

Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten

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

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Mark Alexander Mages

aus Wermelskirchen

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder
Tag der Einreichung:	22. April 2008
Tag der mündlichen Prüfung:	10. Juni 2008

Darmstadt 2008

D 17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte der Dissertation wurden im Rahmen des von mir geleiteten Forschungsprojektes „Entwicklung eines Einbiege-/Kreuzenassistenten“ erarbeitet, das von der BMW Forschung und Technik GmbH als Teil des Kooperationsprojektes PReVENT beauftragt und ermöglicht wurde.

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, für die hervorragende Betreuung dieser Arbeit, die stete Bereitschaft zur tiefgehenden fachlichen Diskussion und die mir gewährten Freiheiten in der Forschung und beim Anfertigen dieser Arbeit.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Bert Breuer, dem ehemaligen Leiter von FZD, danke ich für seine kritischen Fragen und Hinweise in den Doktorandenseminaren.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats und für wichtige Impulse zur Erstellung dieser Arbeit.

Für die Forschungsunterstützung und die angenehme, vertrauensvolle Zusammenarbeit möchte ich mich bei allen am Projekt beteiligten Mitarbeitern des Industriepartners BMW bedanken, stellvertretend bei meinen direkten Ansprechpartnern, Herrn Dr. Dirk Ehmanns und Herrn Matthias Hopstock. Besonderer Dank gilt der Abteilung Fahrsimulation der BMW Group (stellvertretend Dr. Alexander Huesmann) und der Firma Philosys (stellvertretend Herrn Peter Göb) für den intensiven Support bei der Nutzung der verwendeten Simulatoren.

Für die erfolgreiche Zusammenarbeit bei der Durchführung der Probandenversuche im Fahrsimulator danke ich allen beteiligten Mitarbeitern des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW), stellvertretend Herrn Prof. Hans-Peter Krüger.

Allen Mitarbeitern von FZD einschließlich der Werkstätten und des Sekretariats danke ich für das angenehme, von Hilfsbereitschaft, Verlässlichkeit und gegenseitigem Interesse geprägte Arbeitsumfeld. Viele Kollegen sind mir über meine Dienstzeit hinaus zu echten Freunden geworden.

Großer Dank gilt auch meinen Studenten, die im Rahmen studentischer Arbeiten sowie als wissenschaftliche Hilfskräfte einen erheblichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Meinen Eltern danke ich herzlich für die Begleitung durch meine Ausbildung und die fortwährende, interessierte Unterstützung meines bisherigen Berufsweges. Meiner Schwester Monika bin ich für die moralische und tatkräftige Unterstützung dankbar.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Methodik und Aufbau der Arbeit.....	3
2	Anforderungen an die Einbiege-/Kreuzenassistentz	7
2.1	Grundsätzliche Anforderungen an Sicherheitssysteme.....	7
2.2	Anforderungen an die Kreuzungsassistentz	9
2.2.1	Wünsche und Akzeptanz des Fahrers.....	9
2.2.2	Genauigkeit der Kollisionserkennung.....	10
2.2.2.1	Akzeptierte und verworfene Zeitlücken zum QV	11
2.2.2.2	Akzeptanz von Warnungen anhängig von der Zeitlückengröße	12
2.3	Unfallgeschehen	14
2.4	Unterscheidung der Unfallszenarien.....	18
2.5	Fazit	21
3	Stand der Technik / Forschung	22
3.1	Aktualität der Kreuzungsassistentz.....	22
3.2	Aktuelle Ansätze zur Kreuzungsassistentz.....	23
3.2.1	Infrastructure-Only(IO)-Systeme.....	23
3.2.2	Fahrzeugautarke (FAT) Systeme.....	24
3.2.3	Systeme auf Basis von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (C2C).....	25
3.2.4	Kooperative Systeme (C2I)	26
3.3	Situationsbewertung.....	27
3.3.1	Überfahren-/Einfahrenerkennung	27
3.3.2	Verhaltensprädiktion und Kollisionserkennung.....	34
3.4	HMI zur Kreuzungsassistentz.....	37
3.5	Verwandte Systeme im Fahrzeug	39
3.5.1	BAS-plus und PRE-SAFE-Bremse	39
3.5.2	Automatische Notbremse (ANB).....	40
3.6	Fazit und Untersuchungsbedarf.....	41
4	Fahrerverhalten an Kreuzungen	43
4.1	Methode und Untersuchungswerkzeuge	43
4.1.1	Vorhandene Messdaten zum Fahrerverhalten	43
4.1.2	Anforderungen an die Untersuchung	43
4.1.3	Fahrversuche mit Probanden	45
4.1.4	Verkehrsbeobachtung	47

4.1.5	Einflussfaktoren auf das Fahrerverhalten	50
4.1.6	Kreuzungsauswahl und Versuchsparcours	53
4.1.7	Arbeitshypothesen zum Anhalteweg	55
4.2	Erkennung der Fahrerabsicht	57
4.2.1	Definition der Hypothesen	57
4.2.2	Ergebnis	59
4.2.3	Bedeutung des Teileingriffs für das Unfallgeschehen	69
4.2.4	Einfluss der Reaktionszeit	71
4.3	Genauigkeit der Kollisionserkennung	74
4.3.1	Definition der Hypothesen	74
4.3.2	Vorgehen	75
4.3.3	Ergebnisse	78
4.4	Einflussparameter	82
4.4.1	Beschreibung der Kriterien	82
4.4.1.1	Beginn der Reaktion auf die Kreuzung	82
4.4.1.2	Der Bremsvorgang	83
4.4.1.3	Ende des Anhaltevorgangs	84
4.4.2	Ergebnis	85
4.4.2.1	Einfluss des Manövers	88
4.4.2.2	Einfluss der Vorfahrtsregelung	89
4.4.2.3	Einfluss der Sichtbehinderung	90
4.5	Fazit	93
5	Technische Voraussetzungen	96
5.1	Sensorik und Kommunikation	96
5.1.1	Erkennung der Fahrerabsicht	96
5.1.2	Bewertung der Kollisionswahrscheinlichkeit	98
5.2	Anforderungen an HMI und Fahrzeug	101
5.3	Fazit	103
6	Validierung der Fahrer-Akzeptanz	105
6.1	Definition der Hypothesen	105
6.2	Vorgehen	106
6.2.1	Beschreibung des prototypisch umgesetzten Systems	106
6.2.1.1	Fahrerabsichtserkennung	107
6.2.1.2	Situationsbewertung	108
6.2.1.3	Gewählte Warn- und Eingriffsstrategie	111
6.2.2	Untersuchungswerkzeug	113
6.2.3	Versuchsdesign	115
6.2.3.1	Vorversuche	115

6.2.3.2	Hauptversuche.....	116
6.3	Ergebnisse	117
6.4	Fazit	124
7	Diskussion und Ausblick.....	126
8	Zusammenfassung	131
9	Anhang.....	133
9.1	Vorliegende Fahrerverhaltensdaten.....	133
9.2	Probandenversuche zum Fahrerverhalten	133
9.2.1	Positionsbestimmung über Lichtschranken.....	133
9.2.2	Probandenkollektiv	135
9.3	Messstationen zur Verkehrsbeobachtung.....	135
9.3.1	Aufbau	135
9.3.2	Ausrichtung und Koordinatentransformation.....	136
9.3.3	Genauigkeit.....	138
9.4	Ausgewählte Sensor- bzw. Kommunikationstechnologie.....	139
9.5	Validierung der Fahrerakzeptanz.....	140
9.5.1	Eingesetzte Fahrsimulatoren.....	140
9.5.2	Ergebnisse der Vorversuche.....	142
9.5.3	Ergebnisse der Hauptversuche.....	143
10	Quellen	147

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ABS	Anti-Blockier System
ACC	Adaptive Cruise Control – Abstandsregelsystem
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ANB	Automatische Notbremse
ASR	Antriebsschlupfregelung
BAS	Bremsassistent
C2C	Car-to-Car-Communication – Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation
C2I	Car-to-Infrastructure-Communication
CAS	Collision Avoidance Systems
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DGPS	Differential GPS
FAS	Fahrerassistenzsystem
FAT	Fahrzeugautark
FZD	Fachgebiet Fahrzeugtechnik Darmstadt
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
HUD	Head-Up Display
HMI	Human Machine Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
IO	Infrastructure Only
LS	Lichtschranke
LSA	Lichtsignalanlage (Ampel)
MAIS	Maximum Abbreviated Injury Scale
MW	Mann-Whitney-U-Test
QV	Querverkehr
RvL	Rechts vor Links
T	t-Test
TTC	Time to Collision
TTI	Time to Intersection
TGZ	Time Gap in Collision Zone
TTZ	Time To Collision Zone
TLZ	Time Leaving Collision Zone
TTX	Time to Cross
VA	Vorfahrt Achten
WIVW	Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften
WMK	Warnender, Maschineller Kopilot

Formelzeichen und Indizes

Zeichen	Einheit	Beschreibung
a, a_x	m/s^2	Beschleunigung in Fahrzeug-x-Richtung, nach vorne positiv
a_y	m/s^2	Beschleunigung in Fahrzeug-y-Richtung, nach links positiv
a_{nec}	m/s^2	Erforderliche Verzögerung ($= -v^2/2d$)
$a_{nec,BB}$	m/s^2	Erforderliche Verzögerung bei Bremsbeginn
$a_{nec,min}$	m/s^2	Minimum der erforderlichen Verzögerung
$a_{nec,min,50}$	m/s^2	Median der minimal erforderlichen Verzögerung
$a_{nec,min,95}$	m/s^2	95. Perzentil der minimal erforderlichen Verzögerung
$a_{nec,min,BA}$	m/s^2	Grenzwert der erforderlichen Verzögerung bei Bremsabbruch
a_{Brems}	m/s^2	Konstante Verzögerung während der Vollbremsphase
a_{Teil}	m/s^2	Verzögerung des aktiven Bremsengriffs bei Teilbremsung
d	m	Abstand zur virtuellen Haltelinie
Δd	m	Ungenauigkeit/Differenz des Abstands zur virtuellen Haltelinie
d_{AB}	m	Abstand bei Abbruch des Bremsvorgangs
d_{Ego}	m	Abstand des Ego-Fahrzeugs zur virtuellen Haltelinie
d_{FF}	m	Abstand zum Zeitpunkt der Fahrerfehlererkennung
d_{Halt}	m	Abstand zwischen virtueller Haltelinie und Halteposition
n		Anzahl
n_{Rad}	s^{-1}	Raddrehzahl
p_{Brems}	bar	Bremsdruck
s_A	m	Anhalteweg
$s_{A,Warn}$	m	Anhalteweg bei reiner Warnung des Fahrers
$s_{A,Teil}$	m	Anhalteweg bei Teileingriff
s_{Brems}	m	Bremsweg
t_R	s	Reaktionszeit des Fahrers
$t_{R,avail}$	s	Verfügbare Reaktionszeit
$t_{R,Teil}$	s	Reaktionszeit bei Warnung des Fahrers
$t_{R,Warn}$	s	Reaktionszeit bei Teileingriff
TTI	s	Time to Intersection ($= d/v$)
ΔTTI	s	Betragsmäßige Differenz der Time to Intersection
$\Delta(\Delta TTI)$	s	Ungenauigkeit der Differenz der TTI
TTI_{BB}	s	TTI bei Bremsbeginn
TTI_{Ego}	s	TTI des Ego-Fahrzeugs
TTI_{QV}	s	TTI des Querverkehrs
TTI_{FF}	s	TTI zum Zeitpunkt der Fahrerfehlererkennung
TTI_{real}	s	Tatsächliche Zeitdauer bis zum Erreichen der Kreuzung
TGZ_{AB}	s	Zeitlicher Abstand zw. den Fahrzeugen A/B in Konfliktzone
ΔTGZ_{AB}	s	Ungenauigkeit der TGZ
TTZ	s	Zeit bis zum Erreichen der Konfliktzone
$TTZ_{A \text{ bzw. } B}$	s	TTZ für Fahrzeug A bzw. Fahrzeug B
TTZ_{real}	s	Tatsächliche Zeitdauer bis zum Erreichen der Konfliktzone

Zeichen	Einheit	Beschreibung
TLZ	s	Zeit bis zum Verlassen der Konfliktzone
$TLZ_{A \text{ bzw. } B}$	s	TLZ für Fahrzeug A bzw. Fahrzeug B
TLZ_{real}	s	Tatsächliche Zeitdauer bis zum V der Konfliktzone
v, v_x	km/h	Geschwindigkeit in Fahrzeug-x-Richtung
v_P	km/h	Plausibilisierte Geschwindigkeit
v_0	km/h	Ursprungsgeschwindigkeit
v_{Ego}	km/h	Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs
Δv_{Ego}	km/h	Ungenauigkeit der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs
v_{QV}	km/h	Geschwindigkeit des Querverkehrs
Δv_{QV}	km/h	Ungenauigkeit der Geschwindigkeit des Querverkehrs
$v_{Warn,50}$	km/h	Geschwindigkeit, bei der 50% der Fahrer die Kurve des letztmöglichen Warnpunktes kreuzen
x_K, y_K	m	Globale Position
x_K, y_K	m	Position im kreuzungsfesten Koordinatensystem
α	1	Signifikanzniveau
α	°	Winkel zwischen den Lichtschranken LS_1 und LS_2
β	°	Winkel zwischen QV und Ego-Fahrzeuglängsachse
φ	°	Gierwinkel des Fahrzeugs
$\dot{\varphi}$	°/s	Gierrate des Fahrzeugs um die Hochachse (nach links positiv)
$\dot{\varphi}_P$	°/s	Plausibilisierte Gierrate
σ		Standardabweichung
σ_0	m	Standardabweichung des Abstands der Verkehrsbeobachtung
σ_{Sensor}	m	Standardabweichung des Abstands angenommener Sensoren

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Die aktive Sicherheit rückt immer mehr in den Fokus der Fahrzeugentwicklung. Während das Potential von Systemen der passiven Sicherheit allmählich erschöpft scheint, wird aktiven Sicherheitssystemen zur Unfallvermeidung in Zukunft eine große Bedeutung zukommen¹. Eine der Hauptunfallursachen, insbesondere im innerstädtischen Straßenverkehr, ist das Fehlverhalten von Verkehrsteilnehmern an Kreuzungen. Dabei entfällt ein Großteil der Unfallzahlen auf Kollisionen mit dem Querverkehr beim Einbiegen/Kreuzen², wie in Abbildung 1.1 dargestellt. Im Gegensatz zu anderen Unfalltypen mit hohen Unfallzahlen existiert zur Vermeidung von Kollisionen mit dem Querverkehr derzeit kein Seriensystem³.

