ}$

Die dickere weiße, hauptsächlich senkrecht verlaufende, Linie im oberen Diagramm zeigt für die exemplarischen Konstellation die Grenze, ab der überhaupt erst eine Vermeidung einer Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle des Egofahrzeugs möglich ist, und die dünnere Linie wiederum den Übergang von einer Kollision in die Seite des Egofahrzeugs auf eine Kollision in die Seite des Hindernisobjektes. Die nicht ausgefüllten Bereiche in den Diagrammen entsprechen den Konstellationen, in denen eine Kollision ganz vermieden werden kann. Es zeigt sich, dass insbesondere die Kombinationen aus hoher Ego- und geringer Hindernisgeschwindigkeit lediglich ein sehr geringes Linderungspotential besitzen, da in diesen Konstellationen das Hindernisfahrzeug noch sehr kurzfristig die Kollision vermeiden könnte und somit bei dem verwendeten Algorithmus ein Eingriff im Egofahrzeug erst sehr spät erfolgt.

Ein kombiniertes Manöver kommt nur bei Kombinationen, in denen beide Fahrzeuge eine hohe Geschwindigkeit aufweisen, zum Tragen, da andernfalls der Kollisionspunkt in die Fahrgastzelle des Egofahrzeugs verlagert werden würde. Diese Kombinationen wären zwar auch für eine zeitliche Kollisionsvermeidung durch bremsen prädestiniert, da bei hohen Hindernisgeschwindigkeit bereits eine relativ geringe Verzögerung im Egofahrzeug ausreicht, um dieses passieren zu lassen, doch ist dies aus den bereits genannten Gründen abzulehnen.

4.4 Zwischenfazit

Die in diesem Kapitel durchgeführten theoretischen Betrachtungen hinsichtlich des fahrdynamischen Potentials des vorgestellten Schutzkonzeptes zeigen, in welchen Konstellationen welches Manöver zu empfehlen und welches theoretische Vermeidungs- und Linderungspotential, zumindest in Bezug auf die Kollisionsgeschwindigkeit des Egofahrzeugs, damit verbunden ist. So lassen sich je nach Annäherungswinkel zwischen 60 % und 70 % aller theoretisch möglichen Konstellationen rein fahrdynamisch betrachtet vermeiden, wobei ein Großteil bereits durch ein Notbremsmanöver darstellbar ist. Auch bei der Kollisionsfolgenlinderung ist in den meisten Situationen Bremsen die zu empfehlende Maßnahme. Lediglich in Fällen hoher Geschwindigkeiten beider Fahrzeuge wird ein kombiniertes Ausweichen relevant, gerade diese Kombinationen dürften jedoch aus Sicht der Verkehrssicherheit von großem Interesse sein.

Die bisherigen Betrachtungen erlauben jedoch noch keinen Rückschluss auf die potentielle Wirksamkeit eines solchen Schutzkonzeptes, da sie auf einer grundsätzlichen systematischen Variation der theoretisch denkbaren Konstellationen beruhen, d.h. unabhängig vom realen Unfallgeschehen sind. Es ist davon auszugehen, dass nicht jede der betrachteten Konstellationen mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten, so dass hier noch einige Verschiebungen zu erwarten sind.

Darüber hinaus haben bei der Ableitung des theoretischen fahrdynamischen Potentials weder die mit einem solchen Manöver einhergehenden Anforderungen an die maschinelle Umfelderfassung, noch die ggf. aus der Umsetzung der geplanten Trajektorien, im Rahmen der Trajektorienregelung, resultierenden Abweichungen von der Solltrajektorien, Berücksichtigung gefunden. Beide Aspekte werden in den folgenden Abschnitten betrachtet.

5 Regelungsalgorithmus

Die bisherigen analytischen Betrachtungen beruhen alleine auf den in der Situationsanalyse geplanten Trajektorien und repräsentieren damit den Idealfall. Unter den angenommenen Randbedingungen in Bezug auf den verfügbaren Kraftschluss sowie dessen Ausnutzung bei der Umsetzung stellen die bisherigen Ergebnisse somit das aus Sicht des Egofahrzeugs realisierbare Optimum dar. Die Bewertung der Funktionalität hinsichtlich ihrer Güte und vor allem Robustheit, aber auch ihrer potentiellen Wirksamkeit bezüglich einer Steigerung der Verkehrssicherheit erfordert einen Regelungsalgorithmus zur Umsetzung der geplanten Trajektorie.

Aufbauend auf den zuvor hergeleiteteten Randbedingungen an eine hier diskutierte Schutzfunktionalität, insbesondere in Bezug auf die Ausgestaltung der kollisionsvermeidenden und kollisionsfolgenlindernden Manöver, werden in den folgenden Abschnitten ein exemplarisches, diesen Anforderungen genügendes Regelungskonzept, sowie dessen Umsetzung in den beiden Manövertypen vorgestellt.

5.1 Fahrzeugmodell

5.1.1 Einspurmodell

Im vorliegenden Konzept dient das lineare Einspurmodell¹³⁷ als Grundlage zur Beschreibung der ebenen Fahrzeugbewegung, und darauf aufbauend zur Bestimmung des zur Umsetzung der jeweiligen Trajektorie gesuchten Lenkradwinkels. Dem Modell liegen dabei drei wesentliche vereinfachende Annahmen zugrunde¹³⁸:

- 1. Der Schwerpunkt des Fahrzeugs liegt in Fahrbahnhöhe. Daher besitzen die im Schwerpunkt angreifenden Kräfte keinen Einfluss auf die Radlasten.
- 2. Beide Räder einer Achse werden zu einem Rad zusammengefasst, so dass auch die Schräglaufsteifigkeiten der Räder zur Schräglaufsteifigkeit der jeweiligen Achse zusammengezogen werden.
- 3. Es liegt ein lineares System vor. So ist bspw. die Achsseitenkraft proportional zum Schräglaufwinkel.

-

 $^{^{\}rm 137}$ Bezüglich der, dem Modell zugrundeliegenden, Parameter Vgl. Anhang 8.3

¹³⁸ Vgl. Mitschke (2003): Dynamik von Kraftfahrzeugen, S. 547.

Im Einspurmodell gelten die in Abbildung 5-1 dargestellten kinematischen Zusammenhänge. Betrachtet man beispielsweise eine langsame Kreisfahrt ohne Seitenkräfte ($\alpha_{f/r} = 0$), stellt sich der in Abbildung 5-1 (links) dargestellte Zustand ein, wobei β_0 den geometrischen Schwimmwinkel, R den Kurvenradius, l_f und l_r den Abstand von Vorderbzw. Hinterachse zum Schwerpunkt SP und v, v_f sowie v_r die Geschwindigkeit im Schwerpunkt sowie an den Rädern vorne bzw. hinten beschreiben.

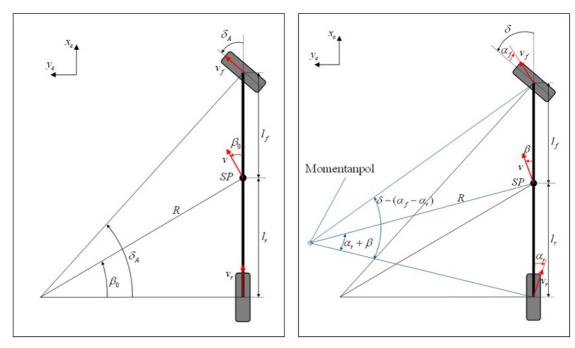


Abbildung 5-1 Einspurmodell – langsame Fahrt (links) - Fahrt mit Seitenkräften (rechts) 139

Aus diesen Zusammenhängen und der Annahme $R \gg l_r$ lässt sich der sogenannte Ackermann-Lenkwinkel

$$\delta_A = \arctan \frac{(l_f + l_r)}{\sqrt{R^2 - l_r^2}} \approx \frac{l}{R}$$
(5.1)

mit $l = l_f + l_r$ ableiten.

Über den Ackermann-Lenkwinkel ergibt sich somit ein direkter Zusammenhang zwischen Lenkwinkel und Kurvenradius *R*.

Wird die Fahrgeschwindigkeit erhöht, steigt bei konstantem Kurvenradius R die notwendige Querbeschleunigung a_y . Dadurch werden Seitenkräfte an den Rädern notwendig, die wiederum Schräglaufwinkel an der Vorder- und Hinterachse erfordern. Unter den veränderten Bedingungen ergibt sich nun Abbildung 5-1 (rechts).

91

¹³⁹ Mit geringfügigen Änderungen entnommen aus Mitschke (2003): Dynamik von Kraftfahrzeugen, S. 567.

Aus den geometrischen Beziehungen in Abbildung 5-1 (rechts) folgt wiederum mit Gleichung (5.1) und der Kleinwinkelnäherung 140

$$R = l \cdot \frac{\sin(90^{\circ} - (\delta - \alpha_f))}{\sin(\delta - (\alpha_f - \alpha_r))} \approx \frac{l}{\delta - (\alpha_f - \alpha_r)}.$$
 (5.2)

Aus Gleichung (5.2) ergibt sich durch Umstellung direkt der Lenkwinkel zu

$$\delta = \frac{l}{R} + (\alpha_f - \alpha_r), \tag{5.3}$$

der um $(\alpha_f - \alpha_r)$ vom Ackermann-Lenkwinkel nach Gleichung (5.1) abweicht. Die Schräglaufwinkel α_f und α_r lassen sich dabei ausdrücken durch

$$\alpha_f = \frac{F_{y,f}}{c_{\alpha,f}} = \frac{1}{c_{\alpha,f}} \cdot \frac{l_r}{l} \cdot m \cdot a_y \tag{5.4}$$

und

$$\alpha_r = \frac{F_{y,r}}{c_{\alpha r}} = \frac{1}{c_{\alpha r}} \cdot \frac{l_f}{l} \cdot m \cdot a_y,$$
 (5.5)

mit den, aus dem Kräftegleichgewicht folgenden, Seitenkräften an den jeweiligen Achsen $F_{y,f}$ und $F_{y,r}$, den Schräglaufsteifigkeiten $C_{\alpha,f}$ und der Fahrzeugmasse m. Aus den Gleichungen (5.3) - (5.5) folgt schließlich der für eine gegebene Querbeschleunigung notwendige Lenkwinkel zu

$$\delta = \frac{l}{R} + \frac{m}{l} \cdot \left(\frac{c_{\alpha,r} \cdot l_r - c_{\alpha,f} \cdot l_f}{c_{\alpha,f} \cdot c_{\alpha,r}} \right) \cdot a_y. \tag{5.6}$$

Mit dem Eigenlenkgradienten

$$EG = \frac{m}{l} \cdot \left(\frac{c_{\alpha,r} \cdot l_r - c_{\alpha,f} \cdot l_f}{c_{\alpha,f} \cdot c_{\alpha,r}} \right)$$
 (5.7)

folgt schließlich eine verkürzte Schreibweise des von der Querbeschleunigung abhängigen Lenkwinkels, bzw. des Lenkradwinkels bei Berücksichtigung der Lenkübersetzung i_s , zu

$$\delta_H = \delta \cdot i_s = i_s \cdot \left(\frac{l}{R} + EG \cdot a_y\right).$$
 (5.8)

Für kleine Winkel x können bei vernachlässigbaren Fehlern folgende Vereinfachungen getroffen werden: sin(x)=x, tan(x)=x und cos(x)=1.

¹⁴¹ Vgl. Mitschke (2003): Dynamik von Kraftfahrzeugen, S. 566.

¹⁴² Vgl. Mitschke (2003): Dynamik von Kraftfahrzeugen, S. 567.

¹⁴³ Vgl. Schorn (2007): Quer- und Längsregelung eines Personenkraftwagens, S. 35.

Bei Gleichsetzen der Zentripetalbeschleunigung v^2/R mit der Querbeschleunigung a_y lässt sich der Kurvenradius R in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Querbeschleunigung berechnen:

$$R = \frac{v^2}{a_v} \,. \tag{5.9}$$

Der Eigenlenkgradient EG lässt sich in Abhängigkeit der charakteristischen Geschwindigkeit v_{char} und des Radstands ausdrücken¹⁴⁵:

$$EG = \frac{l}{v_{obser}^2},\tag{5.10}$$

Wobei die charakteristische Geschwindigkeit von den Schräglaufsteifigkeiten an der Vorder- und Hinterachse, der Schwerpunktlage, dem Radstand sowie von der Fahrzeugmasse abhängt.

$$v_{char} = l \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \cdot \left(\frac{c_{\alpha,f} \cdot c_{\alpha,r}}{c_{\alpha,r} \cdot l_r - c_{\alpha,f} \cdot l_f}\right)}$$
 (5.11)

Mit den Gleichungen (5.8) - (5.11) folgt der ausschließlich durch die fahrzeugfesten Größen Soll-Querbeschleunigung a_y und Geschwindigkeit v beschriebene Lenkradwinkel zu:

$$\delta_H = i_s \cdot a_y \cdot \left(\frac{l}{v^2} + \frac{l}{v_{char}^2}\right). \tag{5.12}$$

5.1.2 Reifenmodell

Mit den genannten Annahmen kann das Fahrverhalten eines Fahrzeugs jedoch nur für Normalsituationen mit ausreichender Genauigkeit beschrieben werden, d.h. mit einer Querbeschleunigung $a_y < 0.4~g$ für welche bei üblichen Reifen von einem linearen Reifenverhalten ausgegangen werden kann. Eine Möglichkeit zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens über diesen Bereich hinaus bietet die Verwendung nichtlinearer Reifen- bzw. Achsschräglaufsteifigkeiten, deren Abhängigkeiten bspw. über funktionale oder tabellarische Beschreibungen berücksichtigt werden können. In der vorliegenden Arbeit findet hierzu die Magic Tyre Formula nach Pacejka 147 Verwendung. Diese lautet in allgemeiner Form

$$y(x) = D \cdot \sin\{C \cdot \arctan[B \cdot x - E \cdot (B \cdot x - \arctan(B \cdot x))]\}$$
 (5.13)

¹⁴⁴ Vgl. Vietinghoff (2008): Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen, S. 73.

¹⁴⁵ Vgl. Schramm et al. (2010): Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, S. 253.

¹⁴⁶ Vgl. Schorn (2007): Quer- und Längsregelung eines Personenkraftwagens, S. 31.

¹⁴⁷ Pacejka (2012): Tire and vehicle dynamics

wobei sie über die Variablen x und y die von Schräglaufwinkel α bzw. Längsschlupf λ_x abhängige Reifenseitenkraft F_y bzw. Reifenlängskraft F_x beschreibt. Der resultierende Verlauf ist in Abbildung 5-2 veranschaulicht.

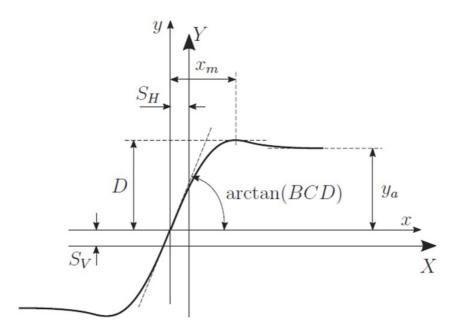


Abbildung 5-2 Darstellung der Magic Tyre Formula; nach: von Vietinghoff (2008)¹⁴⁸

Die den Kurvenverlauf festlegenden Parameter B bis E sind abhängig von der Lage des relativen Maximums x_m , der Asymptote y_a , den, die Ungleichförmigkeit des Reifens beschreibenden, Verschiebungen S_H und S_V , sowie von der Radlast F_z und dem Kraftschlussbeiwert μ_h . Für eine detaillierte Beschreibung des Reifenmodells sowie der Bedeutung und Definition der einzelnen Parameter sei an dieser Stelle auf die Arbeit von Pacejka¹⁴⁹ verwiesen.

Werden Kräfte sowohl in Längs- als auch in Querrichtung übertragen, treten Schräglaufwinkel α und Längsschlupf λ_x simultan auf. Da Kräfte in Längs- und Querrichtung nicht unabhängig voneinander übertragen werden können, ist es notwendig, diese Interdependenz zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit hierzu stellt der Webersche Reibungskuchen dar, der in guter Näherung Reifenkräfte bei kombiniertem Reifenschlupf modelliert. 150

Der kombinierte Reifenschlupf setzt sich demnach aus Längs- und Querschlupf gemäß Gleichung (5.14) zusammen.

$$\lambda_{eff} = \sqrt{\lambda_x^2 + \lambda_y^2} \tag{5.14}$$

-

¹⁴⁸ Vietinghoff (2008): Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen, S.23

¹⁴⁹ Pacejka (2012): Tire and vehicle dynamics

¹⁵⁰ Weber (1981): Reifenführungskräfte bei schnellen Änderungen von Schräglauf und Schlupf

Wird λ_{eff} in die Magic Tyre Formula eingesetzt, ergibt sich die am Reifen wirkende Gesamtkraft zu

$$F_{eff}(\lambda_{eff}) = D \cdot \sin \left\{ C \cdot \arctan \left[B \cdot \lambda_{eff} - E \cdot \left(B \cdot \lambda_{eff} - \arctan \left(B \cdot \lambda_{eff} \right) \right) \right] \right\}. \tag{5.15}$$

Mit $F_{\it eff}$ und dem effektiven Schlupfwinkel

$$\alpha_{\lambda} = \arctan\left(\frac{\lambda_{y}}{\lambda_{x}}\right) \tag{5.16}$$

ergeben sich schließlich die wirksamen Reifenlängskräfte

$$F_{x} = F_{eff} \cdot \cos \alpha_{\lambda} \tag{5.17}$$

und Reifenquerkräfte

$$F_{v} = F_{eff} \cdot \sin \alpha_{\lambda}. \tag{5.18}$$

Für den F_{eff} maximierenden kombinierten Soll-Schlupf $\lambda_{eff,soll}$ gilt nun nach Gleichung (5.14) und λ_{v} ausgedrückt durch

$$\lambda_{y} = \sin\left(\alpha * \frac{c_{\alpha}}{c_{\lambda}}\right) \tag{5.19}$$

mit

$$\alpha^* = \alpha + \frac{c_{\lambda}}{c_{\alpha}} \gamma.^{151} \tag{5.20}$$

der folgende Zusammenhang

$$\lambda_{eff,soll} = \sqrt{\lambda_x^2 + \left(\sin\left(\alpha^* \cdot \frac{c_\alpha}{c_\lambda}\right)\right)^2} \ . \tag{5.21}$$

Hier beschreibt c_{α} die Schräglauf- und c_{λ} die Längssteifigkeit des Reifens sowie γ den Sturzwinkel.

5.2 Kollisionsvermeidendes Ausweichmanöver

In Kapitel 2.3 ist hergeleitet worden, dass ein kollisionsvermeidendes Ausweichmanöver zur Optimierung dessen Potentials möglichst so umzusetzen ist, dass unter Ausnutzung des verfügbaren Ausweichraums der prädizierte Kollisionsbereich schnellstens möglich wieder verlassen wird. Zwar ist für eine Schutzfunktionalität ein Beschleunigen des Egofahrzeugs aus Sicherheitsgründen abzulehnen, doch gilt es aufgrund des Optimierungsziels auch Bremseingriffe während des Manövers zu vermeiden. Dies berück-

-

¹⁵¹ Vgl. Winner (2012): Fahrdynamik und Fahrkomfort, S. 31

sichtigend, verbleibt als einzige Stellgröße zur Realisierung der Fahrzeugtrajektorie der Lenkradwinkel. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle für das kollisionsvermeidende Manöver ganz auf eine Regelung verzichtet, und stattdessen eine einfache Steuerung des Lenkradwinkels nach Abbildung 5-3 verwendet. Das Gegenlenkmanöver wird dabei in Abhängigkeit der realisierten Querablage eingeleitet.

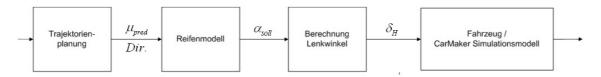


Abbildung 5-3 Lenkwinkelsteuerung – Kollisionsvermeidung

Der aus einem Ausweichmanöver mit Gegenlenken resultierende qualitative Soll-Lenkradwinkelverlauf für ein kollisionsvermeidendes Manöver ist Abbildung 5-4 zu entnehmen. Der idealisierte Verlauf des Lenkradwinkels weist zu Manöverbeginn zur Optimierung des Ansprechverhaltens einen Sprung auf, was eine unendliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit zur Folge hätte. Im realen Fall wird die Lenkradwinkelgeschwindigkeit durch die Leistungsfähigkeit des Lenkaktors begrenzt. Gemäß der Parameter verbauter Lenkaktoren wird im Folgenden von einer maximalen Lenkradwinkelgeschwindigkeit $\left| \dot{\delta}_{H, \max} \right| = 900$ °/s ausgegangen. Das dem Simulationsmodell zugrundeliegende Fahrzeug weist darüber hinaus einen max. Lenkradwinkel $\left| \delta_{H, \max} \right| = 540^\circ$ auf.

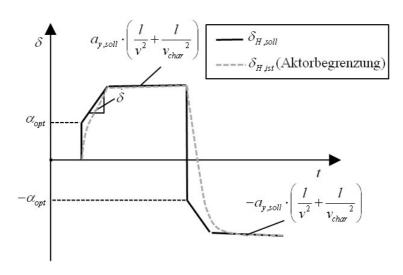


Abbildung 5-4 Soll-Lenkwinkelverlauf (qualitativ) für kollisionsvermeidendes Ausweichmanöver

-

¹⁵² Vgl. Bootz (2004): Closed-Center-Lenksystems für Pkw, S. 44.