Mögliche Gründe hierfür sind die vergleichsweise komplexe Situation im Kreuzungsbereich, für die eine Entscheidung über die Notwendigkeit aktiver Unfallvermeidungsmaßnahmen zu treffen ist, und die Anforderungen an die erforderliche Umfeldsensorik⁴. Dennoch wird einem Einbiege-/Kreuzenassistenten ein sehr hohes Unfallvermeidungspotential zugeschrieben⁵. Für die Zukunft wird zudem mit einem Anstieg des Anteils von Kreuzungsunfällen am Gesamtunfallgeschehen auf über 50% gerechnet, da die

¹ vgl. u.a. DIZIKES; HONSEL (2006): *Multi-Hopping mit dem Gegenverkehr* S. 10-12 oder BADSTÜBNER; WENZ (2006): *Grenzenlose Sicherheit* S. 34-40.

² In Deutschland ereigneten sich im Jahr 2006 etwa 23% aller Unfälle mit Personenschaden und 12% aller Unfälle mit Todesfolge beim Einbiegen/Kreuzen, vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT (2007): *Verkehr - Verkehrsunfälle 2006, Fachserie 8 Reihe 7, Verkehr*.

³ Ähnliche Unfallzahlen ergeben sich für Unfälle mit Personenschäden für die Unfalltypen 1 (Fahrunfall) und 6 (Unfall im Längsverkehr), vgl. Mages et al. (2007): *Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistenten*. Diese Unfallszenarien werden bereits durch Assistenzsysteme adressiert (bspw. ESP zur Vermeidung von Fahrunfällen, Bremsassistent und BAS-plus gegen Unfälle im Längsverkehr).

⁴ vgl. u.a. MEITINGER ET AL. (2004): *Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen* oder BISHOP (2005): *Intelligent vehicle technology and trends* S. 32.

⁵ vgl. VOLLRATH ET AL. (2006): *Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit* S. 77f

zunehmende Verbreitung bereits verfügbarer Sicherheitssysteme die Häufigkeit anderer Unfalltypen reduzieren wird⁶.

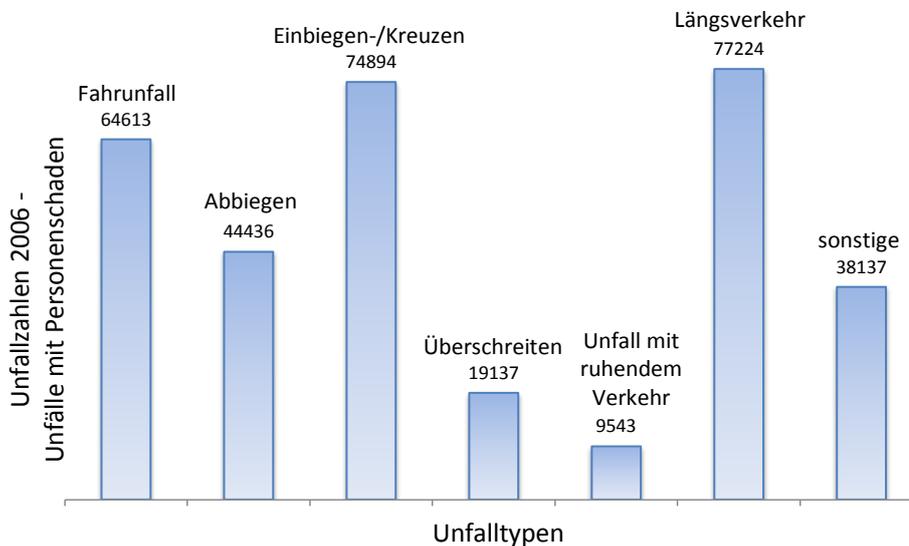


Abbildung 1.1: Anzahl der Unfälle mit Personenschaden für unterschiedliche Unfalltypen⁷

Aktuelle Forschungsprojekte zur Kreuzungsassistenz orientieren sich daher zu großen Teilen an der Entwicklung künftiger Kommunikationstechnologien⁸. Der Vorteil solcher Kommunikationslösungen besteht darin, dass die Anforderungen an „konventionelle“ Umfeldsensorik sinken und Informationen über den Querverkehr trotz eventuellen Sichtbehinderungen verfügbar sind⁹. Diesen Vorteilen stehen allerdings zusätzliche Anforderungen an den Mindestausrüstungsgrad aller Fahrzeuge entgegen.

Aus der Vielzahl aktueller Entwicklungen in den Bereichen Umfeldsensorik und Fahrzeug-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikationstechnologien folgt eine zusätzliche Motivation. Sind die Informationsanforderungen eines Kreuzungsassistenten bekannt, so können sie bereits frühzeitig in die Entwicklung neuartiger Sensoren oder die Spezifikationen künftiger Kommunikationslösungen einfließen.

⁶ vgl. KEBLER; WITTE (2006): *Aktive Sicherheit durch erweiterte Bremsassistentz und die erforderliche Aktuatorik*.

⁷ Unfallzahlen für das Jahr 2006, vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT (2007): *Verkehr - Verkehrsunfälle 2006, Fachserie 8 Reihe 7, Verkehr*

⁸ vgl. u.a. BENMIMOUN; SUZUKI (2006): *Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation für die Kreuzungsassistenz*, KLANNER ET AL. (2006): *ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz* S. 989-1012 oder MILLER; HUANG (2002): *An Adaptive Peer-to-Peer Collision Warning System*.

⁹ falls eine Funkverbindung zwischen den beteiligten Fahrzeugen möglich ist. Diese Bedingung ist mit aktuellen Kommunikationslösungen nicht immer erfüllt, vgl. KLANNER ET AL. (2006): *ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz* S. 989-1012.

1.2 Zielsetzung

Unabhängig von der in aktuellen Forschungsvorhaben eingesetzten Technik zur Umfelderkennung ergeben sich aus dem Unfallgeschehen und aus dem Verhalten der Verkehrsteilnehmer an Kreuzungen Anforderungen an ein Kreuzungsassistenzsystem zur Unfallvermeidung. Ein solches Assistenzsystem stellt nun seinerseits Anforderungen an die für eine zuverlässige Funktion erforderliche Technologie.

Ziel dieser Arbeit ist es, auf Basis einer Analyse des Fahrerverhaltens die Anforderungen an ein Kreuzungsassistenzsystem für den Fall des Einbiegens/Kreuzens zu bestimmen. Diese Betrachtungen liefern die Erkenntnis, in welchen Situationen eine Kollision mit dem Querverkehr durch Assistenz ohne Störung des Fahrers vermeidbar ist¹⁰. Für diese Situationen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine geeignete Warn- und Eingriffsstrategie abgeleitet. Weiteres Ziel ist der Nachweis der Fahrerakzeptanz für einen auf Basis dieser Erkenntnisse prototypisch umgesetzten Einbiege- und Kreuzungsassistenten einschließlich der ausgewählten Warn-/Eingriffsstrategie.

Zusätzlich wird untersucht, welchen Einfluss kreuzungsspezifische Parameter¹¹ und das Fahrmanöver auf das Verhalten des Fahrers während der Annäherung an die Kreuzung haben. Die Ergebnisse erlauben die Aussage, inwieweit sich Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Gefahrenerkennung durch Kenntnis dieser Parameter verbessern lassen.

Als weiterer Schwerpunkt der Arbeit ergibt sich die Analyse der technischen Voraussetzungen eines Einbiege-/Kreuzungsassistenten, insbesondere hinsichtlich der erforderlichen Sensor- oder Kommunikationstechnologie. Teil dieser Betrachtung ist der Einfluss spezifischer Sensoreigenschaften und -ungenauigkeiten auf die vermeidbaren Unfall-szenarien.

1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit

Das Vorgehen dieser Arbeit orientiert sich an der Top-Down-Methodik. Ausgehend von der durch das Unfallgeschehen vorgegebenen Problemstellung wird schrittweise eine

¹⁰ Als „ohne Störung des Fahrers vermeidbar“ wird eine Verkehrssituation bezeichnet, bei der die Notwendigkeit intervenierender Maßnahmen rechtzeitig zur Kollisionsvermeidung bestimmt werden kann, ohne dass die Quote der zu erwartenden Fehlwarnungen (False Positives) zu einer Beeinträchtigung der Systemakzeptanz beim Fahrer führt.

¹¹ Variiert werden der Grad der Sichtbehinderung und die Vorfahrtsregelung.

geeignete Lösung entworfen. Somit unterliegt die Entwicklung geeigneter Assistenzfunktionen im Unterschied zu verwandten Bottom-Up-Forschungsansätzen zunächst keinen Beschränkungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit einzelner Sensoren oder Kommunikationstechnologien¹². Anforderungen an das kreuzungsspezifische Fahrerassistenzsystem leiten sich allein aus funktionalen Notwendigkeiten ab. Erst später folgen aus den für dieses System erforderlichen Informationen die Anforderungen an die zur Realisierung im Fahrzeug benötigte Sensorik.

Eine Herausforderung für die Kreuzungsassistenz besteht in der großen Anzahl potentiell kritischer Verkehrssituationen. Da diese sich zum Teil erheblich unterscheiden, versteht man Kreuzungsassistenz als Überbegriff für eine Reihe spezifischer Teilsysteme, die jeweils nur einen Teil dieser Situationen adressieren¹³. Abhängig von den jeweils betroffenen Unfallszenarien führt dies zu unterschiedlichen Assistenzstrategien und Systemansätzen.

Ein wesentliches Element in der Entwicklung von parallelen, den Fahrer unterstützenden Assistenzsystemen ist die Kenntnis, wann ein Eingriff des überwachenden Systems hilfreich oder erforderlich ist und vom Fahrer als nicht störend empfunden wird. Für Kollisionsschutzsysteme umfasst dies eine frühzeitige Identifikation und Bewertung potentiell bevorstehender Kollisionen. Nach BERNDT¹⁴ müssen für die Ausgabe von Warnungen zwei Bedingungen erfüllt sein, um die Anzahl zu erwartender Fehlwarnungen möglichst gering zu halten. Diese Bedingungen fordern, dass atypisches Fahrerverhalten vorliegt und dass aus diesem Verhalten eine Bedrohung hervorgeht.

Für den Fall des Einbiegens/Kreuzens entspricht das Fehlverhalten dem Einfahren in die Kreuzung trotz vorfahrtsberechtigtem Querverkehr; die Gefahr einer Kollision mit diesem stellt die Bedrohung dar. Somit ergeben sich abgesehen von den Anforderungen an Sensorik bzw. Kommunikation folgende Herausforderungen:

- die Erkennung potentiell bevorstehender Kollisionen,
- die Erkennung des Überfahrens einer definierten Halteposition und
- die Auswahl einer geeigneten Unfallvermeidungsstrategie.

¹² bspw. Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in BENMIMOUN; SUZUKI (2006): *Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation für die Kreuzungsassistenz* oder KLANNER ET AL. (2006): *ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz*.

¹³ bspw. Einbiege-/Kreuzungsassistenz, Ampelassistenz und Fußgängererkennung, vgl. GRÜNDL (2005): *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen* S. 41.

¹⁴ BERNDT ET AL. (2007): *Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems*.

Der Entscheidungsprozess, ob ein Systemeingriff auszuführen ist, wird für den Fall des Einbiegens/ Kreuzens somit in zwei Teilaufgaben gegliedert. Bestandteil der ersten Teilaufgabe ist die Bewertung, ob bei Einfahrt oder Durchquerung der Kreuzung eine Kollision mit dem Querverkehr droht, falls keine intervenierenden Maßnahmen (selbstständig durch den Fahrer oder unterstützt durch ein Assistenzsystem) eingeleitet werden. Diese Aussage über die Kollisionswahrscheinlichkeit ist bereits während der Annäherung an die Kreuzung zu treffen, um gegebenenfalls einen Eintritt in die Konfliktzone zu vermeiden. Dies setzt die Prognosemöglichkeit zukünftiger Fahrzeugbewegungen für beide Kollisionspartner voraus. Da diese Bewegungen vom Fahrer des jeweiligen Fahrzeugs vorgegeben werden, lässt sich diese Bedingung der Beobachtbarkeit von Gefahrensituationen auf das Fahrerverhalten an Kreuzungen übertragen. Je stärker das Fahrerverhalten bei der Kreuzungsannäherung variiert, desto geringer ist die Genauigkeit der Kollisionsprädiktion, die Beobachtbarkeit von Gefahrensituationen sinkt bzw. ist nicht mehr gegeben.

Die zweite Teilaufgabe ist die Erkennung einer ausbleibenden Fahrerreaktion auf die bevorstehende Gefahrensituation. Auch die Erkennungsmöglichkeit, ob der Fahrer auf die vorliegende Verkehrssituation aus eigenem Antrieb reagieren wird, ist vom Fahrerverhalten abhängig. Sie ist grundsätzlich nur für Situationen gegeben, in denen Fahrerreaktionen üblicherweise vor dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt erfolgen. Andernfalls kann die Fahrerabsicht für die Mehrheit der Fahrer nicht rechtzeitig erkannt werden, die Systemzuverlässigkeit sinkt.

Grundlage zur Auslegung geeigneter Assistenzfunktionen ist eine Analyse besonders kritischer, also sowohl häufiger als auch schwerer Unfalltypen im Kreuzungsbereich. Die Anforderungen an geeignete Assistenzmaßnahmen ergeben sich aus einer Analyse des Fahrerverhaltens für Verkehrssituationen, die den ausgewählten Unfallschwerpunkten entsprechen. Zu diesem Zweck werden Probandenversuche und Verkehrsbeobachtungen an Kreuzungen durchgeführt. Zudem wird auf vorhandene Messdaten einer Studie zum Fahrerverhalten zurückgegriffen¹⁵. Spezifische Vorversuche im Fahr-simulator liefern zusätzliche Informationen über die Akzeptanz des Fahrers für Systemeingriffe in kritischen Situationen, wie sie im Rahmen der Fahrerverhaltensuntersuchungen nicht auftraten.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen erlauben eine Aussage über geeignete Warnstrategien für ein entsprechendes Kreuzungsassistenzsystem und liefern Informationen über die Möglichkeiten bei der Erkennung potentieller Gefahrensituationen. Aus den

¹⁵ VOLLRATH ET AL. (2004): *INVENT Kreuzungsverhalten - Endbericht*.

hierzu erforderlichen Sensordaten ergeben sich Anforderungen an zukünftige, geeignete Umfeldsensoren oder Kommunikationstechnologien.