Der geschwindigkeitsabhängige Zielwert für den gesuchten Soll-Lenkradwinkel bei maximaler Querbeschleunigung ergibt sich dabei, abhängig von der Ausweichrichtung, direkt aus Gleichung (5.12) unter Verwendung der Soll-Querbeschleunigung $a_{y,soll}$ zu

$$\delta_{H,soll} = i_s \cdot a_{y,soll} \cdot \left(\frac{l}{v^2} + \frac{l}{v_{char}^2}\right). \tag{5.22}$$

Die Vorgabe von $a_{y,soll}$ erfolgt wiederum abhängig vom geschätzten Reibwert μ_{pred} .

Ein Sprung des Lenkwinkels auf einen Wert $\delta \neq 0$ während der Geradeausfahrt resultiert im ersten Moment vollständig im Aufbau des zur Seitenkraftübertragung notwendigen Schräglaufwinkels α_f . Im Einspurmodell gilt für das vordere Rad der Zusammenhang nach Gleichung (5.23)

$$\alpha_f = \delta - \beta - l_f \cdot \frac{\dot{\psi}_v}{v} \tag{5.23}$$

mit dem Schwimmwinkel β und der Gierrate $\dot{\psi}_{\nu}$. Eine nahezu Geradeausfahrt während der Kreuzungsannäherung annehmend, gilt zu Beginn des Manövers $\beta = \dot{\psi}_{\nu} = 0$, so dass sich der Ausdruck zu diesem Zeitpunkt zu Gleichung (5.24) vereinfacht.

$$\alpha_f = \delta^{153} \tag{5.24}$$

Den nach Gleichung (5.22) berechneten Lenkradwinkel zu Beginn eines Manövers direkt sprunghaft vorzugeben, würde somit in einem zu hohen Schräglaufwinkel α_f resultieren.

Zur Optimierung des Ansprechverhaltens mit dem Ziel der Maximierung der Querbeschleunigung beim kollisionsvermeidenden Manöver, führt dies zur Forderung, dass der nach Gleichung (5.21) bestimmte, kombinierte Soll-Schlupf $\lambda_{eff,soll}$ vollständig für die Ausprägung des Schräglaufwinkels α Verwendung finden sollte (λ_x =0). Unter Vernachlässigung des Sturzwinkels ergibt sich somit der, dem optimalen Schräglaufwinkel α_{ca} entsprechende, gesuchte Lenkradwinkel zu Manöverbeginn zu

$$\delta_{H,0} = i_s \cdot \alpha_{CA} = i_s \cdot \arcsin(\lambda_{eff,soll}) \cdot \frac{c_{\lambda}}{c_{\alpha}}.$$
 (5.25)

Aufgrund der Differenz zwischen den nach Gleichungen (5.22) und (5.25) bestimmten Lenkwinkeln gilt es zusätzlich noch die von der Lenkwinkelgeschwindigkeit abhängige Übergangsphase zu bestimmen.

Idealer Weise entspricht der aus Gleichung (5.23) folgende Schräglaufwinkel α_f dem die Seitenkräfte maximierenden Schräglaufwinkel α_{ca} und ist über das gesamte Manöver konstant. Unter dieser Annahme folgt aus der zeitlichen Ableitung von Gleichung (5.23) die gesuchte Lenkgeschwindigkeit zu

_

¹⁵³ Vgl. Mitschke (2003): Dynamik von Kraftfahrzeugen, S. 554.

$$\dot{\delta} = \dot{\beta} + l_f \cdot \left(\frac{\ddot{\psi}_v}{v} - \dot{\psi}_v \cdot \frac{a}{v^2}\right). \tag{5.26}$$

Diese wiederum führt zu einem Lenkradwinkel während der Übergangsphase entsprechend Gleichung (5.27).

$$\delta_{H}(t) = \min \left[i_{s} \cdot \left(\alpha_{CA} + \int_{t_{0}}^{t} \dot{\delta} \cdot dt \right); \delta_{H,soll} \right]$$
 (5.27)

Bei Erreichen der Querablage $y(t_G)^{154}$ wird, in Abhängigkeit der Aktordynamik, bis zum Erreichen von - $\delta_{H,soll}$, mit maximaler Lenkgeschwindigkeit gegengelenkt. Die Rückführung des Egofahrzeugs auf den eigenen Fahrstreifen bzw. in einen sicheren Zustand erfolgt im Anschluss an das Passieren des Hindernisses, und liegt nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

5.3 Kollisionsfolgenlinderung

Ziel des kollisionsfolgenlindernden Manövers ist es, das Egofahrzeug bis zur Kollision so weit wie möglich zu verzögern und parallel den Kollisionspunkt außerhalb der Fahrgastzelle der beiden Beteiligten Fahrzeuge zu verlagern.

Im Vergleich zum kollisionsvermeidenden Manöver, bei dem die zu erwartenden Handlungen des potentiellen Kollisionsobjektes keinen bzw. einen zu vernachlässigenden Einfluss auf das Resultat des Notmanövers besitzen (vgl. Kapitel 4.3.1.2), muss dieses beim kollisionsfolgenlindernden Manöver sehr wohl als eine potentielle Störgröße Berücksichtigung finden, da hier ein Eingriff des Fahrers des Hindernisobjektes die Kollisionskonstellation direkt beeinflussen würde (vgl. Kapitel 4.3.1.3). Alleine aus diesem Grund ist bereits eine Rückführung der entsprechenden Größen und somit eine Regelung der Trajektorie notwendig. Die Gesamtstruktur des Verwendung findenden Ansatzes ist Abbildung 5-5 zu entnehmen.

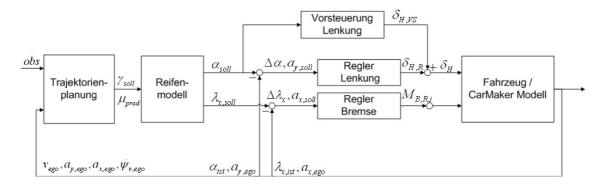


Abbildung 5-5 Regelungskonzept - Kollisionsfolgenlinderung

_

¹⁵⁴ Vgl. Kapitel 4.2.3

Kern des Ansatzes ist eine Regelung von Längs- und Querbeschleunigung. Als Führungsgrößen finden dabei die Sollbeschleunigungen $a_{y,soll,CM}$ und $a_{x,soll,CM}$ Verwendung. Diese wiederum folgen, bei gegebenem μ_{pred} , direkt aus dem, aus der Trajektorienplanung folgenden, Winkel des Sollbeschleunigungsvektors γ_{CM} zu den nachfolgenden Gleichungen (5.28) und (5.29).

$$a_{x \text{ soll CM}} = \mu_h \cdot g \cdot \cos(\gamma_{CM}) \tag{5.28}$$

$$a_{v.soll.CM} = \mu_h \cdot g \cdot \sin(\gamma_{CM}) \tag{5.29}$$

Für die Regelung der beiden Regelgrößen über die Stellgrößen Lenkradwinkel und Bremsmoment finden in beiden Fällen PI-Regler¹⁵⁵ Verwendung, um einerseits schnell auf Regeldifferenzen mit korrigierenden Stellgrößen reagieren und andererseits im stationären Zustand die Regeldifferenzen vollständig ausregeln zu können.

Um eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Regler möglichst zu vermeiden, werden zusätzlich im Reifenmodell, ebenfalls aus dem Soll-Beschleunigungsvektor γ_{CM} folgend, der Soll-Schräglaufwinkel $\alpha_{soll,CM}$ und der Soll-Längsschlupf $\lambda_{x,soll,CM}$ bestimmt. Ergänzend zu den vorherigen Ausführungen ergibt sich dabei der als Verzögerung definierte Schräglaufwinkel $\alpha_{soll,CM}$ durch Anpassung von α_{CA} (Vgl. Gleichung (5.25)) über den Winkel des Soll-Beschleunigungsvektors γ_{CM} zu

$$\alpha_{soll,CM} = \arcsin\left(\sin\left(\gamma_{CM}\right) \cdot \lambda_{eff,soll}\right) \cdot \frac{c_{\lambda}}{c_{\alpha}}$$
(5.30)

und der Soll-Längsschlupf $\lambda_{x,soll,CM}$ durch Umstellung von Gleichung (5.21) zu

$$\left| \lambda_{x,soll,CM} \right| = \sqrt{\lambda_{eff}^2 - \left(\sin \left(\alpha_i \cdot \frac{c_\alpha}{c_\lambda} \right) \right)^2} . \tag{5.31}$$

Beide Größen werden mit dem zurückgeführten, geschätzten aktuellen Schräglaufwinkel und Längsschlupf verglichen, und lassen zur Vermeidung eines Überschreitens des Kraftschlussmaximums nur solange größere Stellgrößen zu, wie die Zielgrößen $\alpha_{soll,CM}$ und $\lambda_{x,soll,CM}$ noch nicht erreicht sind. Die zur Bestimmung der Abweichung notwendigen aktuellen Werte α_{ist} und $\lambda_{x,ist}$ werden als gegeben angenommen. Zur Schätzung dieser Werte sind diverse Verfahren bspw. für den Schräglaufwinkel über ein Extended Kalman-Filter auf Basis von Fahrzeugmodellen¹⁵⁶ oder für den Längsschlupf basierend auf der mittels GPS gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit¹⁵⁷ bekannt.

Bei einem ausschließlich über die Räder der Vorderachse gelenkten Fahrzeug kann der Schräglaufwinkel nur an der Vorderachse über eine Lenkbewegung gezielt beeinflusst

¹⁵⁷ Vgl. z.B. Miller et al. (2001): Longitudinal wheel slip and tire parameters, S.1800 ff.

Einstellung nach Ziegler/Nichols (Sprungmethode) Querbeschleunigung: K_p =7,5, T_n =0,066; Längsbeschleunigung: K_p =1800, T_n =0,033

¹⁵⁶ Vgl. z.B. Kim und Ryu (2011): Sideslip angle estimation, S. 545–553

werden. Darüber hinaus sind die Lenkwinkel beider Räder der Vorderachse über die Lenkkinematik voneinander abhängig, so dass der Soll-Schräglaufwinkel $\alpha_{soll,CM}$ nur für eines der beiden Räder als Sollvorgabe dienen kann.

Infolge der Schwerpunkthöhe $h_{SP} > 0$ m und dem im Normalfall davon abweichenden Wankzentrum führt das im Fahrzeug während der Kurvenfahrt auftretende Wankmoment zu einer Radlasterhöhung an den kurvenäußeren und einer Radlastreduzierung an den kurveninneren Rädern. Die Radlasterhöhung ermöglicht die Übertragung einer höheren Seitenkraft an den kurvenäußeren Rädern, so dass der Schräglaufwinkel α am kurvenäußeren Rad der Vorderachse als Vergleichsgröße gewählt wird.

Zur Verbesserung des Führungsverhaltens des Lenkwinkels findet zusätzlich eine Vorsteuerung Verwendung. Die Vorsteuergröße folgt dabei aus $\alpha_{soll,CM}$ sowie $a_{y,soll,CM}$, gemäß Gleichung (5.27), zu

$$\delta_{H,VS} = i_s \cdot \left(\alpha_{soll,CM} + \int \left(\dot{\beta} + l_f \cdot \left(\frac{\ddot{\psi}_v}{v} - \dot{\psi}_v \cdot \frac{a}{v^2} \right) \right) \cdot dt \right). \tag{5.32}$$

Zur Ausregelung möglicher Ungenauigkeiten in der Berechnung der Sollvorgaben 159 als auch von Störgrößen bedingt durch Eingriffe des Fahrers des Hindernisobjektes nach der Manöverinitierung, werden die aktuellen Bewegungsgrößen des Egofahrzeugs an die Trajektorienplanung zurückgeführt, und dort der Soll-Beschleunigungswinkel γ_{CM} bei Bedarf, d.h. wenn der gewünschte Kollisionsbereich mit den aktuellen Vorgaben nicht mehr erreicht werden kann, angepasst.

Auf eine ausführliche Betrachtung der Stabilität des vorliegenden nichtlinearen Reglers wird an dieser Stelle verzichtet. Aufgrund des ohnehin in einer Kollision mit dem Hindernisobjekt resultierenden Manövers, spielt die realisierbare Güte der Solltrajektorie in Bezug auf den Sollkollisionspunkt eine deutlich höhere Bedeutung. Dessen eingehende Analyse unter variierten Randbedingungen ist ein Schwerpunkt des folgenden Abschnittes.

_

¹⁵⁸ Vgl. Haken (2008): Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, S. 257.

¹⁵⁹ Vgl. Kapitel 4.2

6 Verifizierung und Bewertung

Als letzter Schritt der funktionalen Betrachtung folgt die Verifizierung und Bewertung des vorgestellten Schutzkonzeptes unter dem Gesichtspunkt der Funktionsgüte sowie der globalen Wirksamkeit in Form einer simulationsbasierten Studie.

6.1 Untersuchungswerkzeug

Nach Bortz¹⁶⁰ sind die grundsätzlichen Anforderungen an ein Untersuchungswerkzeug dessen

- Objektivität d.h. die Testergebnisse müssen unabhängig von Einflüssen durch das ausführende Personal sein,
- Reliabilität unter konstanten Bedingungen müssen die Messung reproduzierbar sein, sowie
- Validität das Verfahren muss diejenigen Eigenschaften erfassen, die für eine Bewertung des Systems notwendig sind.

Zur Verifizierung als auch Beurteilung der potentiellen Wirksamkeit aktiver Schutzfunktionalität sind verschiedene simulative Ansätze wie Software-in-the-Loop (SiL),
Hardware-in-the-Loop (HiL) oder auch der Einsatz von Fahrsimulatoren bekannt. Neben der Simulation finden aber auch verschiedene Testverfahren auf der Basis realer
Fahrzeuge und Fahrversuche in Verbindung mit unterschiedlichsten Dummy-Targets¹⁶¹
Verwendung. Ein weiterer Ansatz zum sicheren Test von Systemen der aktiven Sicherheit auf entsprechenden Testgeländen basiert auf der Verwendung hochautomatisierter
Fahrzeuge. Eine in späten Entwicklungsphasen bzw. für Fahrzeuge im Serieneinsatz in
Frage kommende Untersuchungsmethodik stellt schließlich der Crash Test dar, der zwar
sehr gute Ergebnisse in Bezug auf die Wirksamkeit von Systemen liefert, aber nur für
eine sehr begrenzte Anzahl von Fällen praktikabel ist.

Aufgrund der hier in einer sehr frühen Konzeptphase befindlichen Schutzfunktionalität findet die Simulation in vorliegender Arbeit als Untersuchungswerkzeug Verwendung. Zwar ist die unsichere Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der Simulation auf das reale Fahrzeugverhalten im Bereich der fahrphysikalischen Grenzen aufgrund von Vereinfachungen in den verwendeten Fahrzeugmodellen als nachteilig zu beurteilen, doch

-

¹⁶⁰ Bortz (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler

Vgl. z.B. Hoffmann (2008): Das Darmstädter Verfahren (EVITA), Diebold (2003): Das APIA-Projekt Fahrzeug oder Schulte et al. (2012): Testmethodik für integrale Insassenschutzsysteme

bietet dieses Werkzeug die Möglichkeit, mit idealisierten Daten des eigenen Fahrzeugs und anderer relevanter virtueller Objekten zu arbeiten und den Vorteil, auf diese Weise eine große Anzahl von reproduzierbaren virtuellen Testkilometer bei Variation der unterschiedlichsten Parameter innerhalb kurzer Zeit zu absolvieren 162. Nicht zu vernachlässigen ist aber auch die Möglichkeit der Darstellung der kritischen Situationen ohne eine Gefährdung von Mensch und Material. Insbesondere eine Beurteilung der in dieser Arbeit betrachteten kollisionsfolgenlindernden Manöver, wäre im Versuchsfahrzeug, infolge der Abhängigkeit von der aus dem Manöver resultierenden Kollisionskonstellation, primär beschreibbar durch die Größen, Stoßpunkt, Stoßwinkel und Geschwindigkeit des Egofahrzeugs zum Zeitpunkt der Kollision, ohne tatsächlichen Crash nur sehr eingeschränkt darstellbar.

Für die softwaretechnische Umsetzung des Schutzkonzeptes findet die Fahrdynamiksimulationssoftware IPG CarMaker¹⁶³ Verwendung, die über eine Schnittstelle die Möglichkeit bietet, den in Matlab/Simulink entwickelten Algorithmus zu integrieren. Die Simulation des fahrdynamischen Verhaltens basiert dabei auf einem parametrierbaren und validierten Fahrzeug-, Fahrer- und Straßenmodell.

6.2 Funktionsgüte und Robustheit der Regelung

Ein wesentlicher Aspekt der betrachteten Schutzfunktionalität stellt die Güte der durch die Trajektorienregelung realisierten Ausweichtrajektorie in Bezug zu der in der Situationsanalyse geplanten Trajektorie dar. Nur bei ausreichender Genauigkeit führt eine in der Situationsanalyse getroffene Manöverentscheidung auch zum gewünschten Resultat. Andernfalls ist eine solche Schutzfunktionalität zumindest mit dem hier gewählten Ansatz nicht sicher darstellbar.

6.2.1 Kollisionsvermeidung

Für die Kollisionsvermeidung stellt sich im gewählten Ansatz, aufgrund des negativen Einflusses einer Verzögerung auf den realisierbaren Relativversatz y_{rel} , die Herausforderung einer Beschränkung der verfügbaren Stellgrößen alleine auf den Lenkwinkel. Daher sind hier gewisse Abweichungen infolge der vereinfachten Abbildung der Fahrdynamik im Prädiktionsmodell, sowie aufgrund von Fehlern in der Schätzung von Parametern wie dem Kraftschlussbeiwert μ zu erwarten. Es ist davon auszugehen, dass bei geringerem Kraftschlussbeiwert μ die Verzögerungskomponente aufgrund der aufgebrachten Seitenkräfte etwas geringer ausfällt und somit das Fahrzeug im Vergleich zum vorherigen Fall eine geringfügig längere Wegstrecke bis zum Ende des Manövers zu-

¹⁶² Nitz (2010): System zur aktiven Bremsung

¹⁶³ www.ipg.de

rücklegen wird. Da sich das Fahrzeug nun näher an der Kraftschlussgrenze befindet, wird sich der wegabhängige Gegenlenkzeitpunkt ggf. etwas verschieben, aber ansonsten sind keine großen zusätzlichen Abweichungen im realisierten Lateralversatz am Manöverende zu erwarten. Ein ähnliches Verhalten ist bei einer Unterschätzung des Kraftschlussbeiwertes zu erwarten, nur dass das realisierte Manöver in diesem Fall um einige cm kürzer ausfallen sollte.

Der zeitliche Verlauf einer exemplarischen Ausweichtrajektorie sowie der Sollvorgaben $a_{x/y,soll}$ und der prädizierten Bewegungsgrößen $\psi_{\kappa,pred}$ und $\psi_{\kappa,pred}$ ist der nachfolgenden Abbildung 6-1 zu entnehmen.

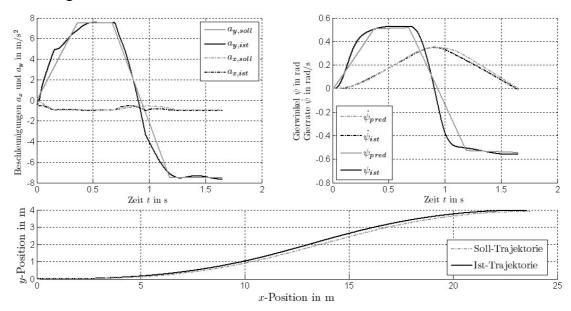


Abbildung 6-1 Beispielhafter Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Sollbeschleunigung und der nach Modellvorstellung daraus folgenden prädizierten Gierbewegung mit den in der Simulation realisierten Größen sowie der daraus resultierenden Trajektorien für $v_{ego} = 55$ km/h und $\mu = 1$

Solange die hier ersichtlichen Abweichungen für variierte Randbedingungen und Parameter einen definierten Wert in Bezug auf die Positionsgenauigkeit nicht überschreiten, können diese bereits in der Planung in Form eines Puffers bei der Manöverauslegung Berücksichtigung finden. Als tolerierbar wird dabei an dieser Stelle ein Wert von ±10 % der max. Manöverbreite definiert, so dass ein Ausweichmanöver auf 90 % der max. Manöverbreite ausgelegt und nur dann initiiert werden würde, wenn entsprechend 80 % des maximalen Versatzes zur Vermeidung der Kollision sicher ausreichen. Je größer der gewählte Puffer¹⁶⁴, desto geringer wird die Anzahl der adressierbaren Szenarien, so dass irgendwann das mit einer solchen Funktionalität zusätzlich realisierbare theoretische Potential in keinem Verhältnis zu dem damit verbundenen Aufwand (Kosten und Komplexität) mehr steht. Hieraus resultiert die folgende Untersuchungshypothese:

-

¹⁶⁴ Vgl. Kapitel 4.1.2

H 3. Die Regelung der hochdynamisch geplanten Trajektorie für ein die Kollision vermeidendes Manöver ist selbst bei Ungenauigkeiten in der Schätzung des Kraftschlussbeiwert Fahrbahn-Reifen von Δμ=±0.1 zuverlässig, d.h. bei einer maximalen Abweichung von 10 % der jeweils maximalen Ausweichbreite, realisierbar.

Bei den Fehlern in Bezug auf die Solltrajektorie ist zwischen absoluten Abweichungen und den daraus resultierenden relativen Abweichungen gegenüber der Hindernistrajektorie zu differenzieren. Die absoluten Werte geben darüber Aufschluss, inwieweit bei einem Manöver gegebenenfalls die Fahrbahn verlassen wird oder nicht. Die Beurteilung ob ein, nicht die Fahrbahn verlassendes, Manöver aber auch die Kollision vermeiden konnte, ist alleine über die absoluten Werte nicht direkt möglich. Hierzu sind die aus den absoluten Fehlern folgenden Abweichungen von der Solltrajektorie in Bezug auf den zu realisierenden Relativversatz y_{rel} zu bestimmen.

Der nachfolgenden Abbildungen 6-2 bis 6-4 sind die mit dem gewählten Ansatz in der Simulation realisierten absoluten Fehler in Bezug auf die geplante Ausweichtrajektorie, für ein Geschwindigkeitsbereich von 40-60 km/h sowie eine maximale Manöverbreite von 1,5 m bis 5 m, zu entnehmen. Zusätzlich ist den Abbildungen der Einfluss einer Über- bzw. Unterschätzung des vorliegenden Kraftschlussbeiwertes $\mu_{isi}=1$ um $\pm 0,1$ dargestellt. Die Abweichungen sind separat für die x- und die y-Komponente jeweils am Manöverende, d.h. der Position mit maximaler Querablage dargestellt, da zu erwarten ist, dass die Positionsfehler mit der Wegstrecke zunehmen, und somit das Manöverende die potentiell größten Abweichungen aufweist.

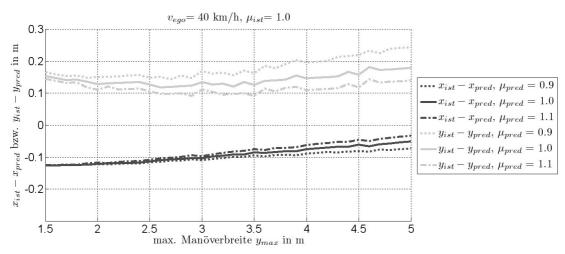


Abbildung 6-2 Absolute Abweichung zwischen den realisierten und prädizierten Positionen in x und y in Abhängigkeit der max. Manöverbreite für unterschiedlich μ_{pred} bei ν_{ego} = 40 km/h und μ_{ist} = 1.0

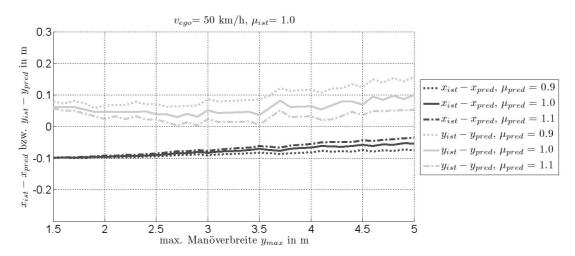


Abbildung 6-3 Absolute Abweichung zwischen den realisierten und prädizierten Positionen in x und y in Abhängigkeit der max. Manöverbreite für unterschiedlich μ_{pred} bei v_{ego} = 50 km/h und μ_{ist} = 1.0

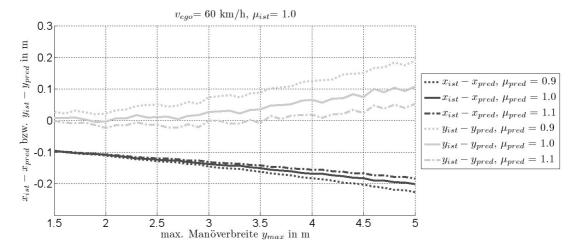


Abbildung 6-4 Absolute Abweichung zwischen den realisierten und prädizierten Positionen in x und y in Abhängigkeit der max. Manöverbreite für unterschiedlich μ_{pred} bei v_{ego} = 60 km/h und μ_{ist} = 1.0

Es zeigt sich, dass bei fehlerbehaftetem geschätztem Kraftschlussbeiwert die realisierten Positionsfehler zwar mit steigender Manöverbreite leicht zunehmen, aber für einen Großteil der untersuchten Fälle unterhalb von $\pm 0,2$ m bleiben. Es ist aber auch ersichtlich, dass sich das geschwindigkeitsabhängige dynamische Verhalten mit dem gewählten einfachen Modellansatz nur innerhalb gewisser Grenzen abbilden lässt. Während sich die Fehler bei $v_{ego} = 40$ km/h und 50 km/h sehr ähneln, zeigt sich bei 60 km/h doch eine ganz andere Fehlercharakteristik. Deutlich wird dies insbesondere bei der x-Komponente der zurückgelegten Wegstrecke. Bei den beiden erstgenannten Geschwindigkeiten nimmt der Fehler bei steigender Manöverbreite sogar leicht ab, wohingegen er sich bei 60 km/h fast verdoppelt.

Darüber hinaus bestätigen sich auch die Erwartungen bezüglich des Einflusses des Kraftschlussbeiwertes. Ist der reale Kraftschlussbeiwert höher als der geschätzte, so führt dies, unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Manöverbreite, zu

einer jeweils leicht geringeren Wegstrecke in Fahrzeuglängs- und einer leicht größeren Wegstrecke in Fahrzeuglateralrichtung verglichen mit dem geplanten Manöver.

Je nach Vorzeichen der einzelnen absoluten Fehlerkomponenten besitzen diese einen unterschiedlichen Einfluss auf den realisierten Relativversatz y_{rel} . Insgesamt sind hierbei vier Konstellationen zu unterscheiden.

$x_{ist} \ge x_{pred}; y_{ist} \ge y_{pred}$:

Sind sowohl die zurückgelegte Wegstrecke in Fahrzeuglängsrichtung (x-Komponente in Abbildung 6-1) als auch in Lateralrichtung (y-Komponente in Abbildung 6-1) größer als die Sollvorgabe besitzt dies in Bezug auf die Kollisionsvermeidung keinen negativen Einfluss, solange infolge der zu großen y-Komponente nicht, wie bereits erwähnt, die Fahrbahn verlassen wird.

$x_{ist} \ge x_{pred}$; $y_{ist} < y_{pred}$:

Fällt infolge der zu großen zurückgelegten Wegstrecke in Fahrzeuglängsrichtung die y-Komponente kleiner aus als geplant, ist dies solange unschädlich, solange dadurch der Relativversatz y_{rel} nicht beeinträchtigt wird. Außer dem Umstand, dass das Egofahrzeug den Kollisionsbereich wieder früher verlassen würde, ändert sich ansonsten nichts am Resultat des Manövers. Ist das realisierte y_{ist} jedoch so klein, dass dadurch auch der Relativversatz y_{rel} geringer ausfällt als geplant, kann die Kollision abhängig vom gewählten Puffer ggf. nicht vermieden werden.

$x_{ist} < x_{pred}; y_{ist} \ge y_{pred}$

Ähnlich verhält es sich im umgekehrten Fall; einer zu kleinen x- und einer zu großen y-Komponente. Solange der Relativversatz nicht negativ beeinflusst wird, sind auch diese Abweichungen unschädlich.

$x_{ist} < x_{pred}$; $y_{ist} < y_{pred}$:

Sind beide Komponenten im Vergleich zur Sollvorgabe zu gering, führt dies immer, in Abhängigkeit der Hindernisgeschwindigkeit, zu einer Reduzierung des realisierten Relativversatzes y_{rel} , so dass dieser ggf. nicht mehr zur Kollisionsvermeidung ausreicht.

Betrachtet man daher nochmal in den Abbildung 6-5 bis Abbildung 6-7 die für die Güte des Manövers primär maßgebliche Abweichung des von der Geschwindigkeit des Hindernisobjektes abhängigen Relativversatzes y_{rel} (vgl. Gleichung (2.7)), so zeigt sich, dass die Abweichungen nahezu unabhängig von Fahrzeuggeschwindigkeit und der max. Manöverbreite, bei $\mu_{pred} = \mu_{ist}$ (durchgezogene Linien), in einem Bereich weit unterhalb der angestrebten +/- 10 % der jeweils maximalen Manöverbreite verbleiben.

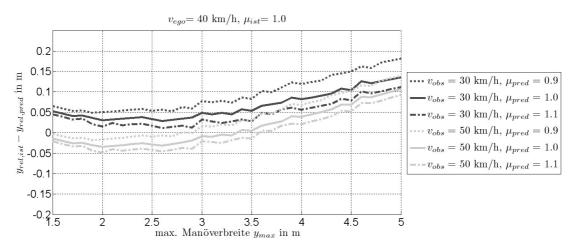


Abbildung 6-5 Abweichung im Relativversatz in Abhängigkeit der max. Manöverbreite für variierte μ_{pred} und ν_{obs} bei ν_{ego} = 40 km/h und μ_{ist} = 1.0

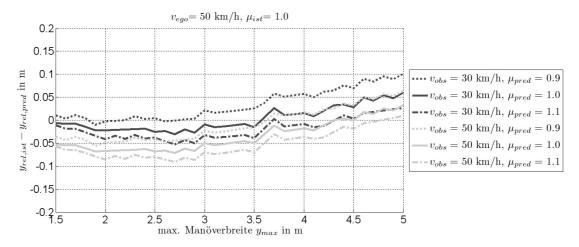


Abbildung 6-6 Abweichung im Relativversatz in Abhängigkeit der max. Manöverbreite für variierte μ_{pred} und ν_{obs} bei ν_{ego} = 50 km/h und μ_{ist} = 1.0

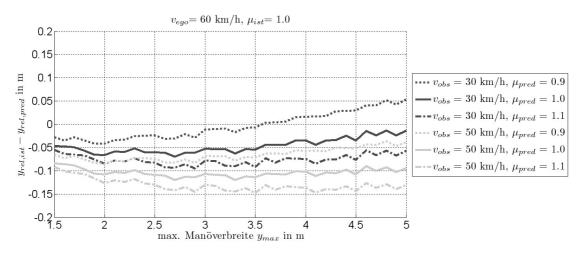


Abbildung 6-7 Abweichung im Relativversatz in Abhängigkeit der max. Manöverbreite für variierte μ_{pred} und ν_{obs} bei ν_{ego} = 60 km/h und μ_{ist} = 1.0

Zusammenfassend kann somit als Zwischenfazit festgehalten werden, dass sich die Soll-Ausweichtrajektorien aufgrund der Tatsache, dass diese lediglich gesteuert und die Manöverplanung auf einem einfachen punktdynamischen Modellansatz beruht, wie zu

erwarten, nicht ohne Abweichungen realisieren lassen. Auf der anderen Seite erlaubt der gewählte Ansatz die Umsetzung einer hochdynamisch geplanten Trajektorie für ein die Kollision vermeidendes Manöver, bei einer angenommenen Güte des geschätzten Kraftschlussbeiwertes Fahrbahn-Reifen von \pm 0,1 des tatsächlichen Wertes, dennoch zuverlässig mit einer max. Abweichung von unterhalb 10% der max. Ausweichbreite, wie in der Untersuchungshypothese gefordert.

6.2.2 Kollisionsfolgenlinderung

Das kollisionsfolgenlindernde Manöver zeichnet sich dadurch aus, beide Fahrzeuge in einer definierten Konstellation bei simultan möglichst starker Verzögerung zur Kollision zu bringen. Wie in den vorherigen Kapiteln hergeleitet, wird ein kombiniertes Brems-Ausweichmanöver nur dann durchgeführt, wenn dadurch der Kollisionspunkt vor die Fahrgastzelle des Hindernisobjektes verlagert werden kann. Als potentieller Zielbereich steht somit der vordere Überhang des Hindernisobjektes zur Verfügung. Für eine möglichst hohe Robustheit gegenüber Prädiktions- und Regelungsungenauigkeiten wird der Sollkollisionspunkt auf die Position der halben Vorderwagenlänge des Hindernisobjektes festgelegt. Insbesondere Fahrzeuge des "Mini-Segments" mit geringen Überhängen, wie beispielsweise der Smart ForTwo (425 mm) sind hierbei als besonders kritisch zu betrachten. Diese Fahrzeuge sollten jedoch, aufgrund ihrer geringen Anzahl, und der damit verbundenen geringen Auftretenswahrscheinlichkeit, im Vergleich zum Gesamtfahrzeugbestand (z.B. Smart ForTwo: 0,8%), nicht als Ausschlusskriterium für die notwendige Genauigkeit der Funktionalität herangezogen werden. Ziel ist es vielmehr, einen möglichst großen Anteil der existierenden Fahrzeuge zu adressieren, auch wenn dies für einige wenige Extremfälle nicht möglich sein sollte. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle eine Mindestanforderung von 90 % der zugelassenen Pkw, am Beispiel von Deutschland, aufgestellt, woraus sich die folgende Hypothese ableitet:

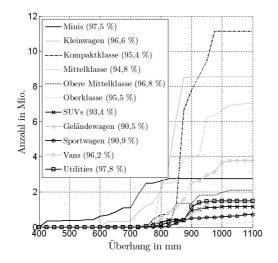
H 4. Die Regelung der hochdynamisch geplanten Trajektorie für ein die Kollisionsfolgen linderndes Manöver ist bei geschätztem Kraftschlussbeiwert Fahrbahn-Reifen zuverlässig, bei Berücksichtigung eines zulässigen Puffers in der Größenordnung der halben Vorderwagenlänge, für min. 90% der in Deutschland zugelassenen Pkw in Bezug auf den Sollkollisionspunkt möglich.

Für die Herleitung der damit einhergehenden notwendige Genauigkeit der Funktionalität ist in der nachfolgenden Abbildung 6-8 für die einzelnen Fahrzeugsegmente die Anzahl der Fahrzeuge je Segment kumuliert über der jeweiligen Länge der vorderen Überhänge aufgetragen. Die Daten entstammen den Statistiken des Kraftfahrbundesamts bezüglich des Bestands an Pkw nach Segmenten und Modellreihen¹⁶⁵. Die Ermittlung der Überhänge beruht, soweit verfügbar, auf den Daten der Hersteller oder ist aus

¹⁶⁵ Kraftfahr-Bundesamt (2014): Bestand an Personenkraftwagen am 1.1.2014

Strichzeichnungen ausgemessen worden, so dass diese ggf. leicht von den realen Werten abweichen können. Vereinfachend sind die Werte für die einzelnen Modellreihen jeweils für das aktuelle bzw. das letzte Modell gewählt worden. In den Klammern ist jeweils der Anteil der Fahrzeuge des Gesamtbestands zu entnehmen, die den einzelnen Kurven zugrundeliegenden. Bei den fehlenden Prozentpunkten handelt es sich um Fahrzeuge mit sehr geringen Stückzahlen, die jedoch kaum Einfluss auf die grundsätzliche Aussage der Abbildung besitzen.

In Abbildung 6-8 (links) ist ersichtlich, dass wie zu erwarten insbesondere die Fahrzeugsegmente "Minis" und "Kleinwagen" die kürzesten Überhänge aufweisen. Während die Fahrzeuge der anderen Segmente einen Überhang von mind. 750 mm besitzen, treten hier durchaus Werte im Bereich von bis zu 425 mm (Minis) bzw. 600 mm (Kleinwagen) auf.



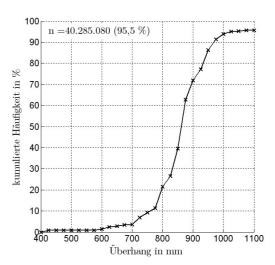


Abbildung 6-8 Kumulierte Anzahl der Fahrzeuge je Segment über der Länge des vorderen Überhangs in mm (links) sowie kumulierte Häufigkeit der Überhanglängen bezogen auf den Gesamtfahrzeugbestand in Deutschland (Stand 1.1.2014) (rechts) – Werte in Klammern: Anteil der berücksichtigten Fahrzeuge in Bezug auf den Fahrzeugbestand

Bezogen auf den Gesamtbestand wirken sich die Fahrzeuge mit sehr kleinem Überhang aber nur geringfügig aus, wie der kumulierten Häufigkeit in Abbildung 6-8 (rechts) zu entnehmen ist. Der oben getroffenen Anforderung nachkommend, weisen 90 % aller in Deutschland zugelassenen Pkw einen vorderen Überhang größer als 750 mm auf. Aufbauend auf dieser Größe wird in den folgenden Untersuchungen eine Genauigkeit von ± 375 mm um den Sollkollisionspunkt als Bewertungsmaßstab herangezogen.

Auch für das kollisionsfolgenlindernde Manöver erfolgt die Bewertung der Regelungsgüte auf Basis einer Simulation mit IPG CarMaker mit systematisch variierten Fahrzeuggeschwindigkeit und Soll-Beschleunigungswinkeln bei unterschiedlichen Kraftschlussbeiwerten. Für das Hindernisobjekt wird ebenfalls eine systematisch von 1 m/s bis 20 m/s variierte, aber während des jeweiligen Simulationsdurchlaufs vereinfachend konstante Bewegung angenommen.

Die den folgenden Untersuchungen zugrundeliegende Manöverdauer folgt, aus den Gleichungen (2.4) – (2.6) zur Bestimmung des theoretisch frühestmöglichen Eingriffszeitpunktes sowie den theoretischen Ergebnissen aus Kapitel 4.3 bezüglich der für ein kollisionsfolgenlinderndes Manöver grundsätzlich in Frage kommenden Szenarien. Selbst unter diesen idealisierten Randbedingungen findet kein Eingriff früher als 1,01 s vor der andernfalls folgenden Kollision statt, so dass dieser Wert als Referenz für die weiteren Betrachtungen genutzt wird. Der zeitliche Verlauf einer exemplarischen Ausweichtrajektorie und deren zugrundeliegenden Bewegungsgrößen sowie der Sollvorgaben und prädizierten Bewegungsgrößen, ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

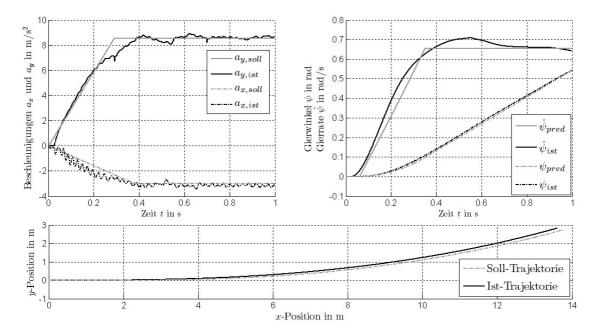


Abbildung 6-9 Beispielhafter Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Sollbeschleunigungen und der nach Modellvorstellung daraus folgenden prädizierten Gierbewegung mit den in der Simulation realisierten Größen sowie der daraus resultierenden Trajektorien für $v_{ego} = 55$ km/h und $\mu = 1$ und $\gamma_{CM} = 70^{\circ}$

Der Fehler in der geregelten Trajektorie in Bezug auf den Sollkollisionspunkt ergibt sich angelehnt an Gleichung (2.7) aus der Differenz des innerhalb einer definierten Wegstrecke realisierten Lateralversatzes zuzüglich der Differenz aus Ist- und Soll-Kollisionszeitpunkt multipliziert mit der Geschwindigkeit des potentiellen Kollisionsobjektes gemäß Gleichung (5.33).

$$\Delta y_{rel}(x,\gamma) = (y_{ist}(x,\gamma) - y_{soll}(x,\gamma)) + (t_{ist}(x,\gamma) - t_{soll}(x,\gamma)) \cdot v_{obs,\perp}$$
(5.33)

Für einen fehlerfrei geschätzten Kraftschlussbeiwert μ sind beide Komponenten aus Gleichung (5.33) der nachfolgenden Abbildung 6-10 (oben) zu entnehmen. Der gewählte Ansatz zur Regelung des aus der Trajektorienplanung folgenden Beschleunigungswinkels ermöglicht eine Genauigkeit in Bezug auf die Querablage kleiner als 0,15 m und einer Abweichung vom prädizierten Kollisionszeitpunkt von lediglich maximal 25 ms.

Zusammengefasst ergeben sich daraus Abweichungen vom Sollkollisionspunkt, die für weite Bereiche weit unterhalb der geforderten Genauigkeit liegen. Lediglich bei sehr hohen Hindernis- und Egogeschwindigkeiten von 20 m/s in einem Bereich des Beschleunigungswinkels von 30-40° übersteigen die Abweichungen leicht den Grenzwert von 0,375 m.