Die Verwendung von Rapid-Prototyping-Entwicklungstools ermöglicht die Umsetzung eines auf diesen Erkenntnissen basierenden fahr- und erlebbaren Kreuzungsassistenten. Probandenversuche in einem dynamischen Fahrsimulator dienen zur Absicherung der Funktion sowie zur Untersuchung der Fahrer-Akzeptanz für die ausgewählten Warnstrategien und Situationsbewertungsroutinen.

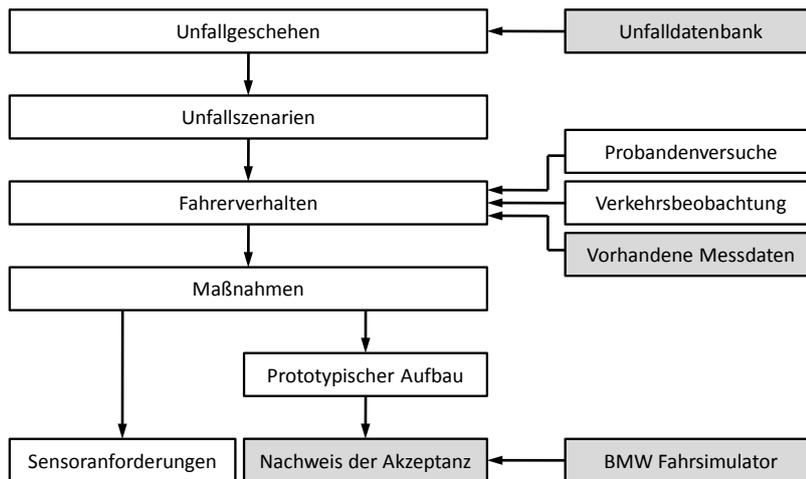


Abbildung 1.2: Überblick der Untersuchungsmethodik (fremde Untersuchungen bzw. Hilfsmittel sind grau hinterlegt)

Das Vorgehen ist in Abbildung 1.2 zusammengefasst. Die rechte Spalte stellt die Untersuchungswerkzeuge der einzelnen Arbeitsschritte dar.

2 Anforderungen an die Einbiege-/Kreuzenassistentz

2.1 Grundsätzliche Anforderungen an Sicherheitssysteme

Wesentlich für die Akzeptanz von Systemen der aktiven Sicherheit ist, dass Systemeingriffe den Fahrer nicht stören¹⁶. Dabei ist das Auftreten von Fehlwarnungen, sogenannten „False Positives“, für eine Akzeptanz des Fahrers besonders hinderlich¹⁷. Bereits geringe Fehlalarmraten können zudem das Vertrauen des Nutzers und somit die Effektivität eines warnenden Systems deutlich mindern. So schenken Piloten den Warnungen eines frühen Kollisionswarnsystems für Flugzeuge aufgrund der häufigen False-Positives keine Beachtung¹⁸. Dementsprechend hat auch bei aktuellen, warnenden bzw. eingreifenden Systemen auf Basis von Umfeldsensoren die Vermeidung von Falschmeldungen höchste Priorität¹⁹. Dennoch wird die Vermeidung von Fehlwarnungen bei warnenden Systemen niemals vollständig möglich sein, da systembedingt unsichere Größen prognostiziert werden müssen²⁰. Es gilt daher, die zu erwartende Quote der Fehlwarnungen durch geschickte Wahl der Warnkriterien und eine geeignete Warnstrategie zu minimieren.

Für übersteuerbare Systemeingriffe gelten verglichen mit warnenden Systemen höhere Anforderungen an die Zuverlässigkeit. Da der Fahrer durch ein evtl. erforderliches Übersteuern eines Systemeingriffs in kritischen Situationen wertvolle Zeit verliert, müssen autonome Eingriffe auch bei übersteuerbaren Systemen mit hoher Sicherheit die geeignete Aktion beinhalten²¹.

¹⁶ HOFFMAN ET AL. (2003): *Driver Preference of Collision Warning Strategy and Modality*.

¹⁷ vgl. u.a. BERNDT ET AL. (2007): *Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems* S. 387-398.

¹⁸ DINGUS ET AL. (1997): *Human Factors Field Evaluation of Automotive Headway Maintenance/ Collision Warning Devices* S. 216-229.

¹⁹ vgl. für BAS-plus bspw. MÜCKE; BREUER (2007): *Bewertung von Sicherheitssystemen in Fahrversuchen* S. 119-129.

²⁰ vgl. u.a. ZABYSHNY; RAGLAND (2003): *False Alarms and Human-Machine Warning Systems* oder JANSSEN (1989): *The impact of collision avoidance systems on driver behaviour and traffic safety: Preliminaries to studies within the GIDS projects* S. 9.

²¹ vgl. JANSSEN (1989): *The impact of collision avoidance systems on driver behaviour and traffic safety: Preliminaries to studies within the GIDS projects* S. 18.

Gemäß dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1968 muss der Fahrer permanent die volle Kontrolle über sein Fahrzeug haben²². Fahrerassistenzsysteme (FAS) dürfen weder die Entscheidungsfreiheit des Fahrers einschränken noch ihn zusätzlich belasten²³. Sollte die Assistenz bis zum autonom agierenden System, also bis zum teilautomatisierten Fahren reichen, muss der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug wieder erlangen können. Dies ist u.a. auch darin begründet, dass vom Fahrer nicht übersteuerbare Systeme grundlegende Änderungen des Straßenverkehrsrechts erfordern²⁴.

Neben den genannten Faktoren ist bei der Auswahl der Warnstrategie und des Human-Machine-Interface (HMI) darauf zu achten, dass die Einführung eines Kreuzungsassistenzsystems den Fahrer nicht zu riskanterem Fahren veranlasst. Fahrer neigen dazu, ihr Risiko auf einem konstanten Niveau zu halten, reagieren also auf sicherheitstechnische Bedingungen kompensatorisch durch riskanteres Fahren²⁵. Dieser Effekt auf das Fahrerverhalten wurde bspw. für Collision Avoidance Systems (CAS) zur Vermeidung von Auffahrunfällen auf Autobahnen nachgewiesen²⁶. Ein Kreuzungsassistenzsystem sollte daher keine Informationen bereitstellen, die den Fahrer zu einem potentiell gefährlichen Verhalten gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern verleiten könnten²⁷. Zusätzlich ist bei der Gestaltung der Bedien- und Warnelemente darauf zu achten, dass die Aufmerksamkeitsanforderungen von Anzeigen und Bedienelementen mit der Verkehrssituation vereinbar sind²⁸.

²² bspw. zitiert von SEECK; GASSER (2006): *Klassifizierung und Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Einführung moderner FAS* oder ALBRECHT (2005): *Die rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Implementierung von Fahrerassistenzsystemen zur Geschwindigkeitsbeeinflussung* S. 186-198.

²³ vgl. REICHART (1998): *Sichere Elektronik im Kraftfahrzeug* S. 78–83.

²⁴ vgl. u.a. SEECK; GASSER (2006): *Klassifizierung und Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Einführung moderner FAS* oder ALBRECHT (2005): *Die rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Implementierung von Fahrerassistenzsystemen zur Geschwindigkeitsbeeinflussung* S. 186-198.

²⁵ HOYOS ET AL. (1995): *Forderungen an verhaltensorientierte Verkehrssicherheitsarbeit* S. 11-26.

²⁶ Eine Untersuchung im Fahrsimulator ergab, dass Fahrer mit CAV auf Autobahnen höhere Geschwindigkeiten fahren und geringe Abstände zum vorausfahrenden Fahrzeug wählen, vgl. JANSSEN; NILSSON (1992): *An experimental evaluation of in-vehicle collision avoidance systems* S. 17-23.

²⁷ vgl. JANSSEN (2000): *Driver Distraction in the European Statement of Principles on In-Vehicle HMI: A Comment*.

²⁸ JANSSEN (2000): *Driver Distraction in the European Statement of Principles on In-Vehicle HMI: A Comment*.

2.2 Anforderungen an die Kreuzungsassistenz

Der Begriff Kreuzungsassistenz beinhaltet eine Vielzahl von Teilaufgaben. Diese umfassen unter anderem die Erkennung von Kreuzungen und Vorfahrtsregelungen, Bestimmen/Schätzen des nächsten Phasenwechsels von Lichtsignalanlagen (LSA), Berücksichtigung vorausfahrender Fahrzeuge und Fußgänger sowie Abschätzen der Gefahr von Kollisionen mit dem Querverkehr²⁹. Somit ergeben sich für ein Sicherheitssystem zur Vermeidung von Unfällen beim Einbiegen/Kreuzen vielfältige Anforderungen.

2.2.1 Wünsche und Akzeptanz des Fahrers

Das Unfallvermeidungspotential aktiver Sicherheitssysteme steht und fällt mit der Anzahl der ausgerüsteten Fahrzeuge³⁰. Um eine möglichst hohe Akzeptanz für einen Einbiege-/Kreuzungsassistenten sicherzustellen, sollten die Wünsche des Fahrers bei der Systementwicklung berücksichtigt werden. Im Rahmen des Projektes INVENT wurde eine Fragebogenstudie durchgeführt, um diese Wünsche zu identifizieren³¹.

Zusammengefasst ergab sich, dass Kreuzungsfahrten schwieriger erscheinen, wenn andere Verkehrsteilnehmer beachtet werden müssen. Als wesentliche Einflussgrößen auf den subjektiven Schwierigkeitsgrad werden Sichtbehinderungen und hohe Komplexität von Kreuzungen genannt.

Allgemein erwarten die befragten Fahrer von warnenden oder eingreifenden Systemen einen spürbaren Sicherheitsgewinn³². Dabei werden warnende Systeme besser beurteilt, als informierende oder autonom eingreifende Systeme. Abhängig von der Fahrerfahrung weichen die Wünsche des Fahrers von diesem Gesamteindruck ab, unerfahrene und ältere Fahrer erwarten von einem autonom eingreifenden System eine höhere Entlastung.

Ein weiterer Faktor für die Fahrer-Akzeptanz ist die Systemzuverlässigkeit in kritischen Situationen. Der Fahrer erwartet von einem Kreuzungsassistenten, dass eine zuverlässige Funktion für alle potentiellen Kollisionspartner gewährleistet ist. Eine Einschränkung auf Kollisionen zwischen C2C-ausgerüsteten Fahrzeugen führt zu einem

²⁹ TIJERINA ET AL. (1994): *Examination of Signalized Intersection, Straight Crossing Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures* S. 4.

³⁰ Dies gilt insbesondere für Kreuzungsassistenzsysteme auf C2C-Basis, vgl. Kapitel 3.2.3.

³¹ VOLLRATH ET AL. (2004): *INVENT Kreuzungsverhalten - Endbericht* S. 98ff.

³² VOLLRATH ET AL. (2004): *INVENT Kreuzungsverhalten - Endbericht* S. 104.

signifikanten Rückgang der Akzeptanz³³. Inwieweit eine Einschränkung der Systemfunktion auf einzelne Kreuzungen den gleichen Effekt auf die Fahrerakzeptanz hat, wurde nicht untersucht.

Eine zusätzliche Anforderung ergibt sich aus dem Risikoempfinden der Verkehrsteilnehmer. Laut SÖMEN verdrängt der Fahrer das eigene Unfallrisiko, Unfälle passieren immer nur den Anderen³⁴. Diese Vorstellung ist bei Männern und bei Fahrern leistungsstärkerer Fahrzeuge besonders stark ausgeprägt. Der individuelle Nutzen von Sicherheitssystemen wird daher meist unterschätzt, wodurch die Zahlungsbereitschaft des Endkunden für derartige Systeme sinkt. Dies lässt Ansätze mit mehreren eigens für die Kreuzungsassistenz integrierten Sensoren unrealistisch erscheinen.

2.2.2 Genauigkeit der Kollisionserkennung

Zur Vermeidung störender Systemeingriffe werden Systemmaßnahmen nur ausgelöst, wenn eine Kollision mit dem Querverkehr bevorsteht³⁵. Die Erkennung von Kollisionen ist allerdings mit Ungenauigkeiten unterschiedlichen Ursprungs behaftet. Da eine Aussage über einen zukünftigen Zustand getroffen wird, sind für die beteiligten Fahrzeuge künftige Bewegungen zu prädictieren. Unsicherheiten bei der Manövererkennung und Abweichungen der Bewegungsprädiktion, jeweils für beide Kollisionspartner, verringern daher die Zuverlässigkeit der Kollisionserkennung ebenso, wie Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der aktuellen Positionen und der Fahrzustandsgrößen der Fahrzeuge. Somit ist die zu erwartende Genauigkeit der Kollisionserkennung von der Güte der Fahrerhaltensprädiktion und der Qualität der durch Sensoren oder Kommunikationstechnologien bereitgestellten Eingangsgrößen abhängig.

Um eine möglichst hohe Akzeptanz zu gewährleisten und den potentiellen Sicherheitsgewinn zu optimieren, orientiert sich die verwendete Kollisionserkennung idealerweise an der Gefahrenwahrnehmung des Fahrers an Kreuzungen. Weicht die Gefahrenschätzung des Systems deutlich von der subjektiven Wahrnehmung des Fahrers ab, ist entweder mit einem Rückgang der Fahrerakzeptanz³⁶ oder mit einer Verringerung des

³³ Ergebnisse einer Probandenstudie im Fahrsimulator, vgl. BENMIMOUN ET AL. (2006): *Analyse eines Kreuzungsassistenten in der Verkehrsflusssimulation und im Fahrsimulator* S. 967-988.

³⁴ vgl. SÖMEN (1985): *Risikoerleben* S. 89-112: Zwischen 75 und 90% der Fahrer halten sich für überdurchschnittlich gute Fahrer.

³⁵ Zusätzliche Bedingung ist, dass der Fahrer auf diese Situation nicht mehr selbständig reagieren wird, vgl. Kapitel 1.3.