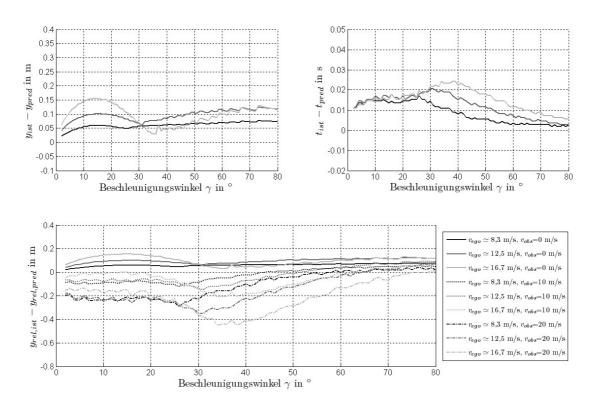


Abbildung 6-10 Abweichung zwischen Ist- und Solltrajektorie in Abhängigkeit des Beschleunigungswinkels für unterschiedliche Fahrzeug- und Hindernisgeschwindigkeiten für $\mu_{ist} = \mu_{pred} = 1.0$

Eine Überschätzung des Kraftschlussbeiwertes führt bei gewähltem Ansatz, infolge der Begrenzung der Stellgrößen auf Basis des Vergleichs von Soll- und Ist-Schräglaufwinkel sowie Soll- und Ist-Längsschlupf, bei definiertem Beschleunigungswinkel zu einer Abweichung der Ist-Trajektorie von der jeweils prädizierten Trajektorie. Das Manöver wird in diesem Fall, im Vergleich zum geplanten Manöver, sowohl eine geringere Querbeschleunigung als auch geringere Längsverzögerung aufweisen. Dies führt letztendlich zu einem früheren Eintreffen auf Höhe des Kollisionsbereichs bei gleichzeitig kleinerem realisiertem Lateralersatz. Der daraus resultierende absolute Fehler ist in einem solchen Szenario jedoch, wie bereits erwähnt, nur nebensächlich. Von eigentlichem Interesse ist der daraus folgende Fehler in Bezug auf den Soll-Kollisionspunkt am Hindernisfahrzeug, der wiederum primär von der Geschwindigkeit des Hindernisobjektes abhängt. Wie der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen, wird der absolute Fehler zumindest zum Teil durch die Relativbewegung des Hindernisobjektes kompensiert.

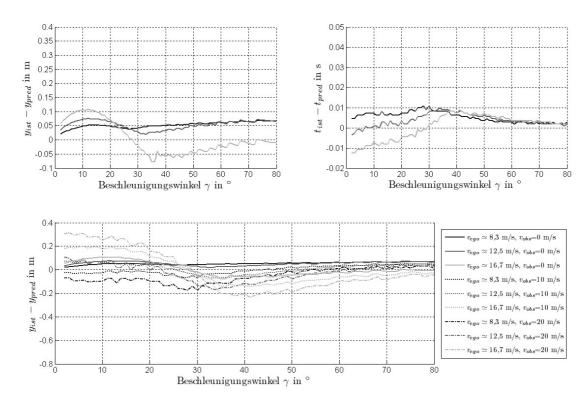


Abbildung 6-11 Abweichung zwischen Ist- und Solltrajektorie in Abhängigkeit des Beschleunigungswinkels für variierte Fahrzeug- und Hindernisgeschwindigkeiten für $\mu_{ist} = 1.0$, $\mu_{pred} = 1.1$

Eine Überschätzung des Kraftschlussbeiwertes führt wie zu erwarten zu einer geringeren Querablage (verglichen mit Abbildung 6-10 fallen die realisierten Querablagen um ca. 5-10 cm geringer aus) bei gleichzeitig früherem Eintreffen am Kollisionspunkt (siehe Abbildung 6-11). In diesem Fall kompensieren sich die auftretenden Abweichungen soweit, dass für keine Kombination die Gefahr einer Verlagerung des Kollisionspunktes außerhalb des Zielbereiches besteht.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass unter den idealisierten Randbedingungen in der Simulation sowohl das kollisionsvermeidende als auch das kollisionsfolgenlindernde Manöver in der postulierten Genauigkeit möglichen erscheinen.

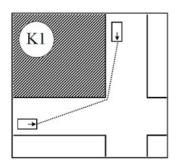
6.3 Schutzpotential

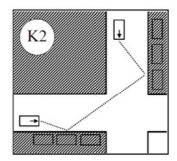
Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen folgt abschließend eine Bewertung des Schutzpotentials der thematisierten Schutzfunktionalität, nach der im nächsten Abschnitt vorgestellten Methodik und der folgenden Untersuchungshypothese.

H 5. Bei gegebener Funktionsgüte besitzt eine kombinierte, auf Ausweichen und Bremsen basierende, Schutzfunktionalität für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer im Vergleich zum "einfachen" Notbremsmanöver mindestens das gleiche Potential zur Steigerung der Verkehrssicherheit.

6.3.1 Methodik

Die Bewertung bzw. Abschätzung des Schutzpotentials vorgestellter Funktionalität beruht auf der im Rahmen der Forschungsinitiative Ko-FAS durchgeführten Nachsimulation realer Kreuzungsunfälle der GIDAS-Datenbank in IPG CarMaker. Die dieser Untersuchung zugrundeliegenden Szenarien sind dabei repräsentativ für die in der Datenbank enthaltenen Kreuzungsunfälle, differenziert nach drei sich hinsichtlich der Funkwellenausbreitung bzw. dem Zeitpunkt des ersten Sichtkontaktes unterscheidenden Kreuzungskategorien, deren grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale Abbildung 6-12 zu entnehmen sind.





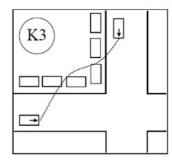


Abbildung 6-12 Kreuzungskategorien (Kommunikationseigenschaften) Quelle: HHI¹⁶⁶

Insgesamt sind im Rahmen dieses Projektes 35 Unfälle aus der Perspektive beider Beteiligter betrachtet worden. Um eine allgemeingültigere Aussage, losgelöst vom einzelnen Unfall, treffen zu können, sind neben den Originalfällen noch zusätzlich Variationen im Annäherungsverhalten vorgenommen worden, die sich abhängig vom Zeitpunkt der Sichtverbindung im Verhalten des jeweiligen Ego-Fahrzeugs unterscheiden. Gegenüber

¹⁶⁶ K1: keine Sichtverbindung, keine Reflexion über weitere große Gegenstände (z.B. Gebäude)

K2: keine Sichtverbindung, Reflexion über weitere große Gegenstände möglich (z.B. Gebäude)

K3: Sichtverbindung vorhanden (ab einer Mindestdauer von 2,6s bis zur Kollision) oder verhindert durch kleinere Gegenstände mit geringem Einfluss auf die Funkwellen Ausbreitung (parkende Fahrzeuge, Vegetation)

dem ungebremsten Basisfall erfolgt bei den Variationen ein Bremseingriff, differenziert nach drei Reaktionszeiten und zwei Bremsintensitäten. In Summe werden so je realem Unfallszenario 14 Variationen gebildet, die sich in Kollisionspunkt und Kollisionsgeschwindigkeit voneinander unterscheiden. In einigen Fällen führt diese Variation jedoch dazu, dass die beiden beteiligten Fahrzeuge nicht mehr zur Kollision kommen. Abzüglich dieser Fälle liegen den nachfolgenden Ergebnissen 333 Einzelfälle zugrunde.

Die Beurteilung der Wirksamkeit der einzelnen Schutzfunktionalitäten erfolgt mittels einer Differenzbetrachtung des Basisunfalls mit der durch die Schutzfunktionalität veränderten Kollisionskonstellation anhand sogenannter Verletzungsrisikofunktionen. Diese beschreiben in der hier Verwendung findenden Ausprägung, ein Beispiel ist Abbildung 6-13 zu entnehmen, die Wahrscheinlichkeit dafür, mindestens eine Verletzung definierten Grades, in Abhängigkeit der während der Kollision wirksamen vektoriellen Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$, zu erleiden. Anhand einer Korrelationsanalyse ist der Parameter $\Delta \vec{v}$ als einflussreichste Größe auf die, mit einer Seitenkollision einhergehenden, Verletzungsschwere identifiziert worden 167. Die Bestimmung der Kurvenverläufe folgt aus den in GIDAS hinterlegten Kreuzungsunfällen, für die sowohl die realen Verletzungen bekannt als auch das wirksame $\Delta \vec{v}$ geschätzt wurde. Neben $\Delta \vec{v}$ besitzt, siehe Abbildung 6-13, zusätzlich noch die Trefferlage und die Sitzposition (Kollision zu- oder abgewandte Seite) der Beteiligten einen signifikanten Einfluss auf die Unfallschwere. Wie zu erwarten führt ein Treffer innerhalb der Fahrgastzelle und eine Sitzposition auf der Kollision zugewandten Seite, aufgrund der damit häufig verbundenen Intrusionen bei ansonsten gleichem $\Delta \vec{v}$ statistisch betrachtet zu höheren Verletzungsschweren.

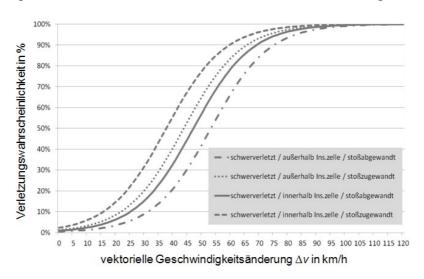


Abbildung 6-13 Beispiel für Verletzungsrisikofunktion 168

_

¹⁶⁷ Stoff et al. (2013): Ausweichfunktionalität für Kreuzungsszenarien, S.182

¹⁶⁸ Stoff et al. (2013): Ausweichfunktionalität für Kreuzungsszenarien, S.183

Die Einzelwahrscheinlichkeiten für einen definierten Verletzungsgrad ergeben sich somit aus der Differenz der in den einzelnen Kurven hinterlegten Wahrscheinlichkeiten für mindestens eine definierte Verletzungsschwere entsprechend der nachfolgenden Gleichungen.

$$p_{Tot} = p_{Tot+} \tag{5.34}$$

$$p_{SV} = p_{SV+} - p_{Tot+} (5.35)$$

$$p_{LV} = p_{LV+} - p_{SV+} \tag{5.36}$$

$$p_{NV} = 1 - p_{LV+} \tag{5.37}$$

Die Aufsummierung der Differenzen der Verletzungswahrscheinlichkeiten über alle Unfälle und Beteiligte ergibt schließlich den mit der Schutzfunktionalität realisierbaren Sicherheitsgewinn in Bezug auf die Reduktion an Leichtverletzten, Schwerverletzten und Getöteten.

Eine zusätzlich mit einem solchen Eingriff verbundene Reduktion an Sachkosten findet an dieser Stelle keine Betrachtung. Das im Einzelfall wirksame $\Delta \vec{v}$ ist durch eine Crashrechnung der Basisunfälle und geänderten Kollisionskonstellationen auf Basis eines Voxel-Models¹⁶⁹ bei der Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH bestimmt worden.

Die maschinelle Umfelderfassung wird in diesem Simulationsmodell durch einen Fusionsansatz, bestehend aus Laser-Scanner und C2X-Kommunikation, realisiert. Für den Laser-Scanner findet ein einfaches Modell Anwendung, für das von einer fehlerfreien Erfassung bei Berücksichtigung der in Kapitel 3 genannten Systemzeiten ausgegangen wird. Die Umsetzung der Fahrzeugkommunikation wiederum beruht auf einem vom Heinrich-Hertz-Institut, im Rahmen von Ko-FAS, entwickelten Modellansatz zur Beschreibung der Übertragungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des Abstands zur Position des ersten Sichtkontaktes, dessen Parametrisierung auf der Basis real vermessener Kreuzungen der oben genannten Kreuzungskategorien erfolgt ist. Die der Simulation zugrundeliegenden Übertragungswahrscheinlichkeiten, in Abhängigkeit der Entfernung beider Beteiligter zur Position des Sichtkontaktes, sind für die drei Kreuzungskategorien der nachfolgenden Abbildung 6-14 zu entnehmen.

_

¹⁶⁹ Erbsmehl (2011): Analyse Einbaulagen für Hochvoltsysteme und Energiespeicher, S.3 ff.

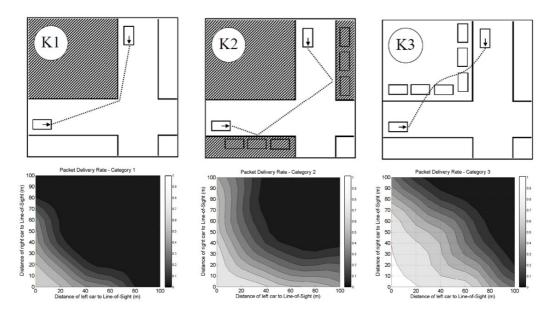


Abbildung 6-14 Wahrscheinlichkeiten einer erfolgreichen Datenübertragung in Abhängigkeit der Entfernung zum direkten Sichtkontakt für verschiedene Kreuzungstypen (nach: Mahler, 2013¹⁷⁰).

Die durchgeführten Untersuchungen berücksichtigen somit zwar die grundsätzliche situationsabhängige Wahrscheinlichkeit der Bereitstellung des notwendigen Informationsbedarfs, erfolgt ansonsten in dieser frühen Konzeptphase aber losgelöst von der mit dem Stand der Technik der maschinellen Umfelderfassung erzielbaren Genauigkeit. Ziel dieses ersten Schrittes ist die Abschätzung der potentiellen Wirksamkeit des vorliegenden Schutzkonzeptes unter idealisierten Randbedingungen, ohne diese durch Annahmen hinsichtlich der Genauigkeit gezielt zu beeinflussen.

6.3.2 Wirksamkeit

In Abbildung 6-16 ist die relative Häufigkeit der einzelnen Eingriffstypen in den untersuchten Kreuzungsunfällen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in fast der Hälfte aller Fälle eine Kollision bereits durch ein einfaches Notbremsmanöver räumlich vermieden werden kann. Weitere 16 % der Kollisionen sind durch ein Notausweichmanöver vermeidbar, während die verbleibenden gut 35 %, unter den, den Eingriffszeitpunkt betreffenden, Randbedingungen, lediglich in ihren Folgen zu lindern sind. In 27 % der Fälle ist ein kollisionsfolgenlinderndes Ausweichen notwendig, um eine Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle zu vermeiden. In weniger als 1 % der untersuchten Szenarien konnte kein Eingriff vorgenommen werden, da die zugrundeliegenden Kollisionen aufgrund eines sehr späten Bremsmanövers seitens des Egofahrzeugs verursacht worden sind. Ohne diesen Eingriff hätte das Egofahrzeug den Kollisionsbereich vor Erreichen des Hindernisobjektes bereits wieder verlassen. Die Kollision konnte hier erst zu einem

¹⁷⁰ Mahler (2013): Wireless Communication at Urban Crossroads

Zeitpunkt unmittelbar vor dieser prädiziert werden, zu dem sich das Egofahrzeug bereits im Kollisionsbereich befunden hat.

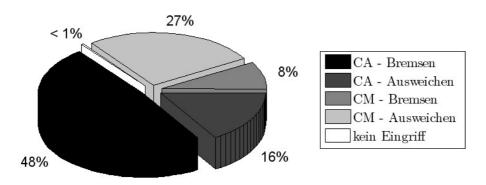


Abbildung 6-15 Eingriffstypen und relative Häufigkeit in den untersuchten Szenarien (n = 333)

Gegenüber den rein analytischen Betrachtungen aus Kapitel 4.3 entspricht dies einem leicht größeren Anteil an kollisionsvermeidenden Ausweichmanövern und einer deutlichen Verschiebung bei den kollisionsfolgenlindernden Manövern hin zum kombinierten Ausweichmanöver.

Wie Tabelle 6-1 zu entnehmen, ist in 60 % aller Basisunfälle die Fahrgastzelle eines der beteiligten Fahrzeuge von der Kollision betroffen. Durch ein Notbremsmanöver könnte dieser Anteil bereits, primär aufgrund des hohen Anteils an vermiedenen Kollisionen, auf ca. 18 % reduziert werden. Hierbei sei aber angemerkt, dass 90 %, also insgesamt 54 der 60 Kollisionen auf Höhe der Fahrgastzelle ihre Ursache im Notbremsmanöver haben. Mittels des vorgestellten kombinierten Ausweichmanövers kann der Anteil an Kollisionen auf Höhe der Fahrgastzelle nochmals auf nur noch 6 % verringert werden, wobei auch hier in 9 der verbliebenen 20 Fälle die Ursache im Ausweichmanöver zu finden ist. In diesen Fällen konnte auf eine Reaktion des Kollisionsobjektes nicht mehr ausreichend fahrdynamisch wirksam reagiert werden, so dass diese Reaktion in einer ungewollten Verlagerung des Kollisionspunktes resultierte. Die verbleibenden 11 Fälle folgen aus einer Kollisionskonstellation im Basisfall im Heck des Egofahrzeugs sowie einer Geschwindigkeitsverteilung, die zum Zeitpunkt des zulässigen Eingriffs, selbst durch max. Verzögerung keiner Verlagerung des Kollisionspunktes außerhalb der Fahrgastzelle des Egofahrzeugs ermöglicht.

Tabelle 6-1 Reduktion Anzahl der Kollisionen auf Höhe der Fahrgastzelle

Anteil an Kollisionen auf Höhe der Fahrgastzelle							
Basisunfälle	60% (200/333)						
Ausschließlich Bremseingriff (bei max. Verzögerung)	18 % (60/333)	durch Manöver verursacht 90 % (54/60)					
Kombiniertes Schutzkonzept	6 % (20/333) durch Manöver verursacht 45 % (9/20)						

Das aus diesen Eingriffen theoretisch realisierbare Potential zur Steigerung der Verkehrssicherheit ist in Tabelle 6-2 dargestellt. Die prozentualen Daten beziehen sich dabei auf die untersuchten Kreuzungsunfälle. Die Zusammenstellung ist dabei soweit wie möglich repräsentativ für das Unfallgeschehen in Deutschland erfolgt, wobei hier jedoch der Fokus primär auf der Auswahl nach den unterschiedlichen Kreuzungstypen erfolgt ist. Unter der Annahme, dass dies auch annähernd für das Unfallgeschehen an sich gilt¹⁷¹, ist der Tabelle ebenfalls eine Hochrechnung dieser Daten auf das Unfallgeschehen in Deutschland zu entnehmen. Insgesamt lässt sich durch ein solches Schutzkonzept für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer bei Annahme einer Marktdurchdringung von 100 % die Anzahl an Leichtverletzten bei Kreuzungskollisionen zwischen zwei Pkw um 75,6 %, die der Schwerverletzten um 86,3 % und die der Getöteten sogar um rund 90 % reduzieren. Wobei sich die Wirksamkeit bei geringerer Ausstattungsrate entsprechend verringert.

Tabelle 6-2 Gesamtpotential des vorgestellten Schutzkonzepts

		Reduktion	Reduktion	Reduktion
		Anzahl	Anzahl	Anzahl
		Leichtverletzte	Schwerverletzte	Getötete
Gesamtpotential	in %	75,6 %	86,3%	90,0%
	absolut ¹⁷²	21.319	3.020	112
Davon entfallen auf:				
CA Bremsen		46,4%	46,3%	43,1 %
CA Ausweichen		16,4 %	16,5 %	21,0 %
CM Bremsen		2,3 %	5,7%	6,4 %
CM Ausweichen		10,5 %	17,8 %	19,5 %

Im Vergleich zur Eingriffshäufigkeit aus Tabelle 6-1 fällt der Nutzen durch das kollisionsvermeidende Notbremsen leicht geringer aus, auch wenn absolut betrachtet hieraus der größte Effekt resultiert, während er beim Notausweichen leicht höher ausfällt. Mit knapp 16 % adressierten Fällen wird die Anzahl an Getöteten immerhin um 21 % reduziert. Bei den kollisionsfolgenlindernden Maßnahmen fällt insbesondere der doch recht geringe Effekt bei den Leichtverletzten auf, doch lässt sich dieser dadurch erklären, dass beispielsweise bei der Vermeidung eines Schwerverletzten dieser nicht automatisch unverletzt bleibt, sondern häufig lediglich in die Klasse der Leichtverletzten wandert.

Zusätzlich zu dem global realisierbaren Nutzen ist für eine umfassende Beurteilung aber auch der durch die beiden Ausweichmanöver ggf. zusätzliche Nutzen von großem Interesse. Beide Manöver sind im Vergleich zum Notbremsen sowohl was die Anforderun-

¹⁷¹ Zu dessen statistischer Absicherung hätte ein Vielfaches an Unfällen untersucht werden müssen, durch bspw. gezielte Variation der Fahrzeugtypen, Geschwindigkeitsverteilungen und Kollisionspunkte.

Vgl. Statistisches Bundesamt (2013) – 2011: 28200 LV / 3500 SV / 125 Getötete bei Einbiegen-/Kreuzen-Unfällen zwischen zwei Pkw

gen an die maschinelle Umfelderfassung als auch die Umsetzung des Manövers betrifft deutlich komplexer und insbesondere das kollisionsvermeidende Ausweichen auch mit größeren Risiken in Bezug auf potentielle Sekundärkollisionen verbunden. Der zusätzlich realisierbare Effekt ist in Tabelle 6-3 abgebildet.

Global betrachtet besitzt ein ausschließlich auf Bremsen basierendes Schutzkonzept in den untersuchten Szenarien, insbesondere im Bereich der Reduktion der Anzahl an Schwerverletzten und Getöteten, ein merklich geringeres Potential. So fällt in diesen beiden Kategorien die Reduktion geringer aus, (-13,6 % bei den Schwerverletzten und sogar -18,2 % bei den Getöteten) während sich in der Kategorie der Leichtverletzten kaum eine Veränderung zeigt. Schaut man sich die einzelnen Effekte nochmals im Detail an, so wird ersichtlich, dass die größte Verschiebung in den Fällen erfolgt, die durch ein Ausweichen vermeidbar sind, durch ein Bremsmanöver jedoch nur noch gelindert werden können. Diese große Diskrepanz beruht darauf, dass sich die für Ausweichen relevanten Situationen zum einen entweder durch ein relativ schnell fortbewegendes Egofahrzeug oder aber eine Konstellation, die erst ein relativ spätes Eingreifen zulässt, auszeichnen. In beiden Fällen kann aufgrund der Ausgangskonstellation mit einem Notbremsmanöver nur noch relativ geringer Nutzen generiert werden.

Tabelle 6-3 Differenzbetrachtung zum alleinigen Bremsen (identischer Auslösezeitpunkt)

		Reduktion	Reduktion	Reduktion An-		
		Anzahl Leicht-	Anzahl Schwer-	zahl Getötete		
		verletzte	verletzte			
Potential Brems	in %	72,8 %	72,7 %	71,8 %		
	isen absolut	20.530	2.545	90		
Setzt sich zusammen aus:						
Gesamtpotential		75,6 %	86,3%	90,0%		
- $CA_{Ausweichen} \rightarrow CM_{Bremsen}$		- 6,7 %	- 13,1 %	- 16,1 %		
- $CM_{Ausweichen} \rightarrow CM_{Bremsen}$		- 3,5 %	- 4,3 %	-4,7 %		
+ CA _{Bremsen,zeitlich}		7,4 %	3,8 %	2,6 %		
$\Delta_{ ext{Bremsen-Gesamt}}$	in %	- 2,8 %	- 13,6 %	- 18,2 %		
	absolut	- 789	- 475	- 22		

Eine leichte Verschiebung ergibt sich zudem bei den durch ein kollisionsfolgenlinderndes Ausweichen adressierten Szenarien, deren Folgen jetzt ebenfalls nur noch durch Bremsen gelindert werden können. Der hier ersichtliche Effekt einer stärkeren Reduktion in allen Verletzungskategorien durch das kombinierte Ausweichen in einer Größenordnung von 3,5 – 4,7 % spiegelt primär die Folgen einer Kollision auf der Fahrgastzelle und zum Teil auch die Folgen des beim Notbremsen größeren Kollisionswinkels wider, da die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit beim Ausweichen aufgrund des zugrundeliegenden Beschleunigungsvektors nicht größer sein kann als beim Notbremsen.

Als letzter Effekt wirkt sich bei dieser Betrachtung noch die zeitliche Kollisionsvermeidung durch Bremsen auf das Gesamtergebnis aus. Zwar wird auf diese Alternative der

Kollisionsvermeidung beim vorgestellten Konzept, aufgrund des nicht vorhersehbaren Verhaltens des potentiellen Kollisionsobjektes, bewusst verzichtet, doch lassen sich für Fälle in denen das potentielle Kollisionsobjekt tatsächlich keine Verzögerungsreaktion zeigt, durch diesen Eingriffstyp, je nach Konstellation noch zu einem sehr späten Zeitpunkt vor der Kollision, diese vermeiden, so dass insbesondere bei sich schnell bewegenden Hindernisobjekten durch ein Notbremsen die Kollision vermieden wird. Da auch in diesen Fällen beim vorgestellten Konzept aber zumindest folgenlindernd eingegriffen wird, fällt der durch die zeitliche Kollisionsvermeidung zusätzliche Effekt, zumindest was die Reduktion der Schwerverletzten und Getöteten mit 3,8 % bzw. 2.6 % betrifft, relativ gering aus.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass unter den angenommenen idealisierten Randbedingungen mit dem hier betrachteten Schutzkonzept für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer der größte Teil der durch Einbiegen-Kreuzenunfällen zwischen zwei Pkw verursachten Personenschäden zu vermeiden wäre. Dabei besitzt insbesondere im Bereich der Reduktion der Anzahl an Schwerverletzten und Getöteten das kollisionsvermeidende als auch das kollisionsfolgenlindernde Ausweichen, wie in der Untersuchungshypothese postuliert, ein zusätzliches, über das alleinige Notbremsen hinausgehendes Potential, womit diese sich ebenfalls bewährt hat.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Den Ausgangspunkt dieser Arbeit bildet die Fragestellung, inwieweit die Adressierung des vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmers in kritischen Kreuzungssituationen durch eine hochautomatisierte Schutzfunktionalität in Bezug auf dessen potentielle Akzeptanz und grundsätzliche Zulässigkeit darstellbar ist. Ziel der Arbeit ist zum einen die Ableitung des situationsabhängig frühestmöglichen Eingriffszeitpunktes sowie der möglichen Handlungsalternativen unter Berücksichtigung des Aspektes, durch diesen Eingriff die Ausgangssituation nicht noch zusätzlich zu verschärfen. Darüber hinaus steht die Entwicklung eines diesen Randbedingungen gerecht werdenden Schutzkonzeptes im Fokus dieser Arbeit sowie dessen Beurteilung in Bezug auf Realisierbarkeit und Wirksamkeit.

Der dieser Arbeit zugrundeliegende Top-Down-Ansatz geht von der grundsätzlichen Analyse des im Fokus stehenden Kreuzungsszenarios, hinsichtlich der für die Ausgestaltung eines Schutzkonzeptes relevanten Unterschiede zu dem umfassend erforschten Längsverkehrsszenario, aus.

Die hauptsächlichen Unterschiede zwischen Kreuzung und Längsverkehr beruhen auf den unterschiedlichen Bewegungsrichtungen der beteiligten Verkehrsteilnehmer. Eine Folge hieraus ist die über die Zeit betrachtet variable, zur Vermeidung einer Kollision durch Ausweichen, notwendige Querablage. Jede Geschwindigkeitsänderung des Egofahrzeugs während der Annäherung, aber auch die mit einem Ausweichmanöver verbundene zusätzliche Wegstrecke hat eine räumliche und zeitliche Verlagerung der Kollision zur Folge. Darüber hinaus sind die je nach Konstellation durch ein Ausweichmanöver zu realisierenden Querablagen zum Teil deutlich größer als im Längsverkehr. Während dort von einem maximal notwendigen Versatz in der Größenordnung der Hindernisbreite ausgegangen werden kann, sind in Kreuzungsszenarien durchaus Querablagen naheliegend, die infolge der Notwendigkeit des vollständigen Passierens eines sich zumindest teilweise senkrecht zum eigenen Fahrzeug bewegenden Objektes größer als die Hindernislänge sein können. Aufgrund der beschränkten räumlichen Gegebenheiten führt dies dazu, dass bei einem Ausweichmanöver je nach Konstellation schon vor Erreichen des Hindernisobjektes gegengelenkt werden muss, da andernfalls das Egofahrzeug den befahrbaren Bereich verlassen würde. Zusammenfassend erfordert die Situationsanalyse eines hier adressierten Schutzkonzeptes, infolge der räumlichen Gegebenheiten, zur Beurteilung des Potentials eines Ausweichmanövers einen Modellansatz, der sowohl den zeitlichen Verlauf des realisierbaren Ausweichpfades beschreibt, da dieser andernfalls nicht mit der Trajektorie des Hindernisobjektes in Bezug gesetzt werden kann, als auch den von den räumlichen Gegebenheiten abhängigen letztmöglichen Gegenlenkzeitpunkt berücksichtigt.

Bei der Untersuchung des frühestmöglichen Eingriffszeitpunktes zeigt sich, dass hier neben der grundsätzlichen rechtlichen Zulässigkeit eines solchen automatisierten Systemeingriffs, insbesondere die Frage der potentiellen Akzeptanz gegenüber einem Eingriff eine gewichtige Rolle spielt. Während bei herkömmlichen Kreuzungsassistenten für den wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer die eindeutige Verkehrsregelung eine frühzeitige Information, Warnung oder gar eine Teileingriff rechtfertigt, ist dies im vorliegenden Fall kritisch zu beurteilen. Bei einer entsprechend ausgelegten Funktionalität für den vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmer kann dessen Akzeptanz, gegenüber einem Eingriff der früher als tatsächlich notwendig erfolgt, durchaus bezweifelt werden. Aus diesem Grund folgt als obere Schranke für einen Systemeingriff im Egofahrzeug die Unvermeidbarkeit der Kollision durch das potentielle Hindernisobjekt. Je nach Konstellation ist zu diesem Zeitpunkt eine Kollision durch Bremsen bereits nicht mehr zu vermeiden, so dass für das betrachtete Schutzkonzept auch Ausweichen eine potentielle Alternative darstellt.

Theoretisch sind an Kreuzungen Unfälle, infolge der voneinander abweichenden Bewegungsrichtungen der beteiligten Fahrzeuge, sowohl räumlich, durch Bremsen in den Stillstand vor Erreichen des Kollisionsbereichs, als auch zeitlich, durch Erreichen des Kollisionsbereichs nachdem das potentielle Kollisionsobjekt diesen bereits wieder verlassen hat oder durch Verlassen des Kollisionsbereichs bevor das Hindernisobjekt diesen erreicht, durch unterschiedliche Maßnahmen vermeidbar. Die Ausweichmanöver können dabei grundsätzlich in oder entgegen der Bewegungsrichtung des Kollisionsobjekts ausgeführt werden. In Kreuzungsszenarien ist jedoch im Gegensatz zum Längsverkehr selbst unmittelbar vor der Kollision noch mit einer Reaktion des potentiellen Kollisionsobjektes zu rechnen. Die Auswertung realer Kreuzungsunfälle zeigt, dass es sich bei einer solchen Schockreaktion mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit um einen Bremseingriff handelt. Bei Manövern mit dem Ziel einer zeitlichen Vermeidung entgegen der Bewegungsrichtung des Hindernisses führt eine solche Reaktion des Hindernisses dazu, dass, abhängig vom gewählten Sicherheitspuffer, der geplante Relativversatz nicht immer ausreicht, um die Kollision zu vermeiden. Aus diesem Grund sind diese Manöver, obwohl sie insbesondere bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten beider Beteiligter ein hohes Vermeidungspotential besitzen, für das hier untersuchte Schutzkonzept abzulehnen. Somit verbleiben als mögliche Handlungsalternativen neben der die Kollision räumlich vermeidenden Notbremsung noch ein kollisionsvermeidendes Ausweichmanöver in Bewegungsrichtung des Hindernisses sowie ein kollisionsfolgenlinderndes kombiniertes Brems-Ausweichmanöver mit dem Ziel einer Minimierung der Kollisionsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verlagerung des Kollisionspunktes außerhalb der Fahrgastzellen der beteiligten Fahrzeuge.

Bei der Ausgestaltung des möglichen Ausweichmanövers gilt es infolge der kreuzenden Bewegung des Hindernisses darauf zu achten, dieses mit möglichst konstanter Geschwindigkeit unter vollständiger Ausnutzung des vorhandenen Ausweichraums durchzuführen, um auf diese Weise den Relativversatz zum Hindernisobjekt zu maximieren.

Die Optimierung des streckenbezogenen Querversatzes durch ein gleichzeitig gebremstes Ausweichmanöver würde in den vorliegenden Szenarien durch die damit verbundene Fahrzeugverzögerung, infolgedessen das Passieren des Hindernisobjektes eines längeren Zeitraums bedarf, selbst bei sehr geringer Hindernisgeschwindigkeit überkompensiert werden, und ist deshalb im vorliegenden Fall abzulehnen.

Der sowohl zur Bestimmung der Handlungsalternative als auch des Eingriffszeitpunktes im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Funktionsalgorithmus basiert auf der Planung einer unter den gegebenen Randbedingungen optimalen Ausweichtrajektorie unter Annahme der in der jeweiligen Situation maximal übertragbaren Beschleunigungen. Aufbauend auf diesen wird im Modellansatz sowohl die daraus resultierende Fahrzeuggeschwindigkeit als auch Gierbewegung des Fahrzeugs abgeleitet und die zukünftigen Egotrajektorien sowohl für das ungebremste kollisionsvermeidende Manöver als auch das kombinierte die Kollisionsfolgen lindernde Manöver bestimmt. Eingriffszeitpunkt und zu ergreifende Maßnahme werden durch Vergleich dieser Trajektorie mit der prädizierten Trajektorie des Hindernisobjekts ermittelt. Die Umsetzung der jeweiligen Trajektorien erfolgt für das kollisionsvermeidende Manöver aufgrund der auf den Lenkradwinkel beschränkten Stellgrößen durch eine einfache Trajektoriensteuerung, während das kollisionsfolgenlindernde Manöver die aus dem Sollbeschleunigungsvektor folgende Sollbeschleunigungen, bei gleichzeitiger Berücksichtigung des durch ein Pacjeka-Reifenmodell bestimmten Soll-Schräglaufwinkels und Längsschlupfs, regelt.

Die Verifizierung des vorgestellten Funktionsumfangs erfolgt in der Fahrdynamik-Simulationsumgebung IPG CarMaker unter Verwendung der Schnittstelle zu Matlab/ Simulink, unterliegt dabei jedoch einer idealisierten Abbildung des Verkehrsumfelds. So werden für die maschinelle Umfelderfassung zwar realistische Annahmen bezüglich der Systemlaufzeiten und der umfeldabhängigen Kommunikationswahrscheinlichkeiten getroffen, doch wird ansonsten von einer fehlerfreien Umfelderfassung ausgegangen.

In der Simulation konnte unter den gegebenen Randbedingungen sowohl die für eine solche Schutzfunktionalität notwendige Güte als auch Robustheit gegenüber Fehlern in der Schätzung des Kraftschlussbeiwertes von maximal ± 0,1 gezeigt werden. Die Abweichungen der realisierten Ist-Trajektorie von der Soll-Trajektorie liegen beim kollisionsvermeidenden Ausweichmanöver allesamt in einem Bereich unterhalb von 10 % der jeweils maximalen Manöverbreite, so dass diese bereits bei der Manöverplanung durch einen entsprechenden Sicherheitspuffer zum Kollisionsobjekt berücksichtigt werden können, ohne den potentiellen Anwendungsbereich stark einzuschränken. Auch beim die Kollisionsfolgen lindernden Manöver zeigen sich lediglich Abweichungen von der Solltrajektorie, die bei geeigneter Wahl des Kollisionspunktes (Hälfte der Vorderwagenlänge des Kollisionsobjektes) eine Kollision auf Höhe der Fahrgastzelle, für mindestens 90 % der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge, sicher vermeiden lassen. Inwieweit aufwändigere Regelungsalgorithmen die diesen einfachen Ansätzen zugrundliegenden Ergebnisse noch verbessern können, gilt es in weiterführenden Arbeiten zu untersuchen. In diesem Zusammenhang kritisch zu hinterfragen ist die Güte und Robus-

theit der aus dem Reifenmodell folgenden Parameter. Für einen neuen Reifen des Erstausstatters mag diese noch zutreffen, doch wird sich das Reifenverhalten mit Alter und Verschleiß verändern. Diese Einflüsse sind ebenfalls in weiteren Arbeiten zu betrachten.

Die Bewertung der Wirksamkeit des vorgestellten Konzepts anhand einer vergleichenden Simulation realer Verkehrsunfälle mit und ohne Schutzfunktionalität mit anschließender Kollisionsrechnung im Rahmen der Forschungsinitiative Ko-FAS beim Projektpartner Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH zeigt, dass dieses unter den angenommenen idealisierten Randbedingungen den größten Teil der durch Einbiegen-Kreuzenunfällen zwischen zwei Pkw verursachten Personenschäden zu vermeiden vermag. Dabei besitzt insbesondere im Bereich der Reduktion der Anzahl an Schwerverletzten und Getöteten das kollisionsvermeidende als auch das kollisionsfolgenlindernde Ausweichen ein zusätzliches, über die alleinige Notbremsung hinausgehendes, Potential.

Inwieweit dieses theoretisch realisierbare zusätzliche Potential aber die deutlich größere Komplexität und damit auch sicher einhergehende größere Fehleranfälligkeit rechtfertigt, gilt es kritisch zu diskutieren. In einem nächsten Schritt gilt es daher zunächst die erzielten Ergebnisse unter Verwendung von erweiterten Sensormodellen, die die Realität besser abbilden, nochmals zu bestätigen. Darüber hinaus fokussiert die bisherige Betrachtung auf die grundsätzliche fahrdynamische Umsetzung unter den diskutierten Randbedingungen. Potentieller Gegenverkehr welcher einerseits das realisierbare Potential einschränkt, darüber hinaus aber auch höchst anspruchsvolle Anforderungen an die maschinelle Umfelderfassung mit sich bringt, haben bislang im Rahmen der Simulation noch keine Berücksichtigung gefunden, so dass es auch diesen Aspekt bei weiteren Untersuchungen mit einzubinden gilt. Letztendlich gilt es aber auch neben dem potentiellen Gegenverkehr auch grundsätzlich im Straßenverkehr und speziell in innerstädtischen Szenarien vorhandene Dritte, wie Fußgänger oder Radfahrer, mit bei der Beurteilung einer solchen Funktionalität zu berücksichtigen.

In Summe lassen die vorliegenden Ergebnisse den Schluss zu, dass die vorgestellte Funktionalität zwar grundsätzlich darstellbar erscheint, dennoch ist zumindest das kollisionsvermeidende Ausweichmanöver aufgrund seiner hohen Komplexität und der mit einem solchen Manöver verbundenen notwendigen Querablage als äußerst kritisch zu beurteilen. Darüber hinaus hängt das realisierbare Potential auch von der Marktentwicklung der bekannten Kreuzungsassistenten ab. Je größer deren Marktanteil wird, desto weniger Fälle wird es geben, in denen die hier betrachtete Funktionalität überhaupt eingreifen muss. Auch wenn momentan ein nicht zu vernachlässigendes Potential für den hier betrachteten Ansatz besteht, so ist aufgrund der deutlich geringeren Komplexität die Markteinführung bekannter Kreuzungsassistenten weiter zu forcieren und zu fördern. Bei geringeren Anforderungen an die Umfelderfassung sowie einem klar definierten Referenzpunkt für die Manöverauslegung (reale oder virtuelle Haltelinie), lässt sich auf diese Weise deutlich einfacher und sicherer ein Großteil der Unfälle und damit auch der Personenschäden bei Einbiege-Kreuzen-Unfällen vermeiden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern dabei aber nicht nur einen Beitrag zur Beantwortung der Frage, wie der vorfahrtberechtigte Verkehrsteilnehmer im Rahmen der Möglichkeiten vor der Vorfahrtmissachtung eines wartepflichtigen Verkehrsteilnehmers geschützt werden kann und sollte, sondern besitzt auch Relevanz für die automatisierte Fahrzeugführung. Davon ausgehend, dass solche Fahrzeuge den Einzug in den Straßenverkehr finden, werden sie sich den Verkehrsraum jedoch noch für lange Zeit mit herkömmlichen, durch Menschen gesteuerten, Fahrzeugen teilen müssen. Die Herausforderungen des Knotenpunktes aus Sicht eines automatisierten Fahrzeugs sind dabei bereits in den verschiedensten Arbeiten thematisiert worden¹⁷³, so dass unter der Annahme einer entsprechenden Umfelderfassung und -interpretation von einem Einhalten der Verkehrsregeln ausgegangen werden kann. Solange Fahrzeuge aber noch von Menschen gefahren werden, werden diese auch Fehler begehen und unter anderem auch an Kreuzungen bewusst oder unbewusst die Vorfahrt missachten. Zur Beantwortung der Frage, wie sich ein vorfahrtberechtigtes automatisiertes Fahrzeug im Falle einer solchen Vorfahrtsmissachtung zu verhalten hat, ohne den Verkehrsfluss im großen Maße negativ zu beeinflussen, können die Ergebnisse der vorliegende Arbeit in Bezug auf Handlungsalternativen und Eingriffszeitpunkte als Grundlage dienen.