³⁶ Die Systembewertung der Situation ist kritischer als die Wahrnehmung des Fahrers, der Fahrer empfindet Warnungen/Eingriffe als unnötig und störend.

Unfallvermeidungspotentials³⁷ zu rechnen. Die Genauigkeitsanforderungen der Kollisionserkennung sind daher von der Gefahrenwahrnehmung des Fahrers abhängig. Die Wahrnehmung von Gefahren im Straßenverkehr durch den Menschen ist jedoch höchst subjektiv und unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren³⁸.

2.2.2.1 Akzeptierte und verworfene Zeitlücken zum QV

Die Zeit, die zwischen dem Erreichen der Kreuzung durch zwei Fahrzeuge vergeht, wird als Zeitlücke bezeichnet³⁹. Die üblicherweise akzeptierten/verworfenen Zeitlücken erlauben eine Aussage, wann der Fahrer die Gefahr einer Kollision als zu hoch einschätzt, um in die Kreuzung einzufahren.

Zur Wahl der Lücken beim Kreuzen existiert in der Literatur eine Vielzahl von Untersuchungen. WAGNER⁴⁰ gibt an, dass 90% der Fahrer Lücken unterhalb von 4,3 s in der Regel nicht akzeptieren. Die üblicherweise gerade noch akzeptierte Lückengröße liegt nach POLUS⁴¹ zwischen 5,1 und 7,7 s. Diese Größe wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Wesentliche Einflussfaktoren sind u.a. die Verkehrsdichte auf der Vorfahrtsstraße⁴², das Vorhandensein und die Länge einer Warteschlange an der Kreuzung⁴³, die Anzahl der bereits verworfenen Lücken, der Fahrtzweck⁴⁴ sowie

³⁷ Ist die Systembewertung der Situation deutlich unkritischer als die Wahrnehmung des Fahrers, so wird in potentiell kritischen Situationen nicht gewarnt, obwohl der Fahrer eine Warnung akzeptiert hätte. Dies verringert den möglichen Sicherheitsgewinn. Zusätzlich wird das Vertrauen des Fahrers in das System aufgrund der geringeren Zuverlässigkeit negativ beeinträchtigt.

³⁸ SÖMEN (1985): *Risikoerleben* S. 89-112.

³⁹ Es wird unterschieden zwischen Lücken im Querverkehr und Lücken zum Querverkehr. Eine Lücke im Querverkehr entspricht dem (zeitlichen) Abstand zwischen zwei vorfahrtsberechtigten Fahrzeugen, die sich aus gleicher Richtung der Kreuzung nähern. Eine Lücke zum Querverkehr bezeichnet die Zeitdifferenz aus TTI_{Ego} und TTI_{QV} .

⁴⁰ WAGNER (1966): *An Evaluation Of Fundamental Driver Decisions And Reactions At An Intersection* S. 68-84.

⁴¹ POLUS (1983): *Gap acceptance characteristics at unsignalised urban intersections* S. 255-258.

⁴² Die Größe akzeptierter Lücken sinkt bei hoher Verkehrsdichte auf der Vorfahrtsstraße, vgl. WAGNER (1966): *An Evaluation Of Fundamental Driver Decisions And Reactions At An Intersection* S. 68-84.

⁴³ vgl. u.a. EBBESEN; HANEY (1973): *Flirting with Death: Variables Affecting Risk Taking at Intersections* S. 303-324.

⁴⁴ vgl. u.a. KAYSI; ALAM (2000): *Driver Behavior And Traffic Stream Interactions At Unsignalized Intersections* S. 598-505.

diverse Kreuzungsparameter⁴⁵. Ein Vergleich der Zeitlücken beim Einbiegen und Kreuzen ergibt, dass die Zeitlücken beim Kreuzen mit durchschnittlich 5,6 bis 7,7 s signifikant größer sind als beim Rechts- oder Linkseinbiegen (durchschnittlich 4,3 bis 7,2 s bzw. 4,9 bis 7,3 s)⁴⁶.

Aufgrund der großen Zahl von Einflussfaktoren, deren Gewicht teils nur qualitativ bekannt ist, erscheint es schwierig, jeden Fahrer in jeder Situation optimal zu unterstützen. Daher wird für folgende Betrachtungen eine kritische Lückengröße definiert, die von der überwiegenden Mehrheit der Fahrer nicht akzeptiert wird. Gemäß den Ergebnissen von WAGNER wird hierzu ein zeitlicher Abstand von 4,3 s zum/im Querverkehr gewählt.

2.2.2.2 Akzeptanz von Warnungen abhängig von der Zeitlückengröße

Die im vorangegangenen Unterkapitel definierte kritische Lückengröße dient als Indiz für die Gefahrenwahrnehmung durch den Fahrer. Sie gibt den zeitlichen Bereich wieder, in dem eine Verkehrssituation vom Fahrer üblicherweise als zu kritisch eingestuft wird, um in die Kreuzung einzufahren. Die kritische Lückengröße wird daher als oberes Maß für den zeitlichen Bereich verwendet, in dem eine Warnung vom Fahrer akzeptiert wird. Erfolgen Warnungen bei größeren zeitlichen Lücken, so besteht die Gefahr, dass der Fahrer in einer subjektiv als nicht kritisch eingestuften Situation gewarnt wird und diese Warnung als störend empfindet.

Um den zeitlichen Bereich, in dem Systemmaßnahmen vom Fahrer akzeptiert werden, genauer einzugrenzen, erfolgt im Rahmen der Vorversuche eine Untersuchung der Fahrerakzeptanz für Kollisionswarnungen in unterschiedlich kritischen Kreuzensituationen. Die entsprechenden Versuchsergebnisse gehen direkt in die Anforderungen an Einbiege-/Kreuzenassistenzsysteme ein und werden daher bereits an dieser Stelle vorgestellt.

Die Versuchsdurchführung erfolgt in einem statischen Fahrsimulator⁴⁷. Für Anfahrten an eine Kreuzung mit vorgegebener Geschwindigkeit⁴⁸ erfolgt als Reaktion auf systematisch angesteuerten, vorfahrtsberechtigten Querverkehr eine Warnung des Fahrers.

⁴⁵ vgl. u.a. RAGLAND ET AL. (2005): *Using Field Observation Video for the Analysis of Driver Behaviors in Left-Turn Maneuvers against Oncoming Vehicles*

⁴⁶ vgl. LASSARRE ET AL. (1991): *Gap Acceptance And Risk Analysis At Unsignalised Intersections* S. 258-269.

⁴⁷ vgl. Kapitel 6.2.2 bzw. Kapitel 9.5.1 im Anhang.

⁴⁸ Durch Verwendung eines angepassten Fahrgeschwindigkeitsreglers ist die Geschwindigkeit für alle Kreuzungsannäherungen konstant und identisch.

Bei Reaktion des Fahrers nimmt das Simulatorfahrzeug unbemerkt vom Fahrer eine Zielbremsung vor, die das Fahrzeug mit annähernd konstanter Verzögerung direkt vor Eintritt in die Kreuzung zum Stillstand bringt. Diese autonome Verzögerung erfolgt, um reproduzierbare Anhaltvorgänge und Haltepunkte zu gewährleisten. Die Ansteuerung des Querverkehrs ermöglicht es, den zeitlichen Abstand zwischen eigenem und fremdem Fahrzeug, der sich beim Durchfahren der Kreuzung unter Beibehaltung der Geschwindigkeit ergeben hätte, systematisch zu variieren.

Alle Versuche erfolgen an der gleichen Kreuzung ohne Sichtbehinderung. Der Querverkehr kann somit während der gesamten Annäherungsfahrt beobachtet werden. Eine Befragung der Probanden ermittelt im Anschluss die Akzeptanz für eine Warnung in der jeweils vorliegenden Situation. Zusammenfassend ergibt sich, dass etwa 80% der Fahrer eine Warnung akzeptieren, obwohl sie die Kreuzung ± 1 s vor bzw. hinter dem vorfahrtsberechtigten Querverkehr durchfahren hätten⁴⁹.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass die Versuche in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt wurden. Das Ausbleiben von kinästhetischem Feedback während der Fahrzeugverzögerung schwächt daher u.U. den Eindruck der Intensität des Notbremsmanövers. Da die Probanden während der gesamten Annäherung den QV beobachten, tritt zudem unabhängig von der vorhandenen Lückengröße keine Schrecksituation auf. Es ist daher möglich, dass Verkehrsteilnehmer in der Realität nach Erleben einer Notbremsung durchaus auch Situationen mit größeren zeitlichen Abständen als kritisch einstufen. Auch ein Einfluss des Probandenkollektivs auf die Ergebnisse ist denkbar. Es setzt sich aus 18 männlichen Probanden mit vergleichsweise hoher Fahrerfahrung⁵⁰ zusammen.

Zudem ist ein Einfluss der Simulationsumgebung auf die Bewertung der Zeitlücken im Fremdverkehr wahrscheinlich. So ergab eine Studie der Zeitlücken beim Linksabbiegen, dass akzeptierte Lücken in einem anderen statischen Simulator generell kürzer waren als im Realfahrzeug⁵¹. Überträgt man diese Aussagen auf die Wahrnehmung von Gefahrensituationen, so besteht die Möglichkeit, dass die verfügbare Ungenauigkeit bei der Kollisionserkennung in der Realität größer als ± 1 s ist.

⁴⁹ zu den Versuchsergebnissen vgl. auch MAGES ET AL. (2007): *Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistenz* S. 61-73 oder KLANNER ET AL. (2006): *ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz* S. 989-1012.

⁵⁰ Zu den Probanden zählen keine Fahranfänger und keine älteren Fahrer.

⁵¹ Nachgewiesen für den Simulator des Instituts für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt, vgl. MEYER ET AL. (2003): *Driver Behavior During Left Turn - a Field and a Simulator Experiment* S. 63-67.

Ein Vergleich der Lückengröße, die der Fahrer gerade noch zum Kreuzen akzeptieren würde, erhärtet die Vermutung, dass die Situationen im Fahrsimulator als weniger kritisch eingeschätzt werden. Für das identische Simulationsszenario⁵² erfolgt während der Anfahrt auf die Kreuzung keine Warnung des Fahrers. Eine anschließende Befragung zeigt, dass etwa 90% der Probanden bei einer Lückengröße von -2 s (eigenes Fahrzeug passiert die Kreuzung vor dem Querverkehr) mit der Entscheidung „Durchfahren“ einverstanden sind. Für Kreuzen nach dem Querverkehr akzeptieren alle Probanden diese Entscheidung bei einer Lückengröße von $+1$ s.

Zusammenfassend ist die Lückengröße, bei der eine Warnung vom Fahrer akzeptiert wird, nicht genau bekannt. Die Versuche zeigen jedoch, dass ein Bereich existiert, in dem die überwiegende Mehrzahl der Fahrer mit einer Warnung einverstanden ist, obwohl das Fahrzeug die Kreuzung vor bzw. nach dem Querverkehr durchfahren würde. Die bestimmte Lückengröße von ± 1 s wird als minimal verfügbarer Toleranzbereich betrachtet.

2.3 Unfallgeschehen

Die Grundlage zur Auswahl geeigneter Assistenzfunktionen bildet eine Analyse besonders kritischer, also sowohl häufiger als auch schwerer Unfallszenarien im Kreuzungsbereich. Hierfür wird auf die Unfalldatenbank GIDAS (German In-Depth Accident Studies)⁵³ zurückgegriffen, die etwa 2000 detailliert codierte Unfälle des Unfalltyps⁵⁴ „Einbiegen/Kreuzen“ umfasst⁵⁵. Für weitere Betrachtungen erfolgt eine Vorauswahl auf Kollisionen zwischen Kfz⁵⁶ mit vollständig codiertem Unfalltyp⁵⁷. Zur Beschreibung

⁵² Die Untersuchung erfolgt an der selben Kreuzung mit dem gleichen Probandenkollektiv, es werden identische Zeitlücken zum QV vorgegeben.

⁵³ Der Aufbau der Datenbank und die erfassten Parameter beschreibt OTTE; NEHMZOW (2002): *Codierungs-Katalog zur Dokumentation von Verkehrsunfällen*. Informationen zu den Methoden der Datenerhebung finden sich bspw. in GEORGI ET AL. (2004): *GIDAS German In-Depth Accident Study*.

⁵⁴ Der Unfalltyp ist durch eine dreistellige Schlüsselzahl definiert. Er beschreibt die Konfliktsituation, die zu dem Unfall führte. Für Kollisionen beim Einbiegen/Kreuzen umfasst diese Beschreibung die Fahrtrichtung des vorfahrtsberechtigten Querverkehrs und das Manöver des wartepflichtigen Fahrzeugs. Kollisionen mit dem Gegenverkehr beim Linksabbiegen, Abkommen von der Fahrbahn beim Einbiegen/Kreuzen (bspw. aufgrund von überhöhter Geschwindigkeit) oder Auffahrunfälle an Kreuzungen sind den Unfalltypen Abbiege-Unfall, Fahrnfall bzw. Unfall im Längsverkehr zuzuordnen und werden demnach nicht betrachtet, vgl. MEEWES (1984): *Unfalltypen-Katalog*.

⁵⁵ zum Zeitpunkt der Auswertung im Juni 2005.

⁵⁶ Konflikte mit Schienenfahrzeugen, Radfahrern oder Fußgängern werden nicht berücksichtigt.

dieser Szenarien werden u.a. die Parameter Unfalltyp, Vorfahrtsregelung, Kreuzungsgeometrie und Ortslage betrachtet.

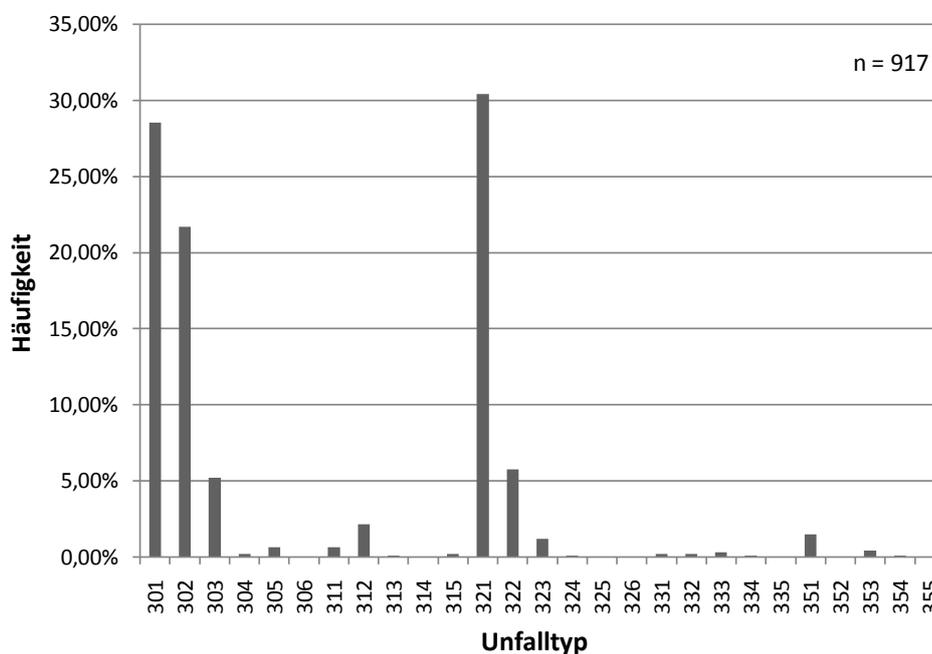


Abbildung 2.1: Unfallhäufigkeit beim Einbiegen/Kreuzen in Abhängigkeit vom Unfalltyp⁵⁸

Die Analyse der Unfallhäufigkeit für unterschiedliche Unfalltypen zeigt, dass auf die Unfalltypen 301, 302, 303, 321 und 322 etwa 93% aller betrachteten Unfälle beim Einbiegen/Kreuzen entfallen (Abbildung 2.1). Eine Übersicht dieser Unfalltypen bietet Abbildung 2.2. Der schwarze Pfeil stellt das Manöver des jeweils wartepflichtigen Fahrzeugs dar, der weiße Pfeil gibt die Fahrtrichtung des vorfahrtsberechtigten Kollisionspartners im Querverkehr wieder.

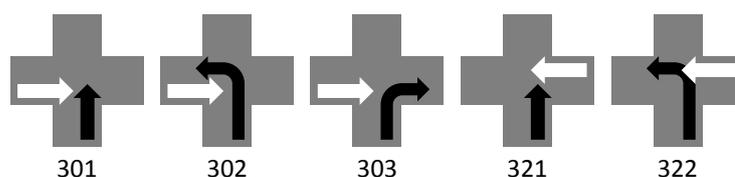


Abbildung 2.2: Die häufigsten Unfalltypen beim Einbiegen/Kreuzen

Zu beachten ist, dass Unfälle an abknickender Vorfahrt oder Kollisionen mit überholenden Verkehrsteilnehmern im Querverkehr durch eigene Unfalltypen abgedeckt und nicht

⁵⁷ Für einen Teil der Unfälle sind Manöver oder Fahrtrichtung nicht bekannt. Diese Fälle werden für weitere Betrachtungen nicht berücksichtigt.

⁵⁸ Unfalldaten aus GIDAS, Stand Juni 2005.

in den abgebildeten Unfalltypen enthalten sind⁵⁹. Abbildung 2.3 zeigt die Unfallhäufigkeit für die fünf häufigsten Unfalltypen in Abhängigkeit von der Vorfahrtsregelung.

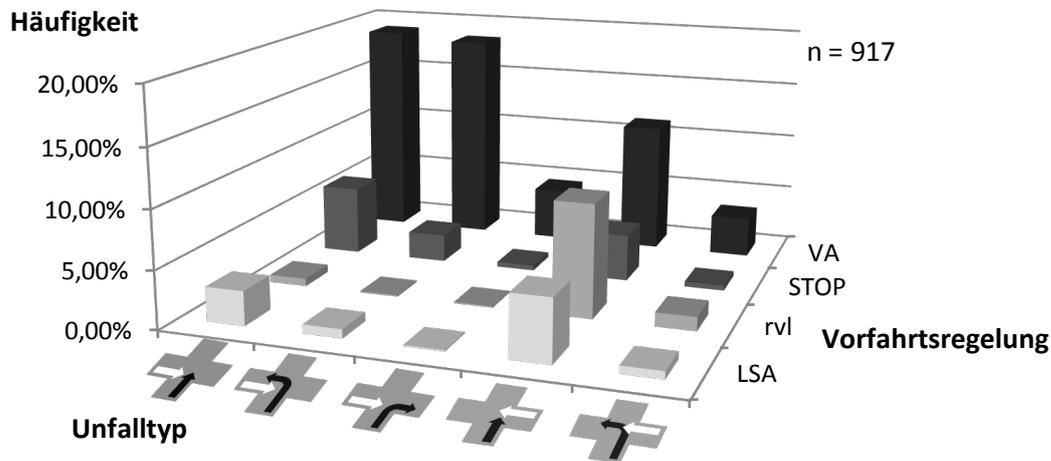


Abbildung 2.3: Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit von Unfalltyp und Vorfahrtsregelung für die häufigsten Unfalltypen⁶⁰. Dargestellt sind (von links nach rechts) die Unfalltypen 301, 302, 303, 321 und 322.

Es fällt auf, dass die Vorfahrtsregelung „Vorfahrt Achten“ (VA) unabhängig vom Unfalltyp die höchsten Unfallzahlen aufweist. An VA zeigt sich, dass sich Einbiegeunfälle größtenteils beim Linkseinbiegen mit Querverkehr von links ereignen. Für die übrigen Vorfahrtsregelungen sind Kollisionen beim Kreuzen häufiger als beim Einbiegen.

Die Untersuchung der Kreuzungsgeometrie zeigt, dass sich die Mehrzahl der betrachteten, auswertbaren Unfälle (75,7%) an X-förmigen Kreuzungen ereignet, deren Einmündungen etwa rechtwinklig aufeinandertreffen⁶¹. Auf rechtwinklige Kreuzungen mit einem Nebenast (T-förmige Kreuzungen) entfallen etwa 19,1% der Unfalldaten. Die Unfallzahlen an schiefwinkligen und sonstigen Kreuzungen, bspw. mit 5 oder mehr einmündenden Ästen, sind mit insgesamt ca. 5,2% gering.

Die betrachteten Unfälle ereignen sich zudem meist an Kreuzungen mit jeweils einem Fahrstreifen in jede Fahrtrichtung (79,7%). 8,0% der codierten Unfälle passierten an

⁵⁹ Unfälle an abknickender Vorfahrt werden durch die Typen 351-355 beschrieben. Auf diese Unfalltypen entfallen in Summe etwa 2% der betrachteten Unfälle. Kollisionen mit überholendem Querverkehr werden durch die Typen 311-315 (QV von links) bzw. 331-335 (QV von rechts) erfasst. Sie machen etwa 4% der betrachteten Unfalldaten aus. Für eine Übersicht über alle Unfalltypen siehe MEEWES (1984): *Unfalltypen-Katalog*.

⁶⁰ Unfalldaten aus GIDAS

⁶¹ Die ungefähren Winkel wurden aus Aufnahmen des Unfallgeschehens abgeleitet. Als rechtwinklig werden Einmündungen mit Winkeln zwischen 75° und 105° gewertet. Da Aufnahmen nicht für alle codierten Unfalldaten vorliegen, verringert sich die Datenbasis für die Untersuchung der Kreuzungsgeometrie auf 749 Fälle.

Kreuzungen mit einem Fahrstreifen für den wartepflichtigen und mehreren Fahrstreifen für den vorfahrtsberechtigten Verkehr, während in 12,3% der Fälle die Anzahl der Fahrspuren in Fahrtrichtung für beide relevanten Einmündungen zwei oder größer war.

Die Untersuchung der Ortslage zeigt, dass sich Unfälle beim Einbiegen bzw. Kreuzen größtenteils innerorts ereignen (87,3%). Die Untersuchung zusätzlicher Einflussfaktoren ergibt, dass Kollisionen mit dem Querverkehr meist bei Tageslicht geschehen (72,4%) und für die Mehrzahl der Unfälle kein Niederschlag vorliegt (82,7%).

Erkenntnisse zu möglichen Unfallursachen finden sich in der Literatur. FÜRSTENBERG ET AL. nennen als Hauptunfallursachen beim Einbiegen/Kreuzen Unaufmerksamkeit des Fahrers (36%), Fehlinterpretation (33%) und Sichtverdeckung (23%)⁶². Ähnliche Ergebnisse erhalten LLOYD ET AL. für den nordamerikanischen Raum⁶³.

Im Rahmen einer Befragung von Unfallbeteiligten kommen HOPPE ET AL. zu dem Ergebnis, dass in etwa 39% der untersuchten Kreuzungsunfälle ein Einfluss von Sichtverdeckung auf den Fahrerfehler vorlag⁶⁴. Dabei ist die Sicht an Kreuzungen meist durch parkende Fahrzeuge eingeschränkt, seltener durch statische Objekte wie bspw. Gebäude oder Pflanzen.

Nach TROUTBECK⁶⁵ ist die Hauptunfallursache für Kreuzungsunfälle (etwa 50% der Fälle), dass andere Verkehrsteilnehmer nicht oder zu spät gesehen wurden. Vielfach schaut der Fahrer in diesen Fällen in die richtige Richtung und übersieht dennoch das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug, eine Situation, die häufig als „Looked, but failed to see“ beschrieben wird.

Auf Basis von GIDAS stellt ROHRMÜLLER für Einbiege-/Kreuzen-Kollisionen an schilderegelten Kreuzungen fest, dass sich in 73% der codierten Unfälle sicht-

⁶² vgl. FÜRSTENBERG ET AL. (2007): *INTERSAFE - Deliverable 40.75: Final Report* S. 10. Grundlage dieser Ergebnisse ist die GIDAS-Datenbank und andere Unfallstudien für Westeuropa. Eine eigene Untersuchung der GIDAS-Unfalldaten (Stand 06/2005) ergibt, dass für etwa 21% der betrachteten Unfälle eine Einschränkung der Sichtbarkeit des Querverkehrs gegeben ist.

⁶³ Die Hauptunfallursachen sind Unaufmerksamkeit (29%), Fehlinterpretation (34%) und Sichtverdeckung (11%), vgl. LLOYD ET AL. (1996): *Driver-Vehicle Interface (DVI) Design Issues Of An Intersection Collision Avoidance (ICA) System*.

⁶⁴ vgl. HOPPE ET AL. (2007): *Identifikation von Einflussgrößen auf Verkehrsunfälle als Grundlage für die Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von Kreuzungsunfällen* S. 121-137. Befragt wurden jeweils der Unfallverursachende und andere Unfallbeteiligte.

⁶⁵ TROUTBECK (1986): *Average Delay At An Unsignalized Intersection With Two Major Streams Each Having A Dichotomized Headway Distribution* S. 272-286.

verdeckende Objekte innerhalb der letzten 10 m der Kreuzungsannäherung befinden⁶⁶. Für 25% der Kollisionen reicht die Sichtbehinderung so weit, dass ein Einsehen der Querstraße erst bei Stillstand an der Haltelinie möglich ist. Lediglich 18% der Unfälle ereigneten sich ohne jegliche Sichtbehinderung.

Untersuchungen der Unfallhäufigkeit zeigen, dass ältere Fahrer beim Einbiegen/Kreuzen ein erhöhtes Unfallrisiko aufweisen⁶⁷. Als mögliche Ursache hierfür nennt GRUBB die höhere Beanspruchung älterer Fahrer an Kreuzungen. Auf die Aufmerksamkeit des Fahrers beim Einbiegen hat das Alter hingegen keinen signifikanten Einfluss⁶⁸. VOLLRATH kommt zu dem Schluss, dass die Unterstützung älterer Fahrer kein „eigenes“ Kreuzungsassistenzsystem erfordert, sondern dass ältere Fahrer von Kreuzungsassistenten besonders stark profitieren⁶⁹.

Zusammenfassend lässt sich das typische Unfallgeschehen beim Einbiegen-/Kreuzen durch die Unfalltypen 301, 321, 302, 303 und 322 (in der Reihenfolge absteigender Unfallhäufigkeit) beschreiben, wobei sich Unfälle üblicherweise innerorts an X-förmigen, rechtwinkligen Kreuzungen mit jeweils einem Fahrstreifen je Fahrtrichtung ereignen, bei Tageslicht und ohne Niederschlag. Weitere Betrachtungen zu Realisierbarkeit und Anforderungen eines Einbiege- und Kreuzenassistenten orientieren sich daher an diesen Parametern.

Der Einfluss von Sichtbehinderung auf die Unfallzahlen ist nicht eindeutig bekannt. Während eingeschränkte Sicht bei ca. 20% der betrachteten Unfälle als Hauptunfallursache angesehen wird, liegt ein Einfluss von Sichtbehinderung auf den Fahrerfehler nach Einschätzung der Unfallbeteiligten in beinahe 40% der Fälle vor. Die betrachteten Szenarien umfassen daher Fälle mit unterschiedlich starker Sichtbehinderung.

2.4 Unterscheidung der Unfallszenarien

Die Beschilderung „Vorfahrt Achten“ schreibt vor, dass betroffene Verkehrsteilnehmer vorfahrtsberechtigten Verkehr bei ihrer Handlungsentscheidung berücksichtigen und

⁶⁶ vgl. ROHRMÜLLER (2007): *Prädiktion des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Trajektorien bei der Kreuzungsassistenz* S. 6ff.

⁶⁷ vgl. bspw. VOLLRATH (2007): *Mobil im Alter - und die Sicherheit?* S. 139-150 oder GRUBB (1986): *Driver Behavior At Intersections: An Analysis Of Accident Related Variables* S. 251-255.

⁶⁸ vgl. KESKINEN ET AL. (1998): *Older Drivers Fail In Intersections: Speed Discrepancies Between Older And Younger Male Drivers* S. 323-330.

⁶⁹ vgl. VOLLRATH (2007): *Mobil im Alter - und die Sicherheit?* S. 139-150.

ggf. anhalten müssen. Im Gegensatz zu STOP-Schild- oder LSA-geregelten Kreuzungen ergeben sich somit zusätzliche Aufgaben für den Fahrer. Die erforderlichen Handlungen zur Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer sind in Abbildung 2.4 für das Manöver Kreuzen dargestellt.