_

Vgl. z.B. Geyer (2013): Kooperatives Interaktionskonzept für, manöverbasierte Fahrzeugführung, Saust et al. (2011): Autonomous Vehicle Guidance, S. 169–174 oder Buehler et al. (2009): The DARPA Urban Challenge

8 Anhang

8.1 Eingriffstyp

8.1.1 Zeitliche Komponente Ausweichmanöver

Nicht verzögert:

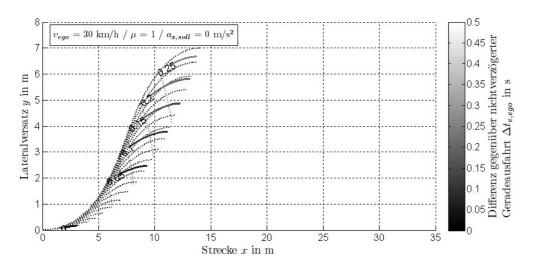


Abbildung 8-1 Differenz in der Manöverdauer des Ausweichens gegenüber der Geradeausfahrt aufgrund der längeren Wegstrecke bei Annahme $v_{ego,0}$ = konst = 30 km/h

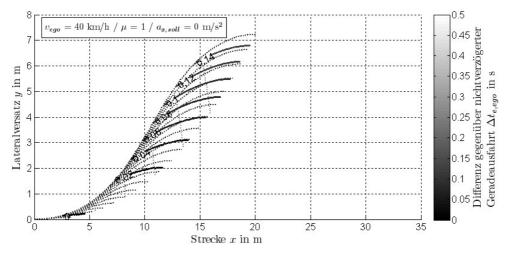


Abbildung 8-2 Differenz in der Manöverdauer des Ausweichens gegenüber der Geradeausfahrt aufgrund der längeren Wegstrecke bei Annahme $v_{ego,0}$ = konst = 40 km/h

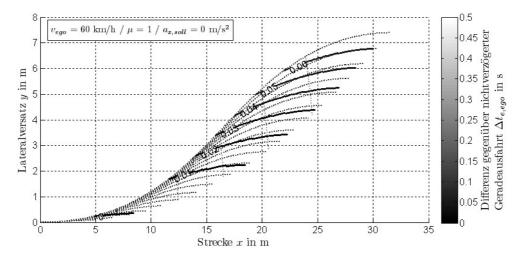


Abbildung 8-3 Differenz in der Manöverdauer des Ausweichens gegenüber der Geradeausfahrt aufgrund der längeren Wegstrecke bei Annahme $v_{ego,0}$ = konst = 60 km/h

Verzögert:

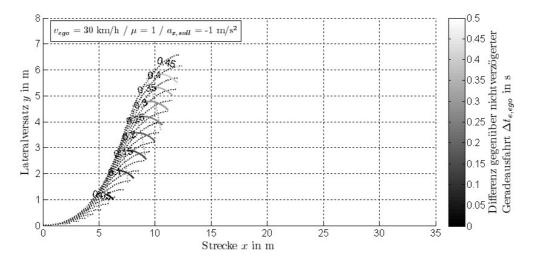


Abbildung 8-4 Differenz in der Manöverdauer des Ausweichens gegenüber der Geradeausfahrt aufgrund der längeren Wegstrecke sowie der Annahme einer konstanten Längsverzögerung während des Manövers (a_x = -1 m/s²) und einer Ausgangsfahrzeuggeschwindigkeit v_{ego} = 30 km/h

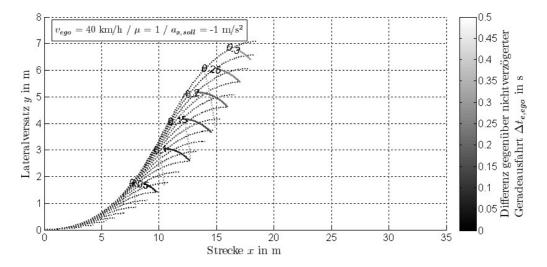


Abbildung 8-5 Differenz in der Manöverdauer des Ausweichens gegenüber der Geradeausfahrt aufgrund der längeren Wegstrecke sowie der Annahme einer konstanten Längsverzögerung während des Manövers (a_x = -1 m/s²) und einer Ausgangsfahrzeuggeschwindigkeit v_{ego} = 40 km/h

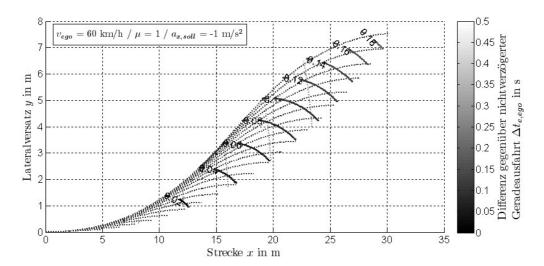


Abbildung 8-6 Differenz in der Manöverdauer des Ausweichens gegenüber der Geradeausfahrt aufgrund der längeren Wegstrecke sowie der Annahme einer konstanten Längsverzögerung während des Manövers (a_x = -1 m/s²) und einer Ausgangsfahrzeuggeschwindigkeit v_{ego} = 60 km/h

8.1.2 Optimierung des streckenbezogenen Lateralversatzes

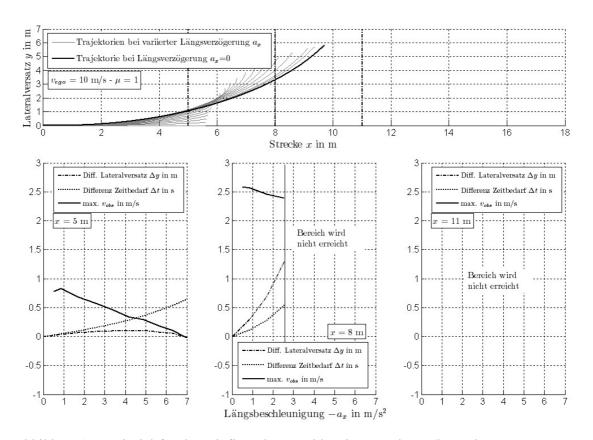


Abbildung 8-7 Beispiel für den Einfluss des Beschleunigungsvektors (bzw. der Längsverzögerung) auf den streckenbezogenen Lateralversatz bei v_{ego} = 10 m/s und μ = 1 (oben). Grenzgeschwindigkeit des Hindernisobjekts, bis zu der das kombinierte Brems-Ausweichmanöver einen größeren Relativversatz realisiert als das nichtverzögerte, in Abhängigkeit der Längsverzögerung für drei exemplarische Wegstrecken (unten).

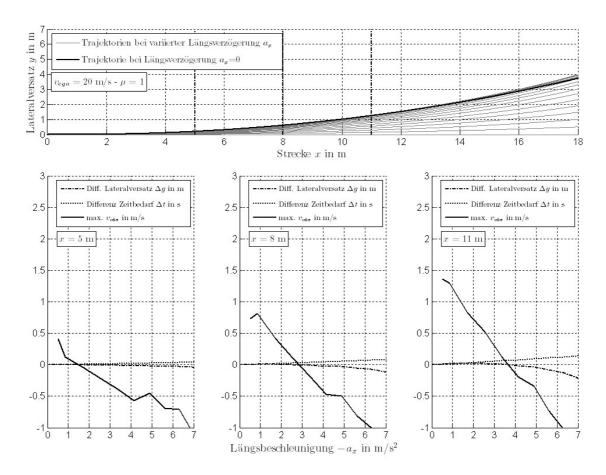


Abbildung 8-8 Beispiel für den Einfluss des Beschleunigungsvektors (bzw. der Längsverzögerung) auf den streckenbezogenen Lateralversatz bei v_{ego} = 20 m/s und μ = 1 (oben). Grenzgeschwindigkeit des Hindernisobjekts, bis zu der das kombinierte Brems-Ausweichmanöver einen größeren Relativversatz realisiert als das nichtverzögerte, in Abhängigkeit der Längsverzögerung für drei exemplarische Wegstrecken (unten).

8.2 Potential Kollisionsfolgenlinderung

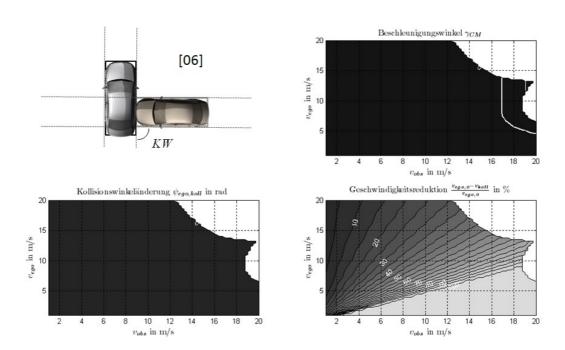


Abbildung 8-9 Beispiel des Linderungspotentials aus Sicht des Egofahrzeugs für eine exemplarische Ausgangskollisionskonstellation bei $AW = 90^{\circ}$ (Ordnungszahl 6)

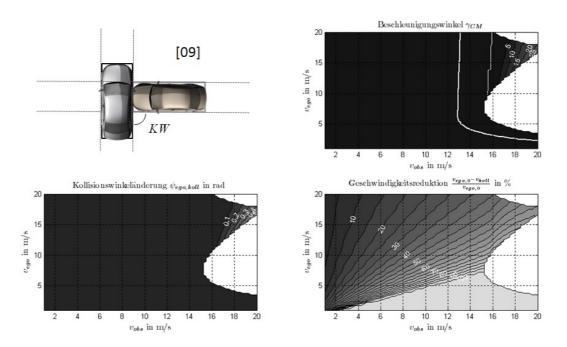


Abbildung 8-10 Beispiel des Linderungspotentials aus Sicht des Egofahrzeugs für eine exemplarische Ausgangskollisionskonstellation bei $AW = 90^{\circ}$ (Ordnungszahl 9)

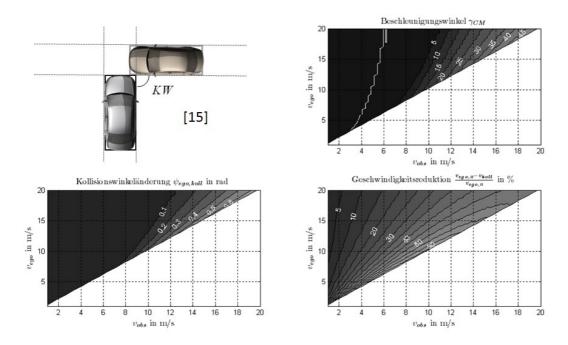


Abbildung 8-11 Beispiel des Linderungspotentials aus Sicht des Egofahrzeugs für eine exemplarische Ausgangskollisionskonstellation bei $AW = 90^{\circ}$ (Ordnungszahl 15)

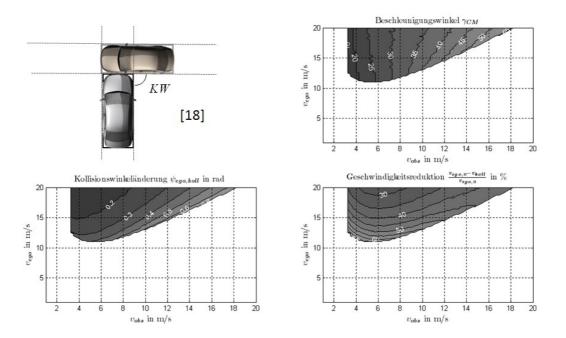


Abbildung 8-12 Beispiel des Linderungspotentials aus Sicht des Egofahrzeugs für eine exemplarische Ausgangskollisionskonstellation bei $AW = 90^{\circ}$ (Ordnungszahl 18)

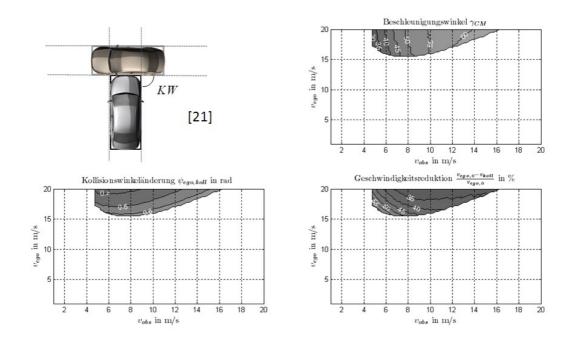


Abbildung 8-13 Beispiel des Linderungspotentials aus Sicht des Egofahrzeugs für eine exemplarische Ausgangskollisionskonstellation bei $AW = 90^{\circ}$ (Ordnungszahl 21)

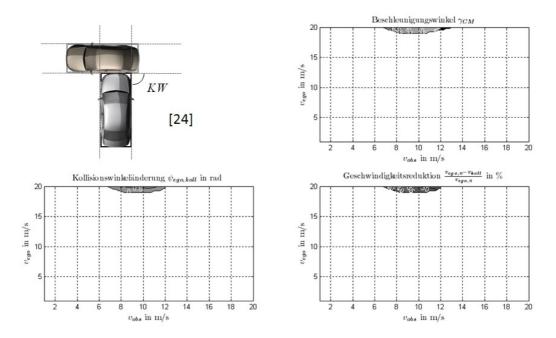


Abbildung 8-14 Beispiel des Linderungspotentials aus Sicht des Egofahrzeugs für eine exemplarische Ausgangskollisionskonstellation bei $AW = 90^{\circ}$ (Ordnungszahl 24)3

8.3 Parameter des Simulationsmodells

Tabelle 8-1 Eingesetzte Parameter des Einspurmodells

Größe	Wert	Erläuterung
l_f	1,313 m	Abstand Schwerpunkt-Vorderachse
l_r	1,575 m	Abstand Schwerpunkt-Hinterachse
l	2,888 m	Radstand
m	1.564 kg	Masse
i_s	13,7	Lenkungsübersetzung
Θ	2.798 kgm²	Gierträgheit um die z-Achse
c_{α}	90.000 N/rad	Achsschräglaufsteifigkeit
c_{λ}	63.000 N/rad	Achslängssteifigkeit

8.4 Fahrzeugbestand und Überhanglängen nach Segmenten und Baureihen

Tabelle 8-2: Gesamtübersicht

Segmente	Fahrzeugbestand absolut	Fahrzeugbestand relativ
Minis	2822681	6,4 %
Kleinwagen	8846576	20,2 %
Kompaktklasse	11643865	26,6 %
Mittelklasse	7412029	16,9 %
Obere Mittelklasse	2152495	4,9 %
Oberklasse	254421	0,6 %
SUVs	1244351	2,8 %
Geländewagen	1534934	3,5 %
Sportwagen	780708	1,8 %
Vans	3920431	8,9 %
Utilities	1527249	3,5 %
Wohnmobile*	369087	0,8 %
Summe	43.851.230	100,0 %

^{*} Wohnmobile sind bei den weiteren Untersuchungen nicht mit berücksichtigt worden

Tabelle 8-3: Minis

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Chevrolet Matiz	2014	615	Strichskizze**	63407	2.25%
Chevrolet Spark	2011	727	Strichskizze	35532	1.26%
Citroen C1	2010	650	Datenblatt***	88139	3.12%
Daihatsu Cuore	2010	550	Datenblatt	43300	1.53%
Fiat 500	2012	703	Datenblatt	119862	4.25%
Fiat Cinquecento	1995	578	Datenblatt	16783	0.59%
Fiat Panda	2009	737	Datenblatt	184725	6.54%
Fiat Seicento	2001	632	Datenblatt	43815	1.55%
Ford Ka	2009	705	Strichskizze	236128	8.37%
Hyundai Atos	2008	665	Strichskizze	33427	1.18%
Hyundai i10	2014	740	Datenblatt	98033	3.47%
Kia Picanto	2011	645	Strichskizze	101145	3.58%
Opel Agila	2009	780	Datenblatt	105613	3.74%
Peugeot 106	1997	660	Datenblatt	69681	2.47%
Peugeot 107	2013	645	Datenblatt	62080	2.20%
Renault Twingo	2010	708	Datenblatt	407946	14.45%
Seat Arosa	2002	737	Datenblatt	54393	1.93%
Seat Mii	2013	595	Datenblatt	18736	0.66%
Skoda CitiGo	2013	599	Datenblatt	22953	0.81%
Smart ForTwo	2013	425	Datenblatt	337671	11.96%
Suzuki Alto	2013	595	Strichskizze	32493	1.15%
Suzuki Splash	2013	770	Strichskizze	27391	0.97%
Suzuki Wagon R	2002	640	Strichskizze	22616	0.80%
Toyota AYGO	2014	675	Datenblatt	115935	4.11%
Toyota iQ	2013	530	Datenblatt	16068	0.57%
VW Fox	2011	815	Strichskizze	132813	4.71%
VW Lupo	2002	737	Datenblatt	195651	6.93%
VW UP	2014	585	Datenblatt	88163	3.12%
Summe				2774499	98.29%

^{**} Für die Länge der vorderen Überhänge konnten keine Werte ermittelt werden. Daher sind diese per Hand aus Strichskizzen der jeweiligen Modelltypen ausgemessen worden. Die angegebenen Werte unterliegen somit einer gewissen Unsicherheit.

^{***} Die angegebenen Werte für die Länge der vorderen Überhänge entstammen, Datenblättern der jeweiligen Modelltypen.

Tabelle 8-4: Kleinwagen

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Alfa Mito	2008	904	Datenblatt	15821	0.18%
Audi A1,S1	2014	808	Datenblatt	84552	0.96%
Audi A2	2005	749	Datenblatt	63327	0.72%
Chevrolet Aveo	2008	748	Strichskizze	24419	0.28%
Citroen C2	2010	760	Datenblatt	50317	0.57%
Citroen C3	2014	815	Datenblatt	121854	1.38%
Citroen DS3	2014	824	Datenblatt	18108	0.20%
Daihatsu Sirion	2010	685	Datenblatt	34396	0.39%
Fiat Punto	2010	890	Datenblatt	372354	4.21%
Ford Fiesta	2009	806	Strichskizze	874245	9.88%
Honda Jazz	2014	722	Strichskizze	145851	1.65%
Honda Logo	1999	820	Strichskizze	6753	0.08%
Hyundai Getz	2009	775	Datenblatt	83070	0.94%
Hyundai i20	2014	785	Datenblatt	67274	0.76%
Kia Rio	2013	805	Datenblatt	57919	0.65%
Mazda 2	2014	790	Strichskizze	114875	1.30%
Mini	2014	749	Datenblatt	294231	3.33%
Mitsubishi Colt	2009	780	Datenblatt	157419	1.78%
Nissan Juke	2011	855	Datenblatt	27014	0.31%
Nissan Micra	2014	667	Strichskizze	268423	3.03%
Opel Adam	2014	820	Strichskizze	20246	0.23%
Opel Corsa	2009	869	Datenblatt	1377595	15.57%
Opel Tigra	2008	814	Datenblatt	46229	0.52%
Peugeot 205	1995	680	Datenblatt	8566	0.10%
Peugeot 206	2012	776	Datenblatt	354933	4.01%
Peugeot 207	2014	829	Datenblatt	216705	2.45%
Peugeot 208	2012	772	Datenblatt	25753	0.29%
Renault Clio	2013	853	Datenblatt	408423	4.62%
Seat Cordoba	2008	831	Datenblatt	27429	0.31%
Seat Ibiza	2012	848	Datenblatt	349262	3.95%
Skoda Fabia	2012	851	Datenblatt	634789	7.18%
Skoda Felicia	1998	818	Strichskizze	20101	0.23%
Smart ForFour	2006	765	Datenblatt	38232	0.43%
Smart Roadster	2005	594	Datenblatt	12295	0.14%
Subaru Justy	2011	720	Datenblatt	21055	0.24%
Suzuki Swift	2012	820	Datenblatt	120413	1.36%
Suzuki SX4 Classic	2011	920	Datenblatt	46500	0.53%
Toyota Starlet	1998	800	Strichskizze	32493	0.37%
Toyota Yaris	2014	810	Datenblatt	306405	3.46%
Toyota Yaris Verso	2005	725	Datenblatt	28358	0.32%
VW Polo	2014	844	Datenblatt	1565347	17.69%
Summe		44 (47)	•	8543351	96.57%

Tabelle 8-5: Kompaktwagen

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Alfa Romeo 147	2005	925	Datenblatt	30480	0.26%
Alfa Romeo Giulietta	2010	955	Datenblatt	14630	0.13%
Audi A3, S3, RS3	2014	869	Datenblatt	692508	5.95%
BMW 1er	2014	765	Datenblatt	446874	3.84%
Citroen C4	2014	879	Datenblatt	102977	0.88%
Citroen DS4	2012	924	Datenblatt	4318	0.04%
Citroen Xsara	2000	868	Datenblatt	72237	0.62%
Dacia Logan	2009	800	Datenblatt	97494	0.84%
Dacia Sandero	2010	785	Datenblatt	113246	0.97%
Fiat Bravo	2014	974	Datenblatt	32823	0.28%
Fiat Stilo	2008	878	Datenblatt	44237	0.38%
Ford Focus	2014	870	Strichskizze	889230	7.64%
Honda Civic	2014	856	Strichskizze	186597	1.60%
Hyundai i30	2014	880	Datenblatt	162478	1.40%
Kai Ceed	2012	900	Datenblatt	94623	0.81%
Mazda 3	2014	827	Strichskizze	132498	1.14%
Mazda MX 5	2014	830	Strichskizze	81102	0.70%
Mercedes A-Klasse	2014	906	Datenblatt	728348	6.26%
Mitsubishi Lancer	2014	955	Datenblatt	32202	0.28%
Mitsubishi Space Star	2013	730	Datenblatt	47737	0.41%
Nissan Almera	2005	878	Strichskizze	70281	0.60%
Opel Astra	2014	960	Strichskizze	1564336	13.43%
Peugeot 306	1995	780	Datenblatt	53445	0.46%
Peugeot 307	2006	878	Datenblatt	144632	1.24%
Peugeot 308	2010	926	Datenblatt	71925	0.62%
Renault Megane	2008	862	Datenblatt	329149	2.83%
Seat Leon	2014	941	Datenblatt	157002	1.35%
Skoda Octavia	2011	853	Datenblatt	533026	4.58%
Subaru Impreza	2014	955	Strichskizze	20499	0.18%
Toyota Auris	2013	925	Strichskizze	103471	0.89%
Toyota Corolla	2014	920	Datenblatt	222777	1.91%
Toyota Prius	2014	925	Datenblatt	26552	0.23%
VW Beetle	2014	878	Datenblatt	87864	0.75%
VW Golf	2014	869	Datenblatt	3578554	30.73%
VW Jetta	2011	889	Datenblatt	143329	1.23%
Summe				11113481	95.44%