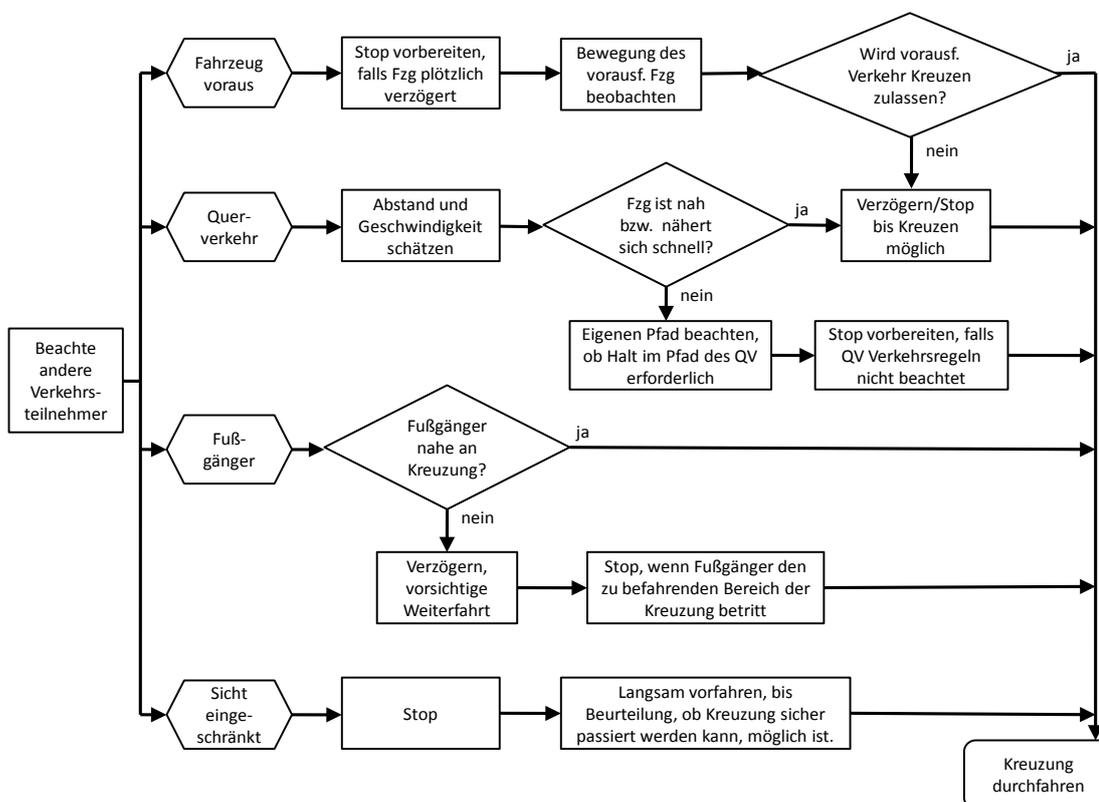


Abbildung 2.4: Aufgaben bei der Berücksichtigung fremder Verkehrsteilnehmer für das Durchqueren einer Kreuzung nach MCKNIGHT⁷⁰

Die Anforderungen an die Informationsverarbeitung sind für innerstädtische Verkehrssituationen mit beschilderten Kreuzungen, an denen der Fahrer wartepflichtig ist, besonders hoch⁷¹. Mögliche Fehlerursachen bei Bewertung des Querverkehrs sind Fehleinschätzungen der Geschwindigkeit, des Abstands oder des Manövers anderer Verkehrsteilnehmer⁷².

⁷⁰ vgl. MCKNIGHT; ADAMS (1970): *Driver education task analysis: Volume 1 - Task descriptions*, zitiert in TIJERINA ET AL. (1994): *Examination of Signalized Intersection, Straight Crossing Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures* S. 4.

⁷¹ vgl. FASTENMEIER (1995): *Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem* S. 76

⁷² vgl. TIJERINA ET AL. (1994): *Examination of Signalized Intersection, Straight Crossing Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures*

Im Folgenden wird ungeachtet des Unfalltyps zwischen zwei Unfallszenarien für VA-Kreuzungen unterschieden:

Das erste Szenario ist gekennzeichnet durch eine ausbleibende, unzureichende oder verspätete Reaktion des Fahrers auf die Vorfahrtsregelung, bspw. aufgrund von Unaufmerksamkeit oder Fehlinterpretation der Vorfahrtsregelung. Es ähnelt dem Überfahren einer LSA bzw. eines STOP-Schildes durch Unachtsamkeit.

Das zweite Unfallszenario beschreibt eine Kollision mit dem Querverkehr, nachdem der Fahrer die Vorfahrtsregelung erkannt und entsprechend reagiert hat. Es ist durch eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit während der Annäherung und die Beachtung vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer gekennzeichnet. Die Gefahrensituation resultiert aus einer ausbleibenden bzw. falschen Reaktion auf den vorfahrtsberechtigten Querverkehr und die nicht angepasste Handlungsentscheidung des Fahrers, in die Kreuzung einzufahren. Mögliche Ursachen umfassen das Übersehen von Fahrzeugen⁷³, eingeschränkte Sicht sowie eine fehlerhafte Bewertung des Querverkehrs. Die Entscheidung zum Durchfahren der Kreuzung kann noch während der Annäherungsfahrt (Abbruch des Anhaltevorgangs) oder aus dem Fahrzeugstillstand (Anfahren an der virtuellen Haltelinie⁷⁴) getroffen werden. Somit umfasst dieses Szenario auch Kollisionen an STOP-Schildern, die durch das Anfahren trotz Querverkehr entstehen.

⁷³ Dazu gehört u.a. das sogenannten „Looked, but failed to see“, vgl. bspw. UCHIDA ET AL. (1999): *Detection Of Vehicle Crossing Path At Intersection* oder TROUTBECK (1988): *Current And Future Australian Practices For The Design Of Unsignalized Intersections* S. 1-19.

⁷⁴ vgl. Kapitel 3.3.1

2.5 Fazit

Zusammenfassend ergeben sich für einen Einbiege-/Kreuzenassistenten die in Tabelle 2.1 aufgeführten Anforderungen:

Tabelle 2.1: Anforderungen an einen Einbiege-/Kreuzenassistenten⁷⁵

Gliederung	Art der Forderung	Anforderungen	
		Bezeichnung	Werte, Daten, Erläuterungen
Zuverlässigkeit	FF	Die Systemfunktionalität steht in typischen Unfallszenarien (Unfalltypen 301, 321, 302, 303 und 322, bei Tageslicht und Trockenheit an X-förmigen, einspurigen Kreuzungen...) zur Verfügung.	
	WF	Die Systemfunktionalität steht in vom Fahrer als schwierig empfundenen Situationen (Sichtbehinderung, hohe Komplexität von Kreuzungen) zur Verfügung	
	WF	Die Systemfunktionalität ist für alle potentiellen Kollisionspartner gewährleistet.	
	FF	Die Quote der Fehlwarnungen ist so gering, dass sie nicht zu einer Störung des Fahrers führt.	
HMI	FF	Systemeingriffe sind durch den Fahrer übersteuerbar.	
	FF	Berechtigte Systemeingriffe stören den Fahrer nicht.	
Gefahrenerkennung	FF	Die Kollisionsgefahr wird mit einer Mindestgenauigkeit bestimmt, die der Gefahrenwahrnehmung des Fahrers entspricht. Der vom Fahrer als kritisch eingestufte Bereich steht für Maßnahmen zur Verfügung.	Fahrer schätzt Lücken im QV < 4,3s als kritisch ein.
	FF	Die Unfallszenarien „ausbleibende Reaktion auf die Kreuzung bzw. Vorfahrtsregelung“ und „fehlerhafte Reaktion auf vorfahrtsberechtigten Querverkehr“ werden rechtzeitig erkannt und vermieden.	
Sensorik	WF	Es werden keine aufwändigen, kostenintensiven Sensoren eigens zur Kreuzungsassistenz eingesetzt.	

⁷⁵ Legende der Abkürzungen: FF = Festforderung (ohne Einschränkungen zu erfüllen), WF = Wunschforderung (nach Möglichkeit zu erfüllen)

3 Stand der Technik / Forschung

3.1 Aktualität der Kreuzungsassistenz

Die Vielzahl aktueller oder kürzlich abgeschlossener Projekte, die sich u.a. mit der aktiven Sicherheit an Kreuzungen befassen, unterstreicht die Bedeutung der Kreuzungsassistenz für zukünftige Sicherheitssysteme. Innerhalb des Europäischen Rahmenprogramms sind dies bspw. PReVENT, AIDE und GST⁷⁶. Kreuzungsassistenz war zudem einer der Schwerpunkte des deutschen Gemeinschaftsprojekts INVENT⁷⁷. In den USA sind von der FHWA (Federal Highway Administration) geförderte Forschungsvorhaben wie „Infrastructure Intersection Collision Avoidance“⁷⁸ und „Intersection Decision Support“⁷⁹ sowie „Intersection Collision Avoidance Using ITS Countermeasures“⁸⁰ der NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) zu nennen.

Erste Demonstratoren zur Kreuzungsassistenz mit Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer wurden bereits 2000 in Japan vorgestellt⁸¹. Die technischen Möglichkeiten zur Erkennung und Berücksichtigung fremder Verkehrsteilnehmer an Kreuzungen durch autonome Fahrzeuge zeigte im November 2007 die DARPA Urban Challenge auf⁸².

Trotz dieser intensiven Bemühungen ist bisher kein Kreuzungsassistenzsystem in Serie verfügbar. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass entsprechende Assistenzsysteme aufgrund der hohen Komplexität der Verkehrssituation im Kreuzungsbereich besondere Anforderungen an die erforderliche Sensorik stellen⁸³. Dies führt dazu, dass sich nahezu

⁷⁶ vgl. N.N. (2007): *PReVENT - Internetseite*, N.N. (2006): *AIDE - Internetseite* und N.N. (2006): *GST - Internetseite*.

⁷⁷ vgl. N.N. (2005): *INVENT - Internetseite*.

⁷⁸ vgl. FERLIS (2002): *Infrastructure Intersection Collision Avoidance*.

⁷⁹ vgl. CHAN ET AL. (2004): *Threat Assessment of Traffic Moving Toward A Controlled Intersection* S. 931-936.

⁸⁰ vgl. PIEROWICZ ET AL. (2000): *Intersection Collision Avoidance Using IVHS Countermeasures*.

⁸¹ vgl. bspw. BISHOP (2005): *Intelligent Vehicle Technology and Trends* S. 199 oder OSAWA (2004): *Cooperative Vehicle/Highway Systems in Japan*. Entsprechende Forschungsprojekte dort laufen in Kooperation mit NILIM (National Institute for Land and Infrastructure Management) und AHSRA (Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association).

⁸² vgl. N.N. (2007): *DARPA Grand Challenge - Internetseite*.

⁸³ vgl. BISHOP (2005): *Intelligent vehicle technology and trends* S. 32.

alle aktuellen Forschungsvorhaben in einer frühen Phase auf ein Sensor- oder Kommunikationskonzept zur Bereitstellung der erforderlichen Informationen festlegen.

3.2 Aktuelle Ansätze zur Kreuzungsassistentz

3.2.1 Infrastructure-Only(IO)-Systeme

Ein erster Schritt zur Verringerung der Unfallzahlen ist die Unterstützung des Fahrers durch Systeme in der Kreuzung. Entsprechende Assistenzansätze reichen von einfachen, statischen Einrichtungen zur Fahrerinformation bis hin zu aktiven, sensorgestützten Systemen, die potentiell Fehlverhalten von Verkehrsteilnehmern erkennen und dieses durch gezielte Warnung des Fahrers vermeiden⁸⁴. Statische Maßnahmen umfassen bspw. Markierungen vor LSA-geregelten Kreuzungen, um dem Fahrer die Entscheidung zu

erleichtern, ob eine auf gelb gewechselte Ampel noch ohne Stillstand überfahren werden kann⁸⁵. Auf derartige Ansätze wird im Folgenden nicht genauer eingegangen.

Zur Erkennung potentiell kritischer Situationen werden für aktive Infrastructure-Only-Systeme (IO-Systeme) je nach Systemfunktionalität und örtlichen Gegebenheiten in der Kreuzung unterschiedliche Sensortechnologien angedacht⁸⁶. Anhand dieser Informationen werden bevorstehende Verstöße des Fahrers wie das ungebremste Überfahren eines STOP-Schildes⁸⁷ oder potentielle Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern, bspw. beim Linksabbiegen⁸⁸, erkannt. All diese Systeme sind nicht auf Neuerungen im Fahrzeug angewiesen, wodurch allen Verkehrsteilnehmern an ausgerüsteten Kreuzungen sofort die volle Funktionalität zur Verfügung steht. Die Möglichkeiten bei der Auswahl geeigneter Warnelemente sind bei IO-Systemen sehr eingeschränkt⁸⁹. Zur Warnung des

⁸⁴ YAN ET AL. (2005): *Driver Behavior During Yellow Change Interval*.

⁸⁵ Der Abstand der Markierung zur Ampel ist so gewählt, dass Fahrzeuge mit einer angenommenen Richtgeschwindigkeit nach Passieren der Markierung bei grüner Ampelphase die Kreuzung vor Erreichen der roten Ampelphase durchfahren.

⁸⁶ Ein Ansatz auf Basis von Radarsensoren wird vorgestellt in CHAN ET AL. (2004): *Threat Assessment of Traffic Moving Toward A Controlled Intersection* S. 931-936, FRYE (2001): *International Cooperation to Prevent Collisions at Intersections* S. 41-46 schlägt Radar, Video oder Induktionsschleifen vor.

⁸⁷ FRYE (2001): *International Cooperation to Prevent Collisions at Intersections* S. 41-46.

⁸⁸ BISHOP (2005): *Intelligent vehicle technology and trends* S. 200.

⁸⁹ FERLIS (2002): *Infrastructure Intersection Collision Avoidance*.

Fahrers werden daher meist aktive Verkehrszeichen eingesetzt, wobei sich die Unterschiede auf Details in der Umsetzung beschränken⁹⁰.

IO-Systeme lassen sich an besonders unfallträchtigen Kreuzungen zur gezielten Verringerung der Unfallzahlen einsetzen. So ist das Ziel des amerikanischen Projektes CICAS (Cooperative Intersection Collision Avoidance System) die Senkung der Unfallzahlen im Kreuzungsbereich durch Ausrüstung der 15% unfallträchtigsten, LSA-geregelten Kreuzungen mit einem infrastrukturbasierten System zur Fahrerwarnung bis 2015⁹¹.

3.2.2 Fahrzeugautarke (FAT) Systeme

Als fahrzeugautarke (FAT) Kreuzungsassistenzsysteme werden im Folgenden Systeme verstanden, deren Funktion weder auf Systemkomponenten in der Kreuzung noch auf Systeme in anderen Fahrzeugen angewiesen ist⁹². Sie erfordern zur Umfelderkennung Sensoren im Fahrzeug, die je nach Systemfunktionalität Informationen über Kreuzungsparameter und über andere Verkehrsteilnehmer zur Verfügung stellen. Zur Erkennung der Vorfahrtsregelung wird u.a. auf GPS mit digitaler Karte, auf Kamerasysteme oder auf eine Kombination beider Lösungen zurückgegriffen⁹³. Ansätze zur Erfassung anderer Verkehrsteilnehmer stützen sich u.a. auf Videobildverarbeitung, Radar- oder Lidar-Sensoren⁹⁴.

⁹⁰ Ein Beispiel ist das sogenannte Smart-STOP-Sign, vorgestellt in CHAN ET AL. (2004): *Threat Assessment of Traffic Moving Toward A Controlled Intersection* S. 931-936. Weitere HMI sind beschrieben in BISHOP (2005): *Intelligent vehicle technology and trends* S. 200f, FRYE (2001): *International Cooperation to Prevent Collisions at Intersections* S. 41-46 oder YOSHIKAWA; HORIBATA (1995): *Indicating Apparatus from Preventing Vehicles from Colliding With Each Other as They Pass*.

⁹¹ BISHOP (2005): *Intelligent vehicle technology and trends* S. 201.

⁹² Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) werden in diesem Zusammenhang als On-Board Sensor betrachtet, da ihr Einsatz keine Maßnahmen in der Kreuzung erfordert.

⁹³ vgl. u.a. MEITINGER ET AL. (2004): *Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen*, GAVRILA (1999): *Traffic Sign Recognition Revisited*, FRANKE ET AL. (2004): *Kamerabasierte Kreuzungsassistenz - Camera-Based Intersection Assistance* S. 803-820, LINDNER ET AL. (2004): *Robust Recognition of Traffic Signals* S. 49-53.

⁹⁴ vgl. u.a. FRANKE ET AL. (2007): *Kollisionsvermeidung durch raum-zeitliche Bildanalyse* S. 25-32, LAGES (2004): *Laser Sensor Technologies for Preventive Safety Functions*, WENDER ET AL. (2006): *Object Classification exploiting High Level Maps of Intersections*, JOCOY; PIRSON (1999): *Threat Detection System for Intersection Collision Avoidance - Real-Time System Performance* S. 87-97.

Da sich das System im Fahrzeug befindet, kann der Fahrer bei der Auslegung eines geeigneten HMI besser berücksichtigt werden⁹⁵. Warnelemente können optisches, akustisches und taktiles/haptisches Feedback beinhalten, und mögliche intervenierende Maßnahmen können auch autonome Eingriffe nach sich ziehen, wenn bspw. eine Warnung nicht ausreichend ist⁹⁶.

Durch den Verzicht auf „fremde“ Systemkomponenten ist die Funktion von FAT-Systemen nicht auf einzelne Kreuzungen beschränkt. Allerdings lässt sich ein Teil der erforderlichen Informationen nicht oder nur sehr schwer über boardautonome Sensorik gewinnen. Dazu gehören beispielsweise Informationen über zu erwartende Phasenwechsel von LSA oder über Position und Fahrzustand anderer Verkehrsteilnehmer. Letzteres gilt insbesondere für die Erkennung von Kollisionen mit vorfahrtsberechtigtem Querverkehr beim Einbiegen/Kreuzen, wenn die Sicht auf andere Verkehrsteilnehmer an der Kreuzung eingeschränkt ist⁹⁷.

3.2.3 Systeme auf Basis von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (C2C)

Eine andere Möglichkeit zur Bereitstellung der erforderlichen Informationen für Assistenzsysteme im Fahrzeug ist die Kommunikation zwischen beteiligten Fahrzeugen, im Folgenden bezeichnet als Car-to-Car (C2C). Im Gegensatz zu konventionellen Umfeldsensoren stellt ein eingeschränkter Sichtbereich an Kreuzungen für C2C-Systeme meist kein Hindernis dar⁹⁸. Wie bei FAT-Systemen erlaubt die Nähe des Systems zum Fahrer große Freiheitsgrade bei der Gestaltung des HMI und, falls erforderlich, auch autonome Eingriffe⁹⁹.

Der wesentliche Nachteil reiner C2C-Systeme besteht darin, dass die Systemfunktion nur zwischen ausgerüsteten Kollisionspartnern gewährleistet ist. In der Einführungszeit ist wegen der anfangs geringen Ausrüstungsraten das Aufeinandertreffen zweier ausgerüsteter Fahrzeuge unwahrscheinlich. Der Anteil vermeidbarer Unfälle zwischen zwei ausgerüsteten Fahrzeugen an der Gesamtzahl identischer Unfälle entspricht somit dem

⁹⁵ vgl. FERLIS (2001): *Analysis of an Infrastructure Collision Avoidance Concept for Staright Crossing Path Crashes at Signalized Intersections*.

⁹⁶ Bspw. für OBS-Linksabbiegeassistenz in BRANZ; ÖCHSLE (2005): *Intersection Assistance: Collision Avoidance System for Turns Across Opposing Lanes of Traffic*.

⁹⁷ vgl. BISHOP (2005): *Intelligent Vehicle Technology and Trends* S. 32.

⁹⁸ vgl. KLANNER ET AL. (2006): *ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz* S. 989-1012.

⁹⁹ vgl. MEITINGER ET AL. (2006): *Linksabbiegeassistenz*.

Quadrat der Ausrüstungsrate¹⁰⁰. Demnach lassen sich durch Einführung eines C2C-basierten Kreuzungsassistenten in 20% aller Fahrzeuge gerade einmal 4% aller adressierten Unfälle vermeiden.

3.2.4 Kooperative Systeme (C2I)

Zwischen IO-Systemen und Ansätzen auf C2C-Basis sind kooperative Systeme, im Folgenden kurz Car-to-Infrastructure (C2I), anzusiedeln. Sie kombinieren infrastrukturgebundene Systemkomponenten mit Elementen im Fahrzeug. Dadurch wandert, verglichen mit IO-Systemen, das HMI in das Fahrzeug mit dem Vorteil der besseren Anpassbarkeit der Warnemente an den Fahrer¹⁰¹. Zudem ermöglichen C2I-Systeme an ausgerüsteten Kreuzungen schon in der Einführungsphase von Kommunikationstechnologien ins Fahrzeug einen Nutzen für den Fahrer. Gegenüber FAT-Systemen bieten sie eine höhere Informationsqualität und -quantität, insbesondere bei Sichtverdeckung¹⁰². Einige Assistenzfunktionen sind sogar nur durch C2I-Systeme möglich, beispielsweise die Information des Fahrers über bevorstehende Phasenwechsel einer LSA¹⁰³.

Nachteilig gegenüber IO-Systemen sind neue Anforderungen an das Fahrzeug durch eine zusätzliche Schnittstelle zwischen kreuzungsbasiertem System und fahrzeuginternem HMI. Allerdings stellen C2I-Systeme nur geringe Anforderungen an das Fahrzeug, wenn die Entscheidung über die Notwendigkeit intervenierender Maßnahmen in kreuzungsfesten Systemkomponenten erfolgt¹⁰⁴.

Andere Ansätze der kooperativen Assistenz sehen die Aufgaben der infrastrukturgebundenen Systemkomponenten lediglich in der Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer und/oder in der Information der Fahrzeuge über künftige Phasenwechsel der LSA, die Situationsbewertung und Warnentscheidung erfolgen im Fahrzeug. Je nach Ansatz liefern kreuzungsgebundene Sensoren dabei alle oder nur einen Teil der erforderlichen

¹⁰⁰ Unter der Annahme, dass ausgerüstete und nicht ausgerüstete Fahrzeuge homogen durchmischt sind, vgl. BENMIMOUN ET AL. (2005): *Specification and Assessment of Different Intersection Assistance Concepts Based on IVC (Inter-Vehicle-Communication) and RVC (Roadside-Vehicle-Communication)*.

¹⁰¹ vgl. FERLIS (2002): *Infrastructure Intersection Collision Avoidance*.

¹⁰² vgl. BISHOP (2005): *Intelligent vehicle technology and trends* S. 201.

¹⁰³ vgl. u.a. den Ampelassistent nach KOSCH; EHMANN (2006): *Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen und Funktionalitätserweiterungen durch den Einsatz von Kommunikationstechnologien*.

¹⁰⁴ In FERLIS (2002): *Infrastructure Intersection Collision Avoidance* wird sogar die Möglichkeit von After-Market-Systemen diskutiert. Die Kosten für ein einfaches HMI inkl. entsprechender Empfangstechnik werden auf 50\$ je Einheit geschätzt.

Informationen¹⁰⁵. Die Art des vorgeschlagenen Systemeingriffs ist unterschiedlich und kann von einer reinen Information¹⁰⁶ bis zum autonomen Volleingriff¹⁰⁷ reichen.

Die schrittweise Aufrüstung besonders unfallträchtiger Kreuzungen wird vielfach als geeignetes Einstiegsszenario für kommunikationsbasierte Kreuzungsassistenzsysteme betrachtet¹⁰⁸: Zunächst erfolgt der Aufbau reiner IO-Systeme. Diese werden nach und nach um Kommunikationslösungen ergänzt, während die Kommunikationstechnik Einzug ins Fahrzeug hat. Mit zunehmender Ausrüstungsrate der Fahrzeuge mit Kommunikationssystemen verringert sich der erforderliche Aufwand bei der Aufrüstung zusätzlicher Kreuzungen, da in zunehmendem Maße auf Informationen zurückgegriffen werden kann, die von den Fahrzeugen selbst zur Verfügung gestellt werden.

3.3 Situationsbewertung

3.3.1 Überfahren-/Einfahrenerkennung

Die Erkennung, dass ein Fahrer eine Halteposition überfahren wird, ist Bestandteil vieler aktueller Ansätze zur Kreuzungsassistenz. Im aus Sicht eines Assistenzsystems einfachsten Fall definiert die Haltelinie eines STOP-Schildes oder einer LSA diese Halteposition. Für Einbiege-/Kreuzen-Assistenzsysteme mit räumlicher Kollisionsvermeidung¹⁰⁹ ergibt sich diese Position aus dem Punkt, an dem das eigene Fahrzeug erstmalig in die Kreuzung eintritt. Soll der Eintritt in die potentielle Kollisionszone bzw. das Überfahren einer Haltelinie durch ein warnendes System vermieden werden, so ergibt sich die Problematik, dass richtige Fahrerreaktionen durchaus erst zu einem

¹⁰⁵ vgl. MATHIAS (2005): *The Intelligent Cooperative Intersection as Part of Urban Traffic Control Systems* oder CHAN ET AL. (2004): *Threat Assessment of Traffic Moving Toward A Controlled Intersection* S. 931-936 sehen die Sensorik vollständig in der Kreuzung, während SHLADOVER (2005): *Effects of Traffic Density on Communication Requirements for Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems (CICAS)* infrastrukturbasierte Sensoren als Möglichkeit sieht, die Anforderungen an fahrzeug-feste Sensoren zu verringern und die Informationsgenauigkeit zu verbessern.

¹⁰⁶ vgl. FERLIS (2002): *Infrastructure Intersection Collision Avoidance*

¹⁰⁷ vgl. TAKIGUCHI ET AL. (2002): *Collision in Right/Left Turn Prevention System*

¹⁰⁸ vgl. u.a. SHLADOVER (2005): *Effects of Traffic Density on Communication Requirements for Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems (CICAS)*, FERLIS (2000): *Infrastructure Support for the IVI* oder BISHOP (2005): *Intelligent Vehicle Technology and Trends* S. 200.

¹⁰⁹ Räumliche Kollisionsvermeidung beschreibt die Vermeidung des Einfahrens in die Kreuzung als mögliche Konfliktzone. Für Unfälle mit dem Querverkehr besteht zusätzlich die Möglichkeit der zeitlichen Kollisionsvermeidung, wenn beide Kollisionspartner die Kreuzung bspw. durch deutliche Geschwindigkeitsverringern eines Verkehrsteilnehmers zu unterschiedlichen Zeiten durchfahren.

Zeitpunkt erfolgen können, zudem bereits keine Warnmöglichkeit mehr gegeben ist. Um unnötige Warnungen zu vermeiden, ist der frühestmögliche Warnpunkt so zu wählen, dass Fahrerreaktionen üblicherweise bereits erkennbar sind¹¹⁰. Der resultierende Zielkonflikt zwischen zu erwartender Quote an unnötig ausgelösten Fehlwarnungen und Wirksamkeit einer Warnung ist allgemein als Warndilemma bekannt¹¹¹.

Im Rahmen des Kooperationsprojektes PROMETHEUS wurde ein warnender, maschineller Kopilot (WMK) zur Erkennung kritischer Situationen an STOP-Schildern entworfen¹¹². Abbildung 3.1 zeigt die Systemarchitektur des WMK.