Tabelle 8-6: Mittelklasse

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Alfa 156	2003	953	Datenblatt	28080	0.38%
Audi A4, S4, RS4	2014	862	Datenblatt	1117553	15.08%
Audi A5, S5, RS5	2014	861	Datenblatt	95418	1.29%
BMW 3er	2014	776	Datenblatt	1337513	18.05%
BMW 4er	2014	757	Datenblatt	2172	0.03%
Citroen C5	2014	1054	Datenblatt	61070	0.82%
Citroen DS5	2012	996	Datenblatt	2053	0.03%
Ford Mondeo	2012	921	Datenblatt	423050	5.71%
Honda Accord	2008	980	Strichskizze	61015	0.82%
Hyundai Coupe	2011	975	Datenblatt	10808	0.15%
Mazda 6	2008	980	Strichskizze	148357	2.00%
Mercedes C-Klasse	2014	790	Datenblatt	1128954	15.23%
Mercedes CLA-Klasse	2014	915	Datenblatt	8663	0.12%
Mitsubishi Carisma	2004	905	Datenblatt	43935	0.59%
Nissan Primera	2000	910	Datenblatt	75096	1.01%
Opel Insignia	2009	1015	Datenblatt	115777	1.56%
Opel Signum	2007	920	Datenblatt	41611	0.56%
Opel Vectra	2007	920	Datenblatt	382265	5.16%
Peugeot 407	2009	1029	Datenblatt	33883	0.46%
Peugeot 508	2014	985	Datenblatt	15532	0.21%
Renault Laguna	2009	1022	Datenblatt	129226	1.74%
Saab 9-3	2009	981	Datenblatt	40447	0.55%
Seat Exeo	2010	976	Datenblatt	22476	0.30%
Skoda Superb	2009	964	Datenblatt	81275	1.10%
Subaru Legacy	2014	980	Strichskizze	27146	0.37%
Suzuki Kizashi	2013	945	Strichskizze	1640	0.02%
Toyota Avensis	2014	980	Datenblatt	166264	2.24%
Volvo S60, V60	2014	936	Datenblatt	37108	0.50%
Volvo V40	2014	908	Datenblatt	84974	1.15%
Volvo V50	2011	862	Strichskizze	51792	0.70%
VW Passat	2014	941	Datenblatt	1211395	16.34%
VW Scirocco	2014	924	Datenblatt	39448	0.53%
Summe				7025996	94.79%

Tabelle 8-7: Obere Mittelklasse

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Audi A6, S6, RS6	2014	912	Datenblatt	463438	21.53%
BMW 5er	2014	832	Datenblatt	596539	27.71%
Chrysler 300c	2010	880	Strichskizze	8759	0.41%
Ford Scorpio	1995	918	Strichskizze	7938	0.37%
Mercedes E-Klasse	2014	849	Datenblatt	736996	34.24%
Opel Omega	2001	1000	Datenblatt	104371	4.85%
Peugeot 607	2010	974	Datenblatt	5893	0.27%
Saab 9-5	2010	1021	Datenblatt	11453	0.53%
Volvo S80	2011	978	Datenblatt	12834	0.60%
Volvo V70	2012	978	Datenblatt	135469	6.29%
Summe				2083690	96.80%

Tabelle 8-8: Oberklasse

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Audi A7, S7, RS7	2014	937	Datenblatt	11236	4.42%
Audi A8, S8	2014	1000	Datenblatt	34952	13.74%
BMW 6er	2014	941	Datenblatt	14077	5,53%
BMW 7er	2014	866	Datenblatt	58757	23.09%
BMW 8er	1994	1030	Strichskizze	2976	1.17%
Jaguar XJ	2014	827	Strichskizze	11651	4.58%
Mercedes CLS	2014	898	Datenblatt	28384	11.16%
Mercedes S-Klasse	2014	888	Datenblatt	55903	21.97%
Porsche Panamera	2011	977	Strichskizze	8258	3.25%
VW Pheaton	2014	1067	Strichskizze	16909	6.65%
Summe				243103	95.55%

Tabelle 8-9: SUVs

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
BMW X1	2014	791	Datenblatt	102107	8.21%
Chevrolet Captiva	2009	926	Datenblatt	23981	1.93%
Dacia Duster	2011	822	Datenblatt	65737	5.28%
Daihatsu Terios	2009	670	Datenblatt	12860	1.03%
Fiat Sedici	2012	840	Datenblatt	9714	0.78%
Ford Kuga	2009	880	Strichskizze	84594	6.80%
Honda CR-V	2012	915	Strichskizze	65831	5.29%
Hyundai IX 35	2014	880	Datenblatt	63339	5.09%
Hyundai Tucson	2007	885	Datenblatt	47251	3.80%
Kia Sportage	2010	890	Datenblatt	64205	5.16%
Lada Niva	2010	705	Datenblatt	16607	1.33%
Mazda CX-5	2013	950	Strichskizze	23849	1.92%
Mazda CX-7	2013	995	Strichskizze	10772	0.87%
Mercedes GLK	2014	824	Datenblatt	71966	5.78%
Mercedes R-Klasse	2011	922	Datenblatt	11153	0.90%
Mitsubishi ASX	2011	870	Datenblatt	28428	2.28%
Mitsubishi Outlander	2014	955	Datenblatt	35421	2.85%
Nissan Qashqai	2014	880	Strichskizze	151860	12.20%
Opel Antara	2009	926	Datenblatt	18211	1.46%
Opel Mokka	2014	943	Datenblatt	21827	1.75%
Renault Koleos	2014	955	Datenblatt	11311	0.91%
Skoda Yeti	2014	877	Datenblatt	83191	6.69%
Ssangyong Korando	2011	843	Strichskizze	1000	0.08%
Suzuki Samurai	2004	580	Datenblatt	9360	0.75%
Suzuki Vitara	1998	685	Strichskizze	15741	1.26%
Toyota RAV4	2012	760	Datenblatt	111530	8.96%
Summe				1161846	93.37%

Tabelle 8-10: Geländewagen

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Audi Q3	2014	901	Datenblatt	49952	3.25%
Audi Q5	2014	895	Datenblatt	87443	5.70%
Audi Q7	2014	962	Datenblatt	26438	1.72%
BMW X3	2014	858	Datenblatt	150832	9.83%
BMW X5	2014	890	Datenblatt	70673	4.60%
BMW X6	2014	858	Datenblatt	13496	0.88%
Hyundai Santa Fe	2013	935	Datenblatt	43046	2.80%
Jeep Grand Cherokee	2014	795	Strichskizze	28105	1.83%
Jeep Wrangler	2013	715	Datenblatt	14812	0.96%
Kia Sorento	2010	945	Datenblatt	46701	3.04%
Landrover Freelander	2010	906	Strichskizze	25054	1.63%
Mercedes G-Klasse	2014	783	Datenblatt	12851	0.84%
Mercedes GL-Klasse	2014	885	Datenblatt	6592	0.43%
Mercedes ML-Klasse	2014	880	Datenblatt	120209	7.83%
Mitsubishi Pajero	2007	745	Datenblatt	37480	2.44%
Nissan X-Trail	2006	905	Strichskizze	46078	3.00%
Opel Frontera	2001	771	Datenblatt	16960	1.10%
Porsche Cayenne	2012	855	Strichskizze	38197	2.49%
Subaru Forester	2013	970	Strichskizze	46445	3.03%
Suzuki Grand Vitara	2006	785	Datenblatt	51988	3.39%
Suzuki Jimny	2013	695	Strichskizze	58006	3.78%
Volvo XC60	2012	909	Datenblatt	36929	2.41%
V olvo XC90	2013	901	Datenblatt	25927	1.69%
VW Tiguan	2011	926	Datenblatt	260231	16.95%
VW Touareg	2011	924	Strichskizze	74171	4.83%
Summe				1388616	90.47%

Tabelle 8-11: Sportwagen

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Alfa Spider	2008	1000	Datenblatt	11709	1.50%
Audi R8	2014	1007	Datenblatt	2970	0.38%
Audi TT	2014	884	Datenblatt	82343	10.55%
BMW Z3	2002	808	Datenblatt	49192	6.30%
BMW Z4	2014	850	Datenblatt	48466	6.21%
BMW Z8	2003	900	Datenblatt	1552	0.20%
Chevrolet Corvette	2013	906	Strichskizze	4103	0.53%
Ferrari F430	2008	1100	Strichskizze	1132	0.14%
Lotus Elise	2010	701	Datenblatt	1702	0.22%
Mercedes CLK	2003	845	Datenblatt	121552	15.57%
Mercedes E-Klasse Coupe	2014	862	Datenblatt	36230	4.64%
Mercedes SL	2014	998	Datenblatt	58704	7.52%
Mercedes SLK	2014	870	Datenblatt	160635	20.58%
Mercedes SLS AMG	2014	942	Datenblatt	2259	0.29%
Nissan 370Z	2009	940	Datenblatt	1666	0.21%
Peugeot RCZ	2010	934	Datenblatt	6053	0.78%
Porsche 911	2013	1069	Strichskizze	89078	11.41%
Porsche Boxster	2014	927	Strichskizze	30233	3.87%
Summe				709579	90.89%

Tabelle 8-12: (Mini-)Vans

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Chevrolet Rezzo	2008	882	Strichskizze	6742	0.36%
Chrysler PT Cruiser	2010	735	Strichskizze	24281	1.30%
Dacia Lodgy	2012	822	Datenblatt	11447	0.61%
Fiat Idea	2011	794	Datenblatt	8181	0.44%
Fiat Multipla	2009	837	Datenblatt	7347	0.39%
Ford B-Max	2014	722	Strichskizze	19690	1.05%
Ford C-Max	2011	845	Strichskizze	179524	9.59%
Honda FR-V	2009	850	Strichskizze	8619	0.46%
Hyundai IX20	2011	805	Datenblatt	28203	1.51%
Hyundai Matrix	2010	790	Datenblatt	32764	1.75%
Kia Soul	2010	840	Datenblatt	7043	0.38%
Kia Venga	2012	812	Strichskizze	24319	1.30%
Mazda Premacy	2006	922	Strichskizze	42954	2.29%
Mercedes B-Klasse	2014	887	Datenblatt	325512	17.39%
Mercedes Vaneo	2005	627	Datenblatt	22262	1.19%
Nissan Almera Tino	2006	878	Datenblatt	33219	1.77%
Nissan Note	2013	850	Strichskizze	57408	3.07%
Opel Meriva	2010	927	Datenblatt	421670	22.52%
Peugeot 1007	2009	787	Datenblatt	13828	0.74%
Peugeot 3008	2013	916	Datenblatt	14635	0.78%
Renault Modus	2010	802	Strichskizze	81183	4.34%
Renault Scenic	2008	851	Strichskizze	281027	15.01%
Skoda Roomster	2010	860	Datenblatt	109590	5.85%
Toyota Urban Cruiser	2010	720	Datenblatt	3464	0.19%
Toyota Verso-S	2011	695	Strichskizze	11501	0.61%
Summe				1776413	94.88%

Tabelle 8-13: Großraum-Vans

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Chevrolet Orlando	2013	880	Strichskizze	12190	0.60%
Chrysler Voyager	2010	844	Strichskizze	30898	1.51%
Citroen C8	2009	1013	Datenblatt	14405	0.70%
Fiat Freemont	2012	995	Strichskizze	6777	0.33%
Fiat Ulysse	2002	1013	Datenblatt	8712	0.43%
Ford Galaxy	2011	935	Strichskizze	128947	6.30%
Ford Grand C-Max	2014	845	Strichskizze	24179	1.18%
Ford S-Max	2014	929	Strichskizze	84973	4.15%
Kia Carens	2011	935	Datenblatt	24761	1.21%
Kia Camival	2011	915	Strichskizze	19726	0.96%
Mazda 5	2008	945	Strichskizze	71434	3.49%
Mazda MPV	2007	933	Strichskizze	7432	0.36%
Mercedes Viano	2011	824	Strichskizze	52901	2.58%
Mitsubishi Grandis	2009	900	Datenblatt	7793	0.38%
Mitsubishi Space Wagon	1999	890	Strichskizze	7592	0.37%
Opel Zafira	2012	994	Strichskizze	470495	22.97%
Peugeot 5008	2010	936	Datenblatt	15087	0.74%
Peugeot 807	2009	1013	Datenblatt	15095	0.74%
Renault Espace	2009	1021	Datenblatt	53329	2.60%
Seat Alhambra	2014	986	Strichskizze	58503	2.86%
Toyota Avensis Verso	2009	875	Strichskizze	4406	0.22%
Toyota Corolla Verso	2009	825	Strichskizze	67302	3.29%
Toyota Previa	2010	870	Strichskizze	6202	0.30%
Toyota Verso	2010	865	Strichskizze	30640	1.50%
VW Sharan	2010	968	Strichskizze	188170	9.19%
VW Touran	2014	890	Strichskizze	581211	28.38%
Summe				1993160	97.32%

Tabelle 8-14: Utilities

Тур	Modelljahr	Überhang vorne in mm	Anmerkungen	Anzahl [abs]	Anzahl [%]
Citroen Berlingo	2008	925	Datenblatt	139626	9.14%
Citroen Jumper	2007	948	Datenblatt	3953	0.26%
Citroen Jumpy	2007	975	Datenblatt	8333	0.55%
Citroen Nemo	2008	760	Datenblatt	3384	0.22%
Dacia Dokker	2013	822	Datenblatt	3914	0.26%
Fiat Doblo	2007	833	Datenblatt	37179	2.43%
Fiat Ducato	2007	948	Datenblatt	10374	0.68%
Fiat Fiorino	2008	760	Datenblatt	10112	0.66%
Fiat Scudo	2012	975	Datenblatt	12684	0.83%
Ford Transit Connect	2014	879	Datenblatt	11110	0.73%
Ford Transit, Tourneo	2011	904	Datenblatt	69136	4.53%
Hyundai H-1 Starex	2008	855	Datenblatt	7670	0.50%
Mercedes Citan	2012	920	Datenblatt	1359	0.09%
Mercedes Sprinter	2011	939	Datenblatt	42905	2.81%
Mercedes Vito	2010	783	Datenblatt	64458	4.22%
Nissan NV 200	2012	835	Datenblatt	7276	0.48%
Opel Combo	2009	749	Datenblatt	44502	2.91%
Opel Movano	2011	842	Datenblatt	3100	0.20%
Opel Vivaro	2006	833	Datenblatt	35927	2.35%
Peugeot Boxer	2006	948	Datenblatt	4103	0.27%
Peugeot Expert	2012	975	Datenblatt	6201	0.41%
Peugeot Partner	2011	925	Datenblatt	40416	2.65%
Renault Kangoo	2013	875	Datenblatt	135292	8.86%
Renault Master	2007	862	Datenblatt	4749	0.31%
Renault Trafic	2009	833	Datenblatt	24669	1.62%
Toyota HiAce	2011	940	Strichskizze	3141	0.21%
VW Caddy	2012	878	Datenblatt	279777	18.32%
VW Crafter	2012	1000	Datenblatt	6485	0.42%
VW Transporter	2011	894	Datenblatt	472127	30.91%
Summe				1493962	97.82%

Literaturverzeichnis

ADAC: Comparative test of advanced emergency braking systems. Comparative Test EBA, 2012

Adams, Lisa D.: Review of the Literature on Obstacle Avoidance Maneuvers: Braking versus Steering. Review on Obstacle Avoidance Maneuvers. Hg. v. Ann Arbor Transportation Research Institute University of Michigan (UMTRI-94-19), 1994

Ahn, Changsun; Peng, Huei; Tseng, Hongtei Eric: Robust Estimation of Road Friction Coefficient. Estimation Road Friction Coefficient. In: IEEE (Hg.): American Control Conference. 2011 American Control Conference. O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA, June 29 - July 01. IEEE, S. 3948–3953, 2011

Albrecht, Frank: Die rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Implementierung von Fahrerassistenzsystemen zur Geschwindigkeitsbeeinflussung. Rechtliche Rahmenbedingungen Fahrerassistenzsystemen zur Geschwindigkeitsbeeinflussung. In: *Deutsches Autorecht*, S. 186–198, 2005

Ameling, Christian: Steigerung der aktiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen durch ein Kollisionsvermeidungssystem. Aktive Sicherheit durch Kollisionsvermeidungssystem. Düsseldorf: VDI, 2002

Andersson, M.; Bruzelius, J.; Casselgren, M.; Gäfvert, M.; Hjort, M.; Hultén, J. et al.: Road Friction Estimation. IVSS Project Report, (2004:17750), 2004

Bewersdorf, Cornelia: Zur Vereinbarkeit von nicht-übersteuerbaren Fahrerassistenzsystemen mit dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr vom 8. November 1968. Vereinbarkeit nicht-übersteuerbarer Fahrerassistenzsysteme mit WÜ. In: *Neue Zeitschrift für Verkehrsrecht* 6, 2003

BMW Group PressClub: Der Linksabbiegeassistent – vorausschauend und sicher links Abbiegen. Der Linksabbiegeassistent, Pressemitteilung vom 16.05.2011

Bootz, Andreas: Konzept eines energiesparenden elektrohydraulischen Closed-Center-Lenksystems für Pkw mit hoher Lenkleistung. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2004

Bortz, Jürgen: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (Springer-Lehrbuch), 2005.

Brännström, Mattias; Coelingh, Erik; Sjöberg, Jonas: Model-Based Threat Assessment for Avoiding Arbitrary Vehicle Collisions. Threat Assessment for Avoiding Collisions 11 (3), S. 658–669, 2010.

Brännström, Mattias; Sjöberg, Jonas; Helgesson, Linus; Christiansson, Mikael: A Real-time Implementation of an Intersection Collision Avoidance System. In: 18th IFAC World Congress, Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011, S. 9794–9798, 2011.

Breuer, J.; Mücke, S.: Bewertung von Sicherheitssystemen in Fahrversuch. Bewertung von Sicherheitssystemen in Fahrversuch. In: Ralph Bruder (Hg.): Wie objektiv sind Fahrversuche? Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt, 14./15. März 2007, Stuttgart: Ergonomia-Verl, S. 119–129, 2007.

Broadhurst, Adrian; Baker, Simon; Kanade, Takeo: Monte Carlo Road Safety Reasoning. In: Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium 2005, 6-8 Juni 2005, Las Vegas, Nevada, USA, S. 319 – 324, 2005

Buehler, Martin; Iagnemma, Karl; Singh, Sanjiv: The DARPA Urban Challenge. Autonomous vehicles in city traffic. The DARPA Urban Challenge. Berlin: Springer (Springer tracts in advanced robotics, 56), 2009

Chiang, Cheng-Chin; Ho, Ming-Che; Liao, Hong-Sheng; Pramata, Andi; Syu, Wei-Cheng: Detecting and Recognizing Traffic Lights by Genetic Approximate Ellipse Detection and Spatial Texture Layouts. Detecting and Recognizing Traffic Lights. In: *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 7 (12), S. 6919–6934, 2011

Continental AG: Datenblatt - MFC 2 Kamera. Datenblatt - MFC 2 Kamera, 2009

Continental AG: Datenblatt - SRR 2xx. Datenblatt - SRR 2xx, 2012

Dang, Thao; Desens, Jens; Franke, Uwe; Gavrila, Dariu; Schäfers, Lorenz; Ziegler, Walter: Steering an Evasion Assist. Steering an Evasion Assist. In: Azim Eskandarian (Hg.): Handbook of Intelligent Vehicles. London [u.a.]: Springer, S. 758–782, 2012

Darms, Michael: Fusion umfelderfassender Sensoren. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 237–247, 2012

Diebold, Jürgen: Das APIA-Projekt – Der Weg zum unfall- und verletzungsvermeidenden Fahrzeug. Das APIA-Projekt. In: *Automobiltechnische Zeitung (ATZ)*, S. 28–32, 2003

Distner, Martin; Bengtsson, Mattias; Broberg, Thomas; Jakobsson, Lotta: City Safety - A System Adressing Rear-End Collisions at Low Speeds. City Safety. In: The 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV) Stuttgart, Germany, June 15–18, 2009 (Paper Number 09-0371), 2009.

Eichhorn, U.: Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn - Erkennung und Einflussgrößen. Reibwert Reifen Fahrbahn. Düsseldorf: VDI-Verl. (Reihe 12, Nr. 222), 1994

Erbsmehl, Christian: Analyse von Einbaulagen für Hochvoltsysteme und Energiespeicher im Fahrzeug auf Basis von Unfalldaten. Analyse Einbaulagen Hochvoltsysteme Energiespeicher. In: 8. VDI Tagung Fahrzeugsicherheit – Fokus Elektromobilität. Berlin, 04.10.2011, 2011

Europäische Kommisison: Leitlinien für die Politik im Bereich der Straßenverkehrssicherheit 2011-2020. Leitlinien Straßenverkehrssicherheit 2011-2020, 2007

Europäische Kommisison: WHITE PAPER. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. Roadmap European Transport Area, 2011

Fleck, Raider: Methodische Entwicklung mechatronischer Lenksysteme mit Steer-by-Wire Funktionalität. Methodische Entwicklung mechatronischer Lenksysteme. In: fahrwer.tech 2003. München, 11.-12.03.2003, 2003

Fleury, D.; Ferrandez, F.; Lepesant, C.; Lechner, D.: Analyse typologique des manoeuvre d'urgence en intersection. Analyse manoeuvre d'urgence en intersection (Rapport INRETS n° 62), 1988

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RASt 06. Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen, 2006

Galbas, Roland; Freess, Jascha; Uhl, Heribert: Ausweichfunktion zur Vermeidung von Kollisionen. Veröffentlichungsnr: DE 10 2008 040 241 A1, 2008

Geduld, Georg: Lidarsensorik. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 172–185, 2012

Gelau, Christhard; Gasser, Tom Michael; Seeck, Andre: Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 24–32, 2012

Geyer, Sebastian: Entwicklung und Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung. Düsseldorf: VDI-Verl (Fahrzeugtechnik TU Darmstadt, 770), 2013

Geyer, Sebastian; Kienle, Martin; Franz, Benjamin; Winner, Hermann; Bengler, Klaus; Baltzer, Marcel; Flemisch, Frank et al.: 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*, 2013

Giebel, Tobias; Eigel, Thomas; Semmler, Carsten: Verfahren und Vorrichtung zur Längs- und Querführung eines Kraftfahrzeugs. Veröffentlichungsnr: DE 10 2009 017 152 A1, 2009

Haken, Karl-Ludwig: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. München: Hanser, 2008

Heck, Philip; Gonter, Mark; Bellin, Jan; Maurer, Markus: Beitrag zur integralen Sicherheit durch ein situativ adaptiertes Entscheidungsverfahren. Beitrag zur integralen Sicherheit. In: 28. VDI-VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit. Braunschweig (Nr. 2166), 2012

Heck, Philip; Nellin, Jan; Matousek, Martin; Wonneberger, Stefan; Sychrovsky, Ondrej; Sara, Radmin; Maurer, Markus: Collision Mitigation for Crossing Traffic in Urban Scenarios. Collision Mitigation for Crossing Traffic. In: IEEE (Hg.): 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), June 23-26, 2013, Gold Coast, Australia, S. 559–566, 2013

Hillenbrand, Jörg; Spieker, Andreas M.; Kroschel, Kristian: A Multilevel Collision Mitigation Approach. Its Situation Assessment, Decision Making, and Performance Tradeoffs. Multilevel Collision Mitigation Approach. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 7 (4), S. 528–540, 2006

Hoffmann, Jens: Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Das Darmstädter Verfahren (EVITA). Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, 693), 2008

Holzmann, Frédéric: Adaptive cooperation between driver and assistant system. Improving road safety. Cooperation driver and assistant system. Berlin: Springer, 2008

Holzmann, Frederic; Bellino, Mario; Siegwart, Roland; Bubb, Heiner: Predictive estimation of the road-tire friction coefficient. Predictive estimation road-tire friction coefficient. In: 2006 IEEE Conference on Computer-Aided Control Systems Design. München, 4-6 Oktober 2006, S. 885–890, 2006

Homm, Florian; Duda, Alexander; Kämpchen, Nico; Waldmann, Peter; Ardelt, Michael: Lidarbasierte Fahrstreifen- und Randbebauungserkennung mit Occupancy Grids für Spurhalte- und Spurwechselfunktionen. In: 4. Tagung Fahrerassistenz. München, 15. – 16. April 2010, S. 8, 2010

Hoppe, Maria; Zobel, Robert; Schlag, Bernhard: Identifikation von Einflussgrößen auf Verkehrsunfälle als Grundlage für die Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von Kreuzungsunfällen. Identifikation von Einflussgrößen auf Verkehrsunfälle. In: Fahrer im 21. Jahrhundert. Human Machine Interface; Braunschweig, 14. und 15. November 2007; Als. Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl (VDI-Berichte, 2015), S. 121–137, 2007

Ibeo Automotive: Datenblatt ibeo LUX, 2013

Ibeo Automotive: ibeo Lux (2010) Manual, 2010

Ibrahim, M. R.; Karim, M. R.; Kidwai, F. A.: The Effect of Digital Count-Down Display on Signalized Junction Performance. Digital Count-Down Display. In: *American J. of Applied Sciences* 5 (5), S. 479–482, 2008

Institut für Straßenverkehr - Verband der Schadenversicherer (GDV): Unfalltypen-Katalog - Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltypes. Unfalltypen-Katalog, 1998

Jost, Graziella; Allsop, Richard: Ranking EU Progress on Road Safety. 8th Road Safety Performance Index Report. EU Road Safety. Hg. v. European Transport Safety Council (2014)

Kaempchen, Nico; Schiele, Bruno; Dietmayer, Klaus: Situation Assessment of an Autonomous Emergency Brake for Arbitrary Vehicle-to-Vehicle Collision Scenarios. Situation Assessment Autonomous Emergency Brake. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10 (4), S. 678–687, 2009

Kiefer, N.; LeBlanc, David J.; Palmer, M.; Salinger, J.; Deering, R.; Shulman, M.: Development and Validation of Functional Definitions and Evaluations Procedures for Collision Warning/Avoidance Systems. Evaluations Procedures for Collision Warning/Avoidance Systems. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (DOT HS 808 964), 1999

Kim, H. H.; Ryu, J.: Sideslip angle estimation considering short-duration longitudinal velocity variation. Sideslip angle estimation. In: *Int.J Automot. Technol.* 12 (4), S. 545–553, 2011

Klanner, Felix: Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug. Entwicklung kommunikationsbasierter Querverkehrsassistent. Düsseldorf, 2008

Knote, Thoralf; Lohse, Dieter; Schnabel, Werner; Schnabel-Lohse: Straßenverkehrstechnik. Straßenverkehrstechnik. 3. Aufl. Berlin [u.a.], Bonn: Beuth; Kirschbaum, 2011

Kosch, Timo; Ehmanns, Dirk: Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen und Funktionalitätserweiterungen durch den Einsatz von Kommunikationstechnologien. In: 2.Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. München, 2006

Kraftfahr-Bundesamt: Bestand an Personenkraftwagen am 1.1.2014 gegenüber 1.1.2013 nach Segment und Modellreihe (Zulassungen ab 1990), 2014

Krzikalla, Roland; Schindler, Andreas; Wankerl, Matthias; Wertheimer, Reiner: Mehr Sicherheit durch Positionsbestimmung mit Satelliten und Landmarken. Positionsbestimmung mit Satelliten und Landmarken. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (1), S. 48–52, 2013

Lechner, D.; Malaterre, G.: Emergency maneuver experimentation using a driving simulator. Emergency maneuver experimentation, 1991

Lerner, N.D; Dekker, D.K; Steinberg, G.V; Huey, R.W: Inappropriate Alarm Rates and Driver Annoyance. Inappropriate Alarm Rates. Hg. v. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Washington (DOT HS 808 533), 1996

Mages, Mark: Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten. Düsseldorf: VDI-Verl., (Fahrzeugtechnik TU Darmstadt, 694), 2009

Mages, Mark; Hopstock, Matthias; Klanner, Felix: Kreuzungsassistenz. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 572–581, 2012

Mahler, Kim: Analysis and Categorization of Wireless Communication at Urban Crossroads. Wireless Communication at Urban Crossroads. Ko-FAS Abschlusspräsentation. Aschaffenburg, 18.09.2013, 2013

Mangel, Thomas: Inter-vehicle communication at intersections. An evaluation of adhoc and cellular communication. Inter-vehicle communication at intersections. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012

Mazzae, E.; Barickman, F.; Scott Baldwin, G.; Forkenbrock, G.: Driver Crash Avoidance Behavior with ABS in an Intersection Incursion Scenario on Dry versus Wet Pavement. Driver Crash Avoidance Behavior (SAE Technical Paper 1999-01-1288), 1999

McGehee, Daniel V.; Mazzae, Elizabeth N.; Baldwin, G.H Scott: Examination of Drivers' Collision Avoidance Behavior Using Conventional and Antilock Brake Systems on the Iowa Driving Simulator. NHTSA Light Vehicle Antilock Brake Research Program Task 5: Examination of Drivers' Collision Avoidance Behavior. Hg. v. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 1999

Meitinger, Karl-Heinz: Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen. Top-Down-Entwicklung Aktive Sicherheitssysteme Kreuzung. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (701), 2009

Meitinger, Karl-Heinz; Heißing, Bernd; Ehmanns, Dirk: Linksabbiegeassistenz - Beispiel für die Top-Down-Entwicklung eines Aktiven Sicherheitssystems. Linksabbiegeassistenz. In: 2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. München, 2006

Mildner, Frank: Untersuchungen zur Erkennung und Vermeidung von Unfällen für Kraftfahrzeuge. Hamburg, Universität der Bundeswehr, 2004.

Miller, S.L; Youngberg, B.; Millie, A.; Schweizer, P.; Gerdes, J.C: Calculating longitudinal wheel slip and tire parameters using GPS velocity. Calculating longitudinal wheel slip. In: American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001, S. 1800–1805, 2001

Mitschke, M.: Dynamik von Kraftfahrzeugen. Dynamik von Kraftfahrzeugen. 4. Aufl. Berlin: Springer, 2003

Müller, Steffen; Uchanski, Michael; Hedrick, Karl: Estimation of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient. Estimation of Maximum Tire-Road Friction Coefficient. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 125 (4), S. 607–617, 2004

Nitz, Gregor: Entwicklung eines Systems zur aktiven Bremsung eines Fahrzeugs in Gefahrensituationen. Entwicklung System zur aktiven Bremsung. Aachen: Shaker (Reports on measurement and sensor systems), 2010

Noll, Martin; Rapps, Peter: Ultraschallsensorik. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 110–122, 2012

Otte, Dietmar; Wobben, Dieter; Nee, Manuela: Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen. Fahrzeugsicherheit '95: Analyse aus Erhebungen am Unfallort. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F, Fahrzeugtechnik, 31), 2000

Pacejka, Hans Bastiaan: Tire and vehicle dynamics. Tire and vehicle dynamics. 3. Aufl. Amsterdam [u.a.]: Elsevier (SAE international), 2012

Pfafferott, I.; Huguenin R. D.: Adaptation nach Einführung von Sicherheitsmaßnahmen. Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus einer OECD-Studie. Adaption Sicherheitsmaßnahmen. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* (37), S. 71–83, 1991

Pierowicz, J.; Jocoy, E.; Lloyd, M.; Bittner, A.; Pirson, B.: Intersection Collision Avoidance using ITS Countermeasures. Intersection Collision Avoidance. Hg. v. NHTSA (DOT HS 809 171), 2000

Priese, Lutz; Lakmann, Raimund; Rehrmann, Volker: Automatische Verkehrszeichenerkennung mittels Echtzeit- Farbbildanalyse. Automatische Verkehrszeichenerkennung. In: *at - Automatisierungstechnik* 45 (12), 1997

Sato, Yusuke; Kobayashi, Daisuke; Watanabe, Kennichi; Kuriyagama, Yukiyo; Kuriyagama, Yuzo: Study on Recognition Method for Road Friction Condition. Recognition Method for Road Friction Condition. In: *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan* 38 (2), S. 51–56, 2007

Saust, F.; Wille, J.M; Lichte, B.; Maurer, M.: Autonomous Vehicle Guidance on Braunschweig's inner ring road within the Stadtpilot Project. Autonomous Vehicle Guidance. In: 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011, S. 169–174, 2011

Schindler, Andreas: Vehicle Self-Localization Using High-Precision Digital Maps. Vehicle Self-Localization Using Digital Maps. 1. Aufl. Herzogenrath: Shaker (Berichte aus der Informatik), 2013

Schindler, Andreas: Vehicle Self-localization with High-Precision Digital Maps. Vehicle Self-localization with High-Precision Digital Maps. In: IEEE (Hg.): 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), June 23-26, 2013, Gold Coast, Australia, S. 141–146, 2013

Schmidt, Christian; Oechsle, Fred; Branz, Wolfgang: Untersuchungen zu letztmöglichen Ausweichmanövern für stehende und bewegte Hindernisse. Untersuchungen zu letztmöglichen Ausweichmanövern. In: Markus Maurer (Hg.): 3. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS 2005, Walting im Altmühltal, 6. - 8. April 2005. S. 129–138, 2005

Schorn, Matthias: Quer- und Längsregelung eines Personenkraftwagens für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung. Düsseldorf: VDI-Verl., (TU Darmstadt, 651), 2007

Schulte, Mark; Jürgens, Gunnar; Kern, Stefan; Zecha, Stephan: Testmethodik für integrale Insassenschutzsysteme. Testmethodik für integrale Insassenschutzsysteme. In: crash.tech. München, 2012

Seeck, Andre; Gasser, Tom Michael: Klassifizierung und Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Einführung moderner FAS. Rechtliche Rahmenbedingungen Einführung moderner FAS. In: 2. Tagung "Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz", München, 4.-5. April, 2006.

Stählin, Ulrich: Eingriffsentscheidung für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung. Eingriffsentscheidung Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung. Düsseldorf: VDI-Verl, (TU Darmstadt, 683), 2008

Stählin, Ulrich; Menzel, Marc; Eckert, Alfred; Scherping, Richard; Bertram, Torsten: Neue Chancen zur Einbeziehung von Straßenzustandsinformationen durch Vehicle2X. In: 13. Internationale VDI-Tagung Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn. Im Fokus auf Umwelt, Sicherheit und Komfort, Hannover (VDI-Berichte, 2137), 2011

Statistisches Bundesamt: Verkehr - Verkehrsunfälle. Verkehr - Verkehrsunfälle, 2013

Stiller, Christoph; Bachmann, Alexander; Duchow, Christian: Maschinelles Sehen. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 198–222, 2012

Stoff, Alexander; Liers, Henrik: Ausweichfunktionalität für Kreuzungsszenarien zur Unfallfolgenlinderung durch Optimierung der Crash-Kompatibilität. Ausweichfunktionalität für Kreuzungsszenarien. In: Sicherheit 2.0. Tagung Fahrzeugsicherheit. Düsseldorf: VDI-Verl (2204), S. 177–192, 2013

Stoff, Alexander; Sefati, Mohsen: Komponenten, Werkzeuge und Methoden für kooperative Sicherheit im Straßenverkehr: Forschungsinitiative Ko-FAS - Verbundprojekt Ko-KOMP; Abschlussbericht; Berichtszeitraum: 01.02.2012 bis 30.11.2013, 2014

Teply, S.; Schnableger, J.: Variable speed advisory signals for linking coordinated systems in Canada. Variable speed advisory signals. In: IEEE (Hg.): Third International Conference on Road Traffic Control. Third International Conference on Road Traffic Control, S. 90–94, 1990

Tomasch, Ernst: Accident Reconstruction Guidelines. Accident Reconstruction Guidelines. Hg. v. European Commission FP5 - Fifth Framework Programme (1998-2002). VSI TU Graz (PENDANT Deliverable D4), 2004

TRW Automotive: Datenblatt - AC100 Mittelbereichsradar. Datenblatt - AC100 Mittelbereichsradar, 2013

TRW Automotive: Datenblatt - Skalierbare Kamera-Familie. Datenblatt - Skalierbare Kamera-Familie, 2013

van Zanten, Anton; Kost, Friedrich: Bremsenbasierte Assistenzfunktionen. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 356–394, 2012

Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH: Data analysis of real accidents & Injuy Risk Functions, Poster - Abschlussveranstaltung Forschungsinitiative Ko-FAS, 15./16.09.2013, Aschaffenburg, 2013

Vietinghoff, Anne von: Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen in querdynamisch kritischen Fahrsituationen. Universität Karlsruhe (TH), 2008

Volvo: Volvo S60 Owner's Manual. S60 Owner's Manual, 2012

Weber, Daniel: Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. Karlsruher Institut für Technologie. Fakultät für Maschinenbau, 2012

Weber, Rüdiger: Reifenführungskräfte bei schnellen Änderungen von Schräglauf und Schlupf. Reifenführungskräfte bei Schräglauf und Schlupf, 1981

Werling, Moritz; Reinisch, Philipp; Gresser, Klaus: Kombinierte Brems-Ausweich-Assistenz mittels nichtlinearer modellprädiktiver Trajektorienplanung für den aktiven Fußgängerschutz. Brems-Ausweich-Assistenz für aktiven Fußgängerschutz. In: Klaus Dietmayer (Hg.): 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme. FAS 2012; Walting im Altmühltal, 26. - 28. Sept. 2012, S. 77–86, 2012

Wertheimer, Reiner; Klanner, Felix: Cooperative Perception to Promote Driver Assistance and Preventive Safety. In: 8th International Workshop on Intelligent Transportation, 22.-23. März 2011, Hamburg, 2011

Winner, Hermann: Frontalkollisionsschutzsysteme. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 522–542, 2012

Winner, Hermann: Radarsensorik. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 123–171, 2012

Winner, Hermann: Fahrdynamik und Fahrkomfort. Vorlesungsskript Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt, 2012

World Health Organisation: European status report on road safety. Towards safer roads and healthier transport choices. Copenhagen: World Health Organization Europe, 2009

Yamada, M.; Ueda, K.; Horiba, I.; Tsugawa, S.; Yamamoto, S.: Road Surface Condition Detection Technique Based on Image Taken by Camera Attached to Vehicle Rearview Mirror. Road Surface Condition Detection. In: *Rev. Automot. Eng.* 26 (2), S. 163–168, 2005

Eigene Veröffentlichungen

Stoff, Alexander; Liers, Henrik; Winner, Hermann: Ausweichfunktionalität für Kreuzungsszenarien zur Unfallfolgenlinderung durch Optimierung der Crash-Kompatibilität. In: Sicherheit 2.0. Tagung Fahrzeugsicherheit. Nichtred. Ms.-Dr. Düsseldorf: VDI-Verl (2204), S. 177–192, 2013.

Sefati, Mohsen; Stoff, Alexander; Winner, Hermann: Testing Method for Autonomous Safety Functions Based on Combined Steering/Braking Maneuvers for Collision Avoidance and Mitigation. 6. Tagung Fahrerassistenz. 28.-29. Nov. 2013 in München, 2013

Wesp, Alexander; Stoff, Alexander; Winner, Hermann: Der Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge auf die Bewertung von Fahrern im Makrosinusversuch. 12. Internationale VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn. 20.-21. Oktober 2009 in Hannover, 2009

Stoff, Alexander; Wesp, Alexander; Winner, Hermann: Die Systemauslegung von hinterachsgelenkten Fahrzeugen als Einflussgröße auf die Fahrerbewertung im Makrosinusversuch und Spurwechsel. Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen IV. 12./13. November 2009 in Essen, 2009

Betreute studentische Arbeiten

Arens, Georg: Entwicklung und Integration eines Laserscanner Sensormodells in IPG CarMaker, Bachelor Thesis Nr. 1131/12, 2012

Betz, Alexander: Konzeption einer Bewegungsplattform eines selbstbewegten Fahrsimulators mit 6 DoF und dessen Umsetzung in ein evaluierbares Modell, Master Thesis Nr. 477/10, 2010

García Elvira, Alexandre: Analysis and Evaluation of Methods for Trajectory Prediction of Other Road Users, Master Thesis Nr. 508/12, 2012

Greiss, Alexander: Analyse und Bewertung von Methoden zur Trajektorienprädiktion des Ego-Fahrzeugs, Studienarbeit Nr. 1123/12, 2012

Ivic, Josip: Erweiterung und Optimierung eines Simulationsalgorithmus für eine autonome Notausweichfunktionalität hinsichtlich Funktionsgüte und Simulationsperformance, Studienarbeit Nr. 1134/12, 2012

Kiris, Ali: Bewertung des Stands der Forschung auf dem Gebiet aktiver Sicherheitssysteme zur Unfallvermeidung und folgenlinderung mittels Eingriff in die Fahrzeugquerführung. Bachelor Thesis Nr. 1127/12, 2012

Kopfer, Johannes: Störungsbewertung aktiver Lenksysteme im Closed-Loop Versuch, Diplomarbeit Nr. 447/08, 2008

Krämer, Johannes: Entwicklung und Bewertung von Notausweichstrategien zur Unfallvermeidung bzw. Unfallfolgenlinderung, Bachelor Thesis Nr. 1121/12, 2012

Lesouef, Julien: Potentialanalyse eines leichten Personenkraftwagens (600kg Auto gestern und heute), Diplomarbeit Nr. 469/09, 2009

Matthäy, Jens: Entwicklung einer Testmethodik für eine unfallfolgenlindernde Ausweichfunktionalität, Bachelor Thesis Nr. 1136/12, 2012

Scheffler, Alexander: Implementierung und Validierung einer Notausweichfunktionalität im Rahmen des CbW-Frameworks, Studienarbeit Nr. 1104/12, 2012

Spießhofer, Nico: Analyse und Bewertung von Möglichkeiten zur Unfallvermeidung bzw. Unfallfolgenreduktion auf Basis des Ausweichvorgangs, Bachelor Thesis Nr. 1093/11, 2011.

Wagner, Simon: Analyse des Forschungsfahrzeugs uni-car 2000 vor dem Hintergrund heutiger technischer Entwicklungen und aktueller Forschungsaktivitäten, Diplomarbeit Nr. 473/10, 2010

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Alexander Stoff

Geburtsdatum: 19.01.1980 Geburtsort: Wiesbaden

Schulzeit

1986 - 1990 Grundschule Nordenstadt, Wiesbaden

1990 - 1999 Oranienschule, Wiesbaden

Wehrdienst

1999 -2000 1. Führungsunterstützungsregiment 40 / Mainz

Studium

2000-2007 Studium Wirtschaftsingenieurwesen / Maschinenbau

Technische Universität Darmstadt

Berufstätigkeit

2008 - 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeug-

technik der Technischen Universität Darmstadt