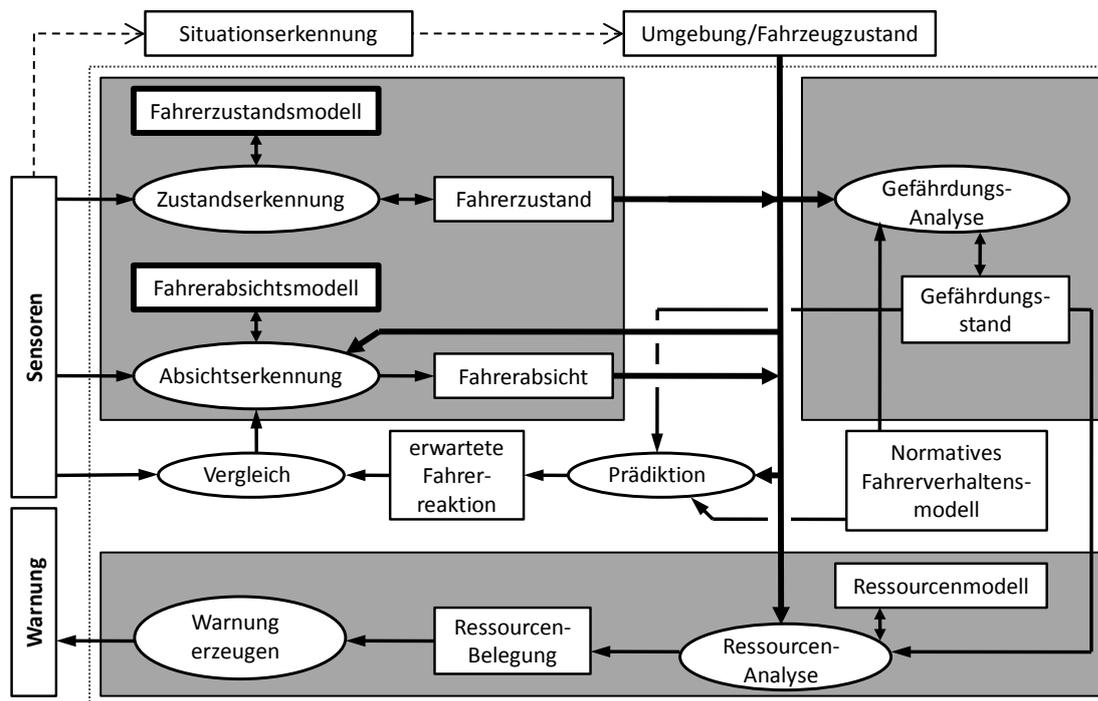


Abbildung 3.1: Systemarchitektur eines warnenden, maschinellen Kopiloten (WMK) nach GEISER & NIRSCHL¹¹³

Innerhalb des umrahmten Bereichs sind die benötigten Komponenten für Fahrermodellierung und Warnungserzeugung und deren Interaktionen dargestellt. Dünne Pfeile stel-

¹¹⁰ vgl. RÖSSLE ET AL. (1993): *Real-Time Vision-Based Intersection Detection For A Driver's Warning Assistant* S. 340-344.

¹¹¹ vgl. MEITINGER ET AL. (2004): *Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen* S. 145-158.

¹¹² vgl. GEISER; NIRSCHL (1994): *Realisierung und Bewertung eines warnenden maschinellen Kopiloten für die Unterstützung bei der Längsführung eines Kraftfahrzeugs* S. 367-380.

¹¹³ vgl. GEISER; NIRSCHL (1994): *Towards a System Architecture of Driver's Warning Assistant* S. 251-263 oder GEISER; NIRSCHL (1994): *Realisierung und Bewertung eines warnenden maschinellen Kopiloten für die Unterstützung bei der Längsführung eines Kraftfahrzeugs* S. 367-380

len den Informationsfluss zwischen einzelnen Komponenten dar, dicke Pfeile repräsentieren den zusammengefassten Informationsfluss betreffend Fahrer-, Fahrzeug- und Umgebungszustand. Das Fahrerzustandsmodell beinhaltet dabei fahrerindividuelle Eigenschaften und Zustände wie Bremsverhalten oder Reaktionszeit.

Das Fahrerabsichtsmodell beschreibt die möglichen Absichten des Fahrers, wobei jede Absicht durch ein aktives Ziel definiert ist. Eine Absicht gilt als erkannt, wenn Fahreraktionen zu der Erreichung dieses Ziels passen. Die Fahrerabsichtserkennung benötigt somit neben Aktionen und Zustand des Fahrers auch Informationen zu Fahrzeugzustand und Umgebung.

Das normative Fahrerverhaltensmodell enthält Wissen über das übliche/korrekte Verhalten des Fahrers in bestimmten Verkehrssituationen, bspw. beim Überqueren einer Kreuzung. Zusammen mit Fahrer-, Fahrzeug- und Umgebungszustand sowie Fahrerabsicht liefert es die Eingangsinformationen für die Fahrerverhaltensprädiktion.

Das Ressourcenmodell beschreibt die sensorischen, kognitiven und motorischen Ressourcen, die dem Fahrer für die Informationsverarbeitung zur Verfügung stehen. Zusammen mit den Informationen über die Zustände von Fahrer, Fahrzeug und Umgebung wird durch die Ressourcenanalyse die aktuelle Beanspruchung der verschiedenen Ressourcen ermittelt. Abhängig von dem resultierenden Gefährdungsstand wird die Warnungserzeugung aktiviert¹¹⁴.

Zur Prüfung der Realisierbarkeit von Kopilotenfunktionen und zur Bestimmung eines geeigneten Warnzeitpunktes verwenden GEISER & NIRSCHL¹¹⁵ die sogenannte Zeitbudgetanalyse. Diese vergleicht die verfügbare Zeit für eine Fahrerreaktion mit der mindestens benötigten Reaktionszeit. Dabei wird die Zeitdauer zwischen „normalem“ Zeitpunkt einer Fahrerreaktion (bspw. Bremsen vor einem STOP-Schild) und spätestmöglichem Warnzeitpunkt als Warnreserve bezeichnet. Wird die Warnreserve für eine bestimmte Situation negativ, so lassen sich kritische Situationen durch eine Warnung nur dann vermeiden, wenn die Warnung vor dem „normalen“ Zeitpunkt einer Fahrerreaktion ausgegeben wird. Da dies zu einer Störung des Fahrers führen kann, ist für den Fall einer negativen Warnreserve eine Fahrerabsichtserkennung auf Basis zusätzlicher Eingangsgrößen erforderlich. Ein prototypischer STOP-Schild-WMK verwendet hierzu, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, den Zustand des Bremspedals.

¹¹⁴ vgl. GEISER; NIRSCHL (1994): *Towards a System Architecture of Driver's Warning Assistant* S. 251-263

¹¹⁵ vgl. GEISER; NIRSCHL (1994): *Realisierung und Bewertung eines warnenden maschinellen Kopiloten für die Unterstützung bei der Längsführung eines Kraftfahrzeugs* S. 367-380

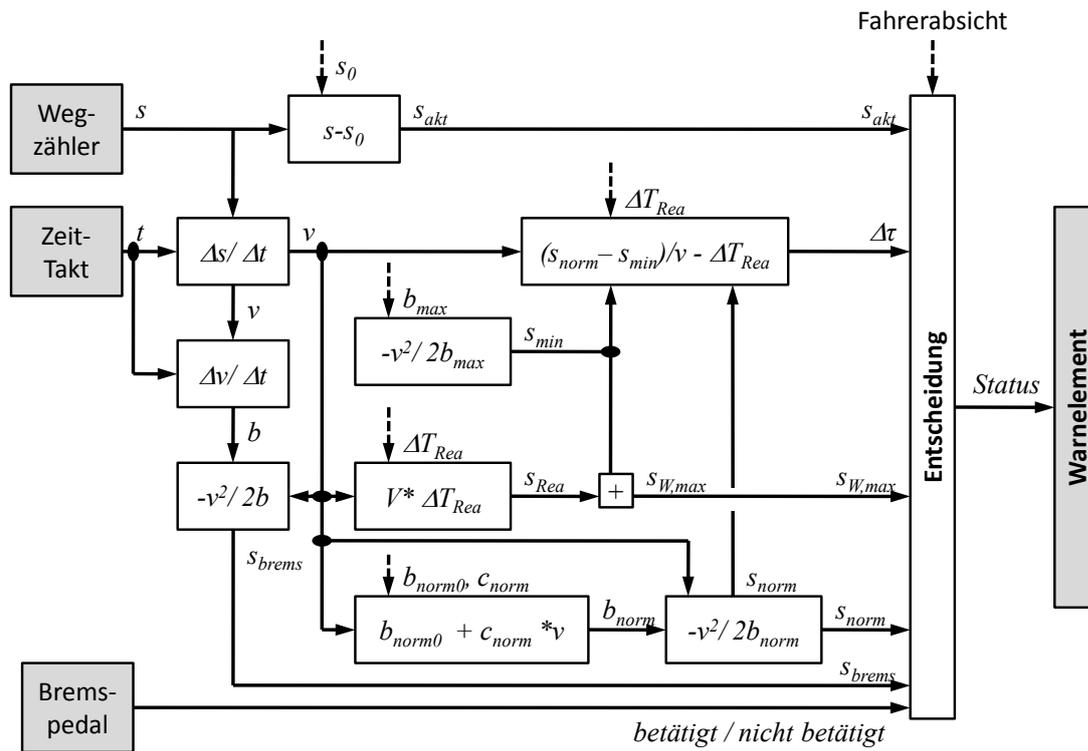


Abbildung 3.2: Datenflussdiagramm des WMK-Prototypen zur STOP-Schild-Assistenz nach GEISTER & NIRSCHL¹¹⁶

Die Überprüfung der Realisierbarkeit eines prototypischen WMK für STOP-Schild-Überfahrten in einem Versuchsszenario ergab, dass sich fahrerspezifisch große Unterschiede für die Warnreserve ergeben, diese jedoch nur in wenigen Fällen zu einer negativen Warnreserve führen¹¹⁷. Demnach erscheint ein maschineller Kopilot als geeignetes Mittel zur Vermeidung von STOP-Schild-Überfahrten.

Auch MEITINGER & EHMANN¹¹⁸ diskutieren die Beherrschbarkeit des Warndilemmas bei der Vermeidung von STOP-Schild-Überfahrten. Versuchsfahrten im Realverkehr zur Untersuchung der Annäherung an STOP-Schilder ergeben, dass sich erste Anzeichen für eine Reaktion des Fahrers auf das Haltegebot meist bereits deutlich vor dem letzt-

¹¹⁶ vgl. GEISER; NIRSCHL (1994): *Realisierung und Bewertung eines warnenden maschinellen Kopiloten für die Unterstützung bei der Längsführung eines Kraftfahrzeugs* S. 367-380

¹¹⁷ vgl. GEISER; NIRSCHL (1994): *Realisierung und Bewertung eines warnenden maschinellen Kopiloten für die Unterstützung bei der Längsführung eines Kraftfahrzeugs* S. 367-380

¹¹⁸ vgl. MEITINGER ET AL. (2004): *Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen* S. 145-158

möglichen Warnpunkt finden lassen. Auf Basis dieser Ergebnisse wird ein prototypischer STOP-Schild-Assistent im Fahrsimulator sowie im Realfahrzeug¹¹⁹ vorgestellt.

Lloyd et. al.¹²⁰ kommen im Rahmen einer Untersuchung der Betätigung von Bedienelementen während der Annäherung an zwölf STOP-Schild-geregelte Kreuzungen zu dem Ergebnis, dass die TTI bei Lösen des Fahrpedals sowie die TTI bei Bremsbeginn geeignete Kriterien zur frühzeitigen Erkennung der Fahrerabsicht darstellen. Demnach nimmt bspw. die TTI bei Bremsbeginn für weniger als 20% der Annäherungsfahrten Werte unter 4 s an. Eine Variation der Fahrmanöver ergab zudem, dass diese Fahrerreaktionen beim Kreuzen signifikant früher erfolgen, als beim Rechts- oder Linkseinbiegen.

Ein anderer Ansatz zur Vermeidung von STOP-Schild-Überfahrten ist das sogenannte Smart-STOP-Sign¹²¹, ein rein-infrastrukturbasiertes System. Durch Radarsensoren oder Induktionsschleifen wird lediglich erkannt, wenn sich Verkehrsteilnehmer mit unverhältnismäßig hoher Geschwindigkeit nähern und bei Bedarf werden Warnelemente im Verkehrsschild aktiviert. Ähnliche Ansätze existieren auch zur Vermeidung von Rot-Licht-Überfahrten an LSA-geregelten Kreuzungen¹²².

Für die Erkennung von Rotlicht-Überfahrten gelten zunächst ähnliche Anforderungen wie für einen STOP-Schild-Assistenten, da das Haltegebot während der roten LSA-Phase unabhängig von anderen Verkehrsteilnehmern Gültigkeit besitzt. Unterschiede ergeben sich daher insbesondere für den Phasenwechsel. Diese Phasenwechsel stehen zunehmend im Fokus spezifischer Komfortfunktionen, die den Fahrer bspw. im Voraus über einen bevorstehenden Phasenwechsel informieren. So kann dieser die Geschwindigkeit bereits frühzeitig reduzieren, wenn die Phase auf rot wechselt oder die Geschwindigkeit derart anpassen, dass die Kreuzung ohne Halt durchfahren werden kann, wenn die LSA auf grün wechselt¹²³. Für die Vermeidung von Rot-Licht-

¹¹⁹ auf Basis von GNSS und digitaler Karte, vgl. MEITINGER ET AL. (2004): *Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen* S. 145-158 oder EHMANN ET AL. (2005): *Connected-Drive: Advanced Assistance Systems for Intersection Safety*

¹²⁰ vgl. LLOYD ET AL. (1997): *Using Driver Primary Control Input to Determine the Timing of Alerts and Warnings* S. 63-67.

¹²¹ vgl. FRYE (2001): *International Cooperation to Prevent Collisions at Intersections* S. 41-46.

¹²² vgl. u.a. FRYE (2001): *International Cooperation to Prevent Collisions at Intersections* S. 41-46, PIEROWICZ ET AL. (2003): *Method and Apparatus for Determination and Warning of Potential Violation of Intersection Traffic Control Devices* oder BISHOP (2005): *Intelligent Vehicle Technology and Trends* S. 201.

¹²³ Entsprechende Ansätze wurden u.a. vorgestellt in RÖSSLER ET AL. (2005): *Comprehensive Approach for Increasing Intersection Safety by Risk Assessment HMI* und KOSCH; EHMANN (2006): *Entwicklung*

Überfahrten ist insbesondere der Phasenwechsel von grün nach rot und das Verhalten der Verkehrsteilnehmer in dieser Situation von Interesse¹²⁴. Entsprechend existiert eine Vielzahl von Untersuchungen zum Verhalten von Verkehrsteilnehmern an LSA¹²⁵.

Eine Untersuchung zum Fahrerverhalten bei der Annäherung an LSA-geregelte Kreuzungen beschreiben CHOVAN ET. AL.¹²⁶ bzw. TIJERINA ET. AL.¹²⁷. Zur Erkennung, dass der Fahrer nicht selbständig anhält, wird ein Vergleich zwischen der aktuell erforderlichen Verzögerung, um ein Überfahren der Ampel zu vermeiden, und der durchschnittlichen Verzögerung desselben Fahrers ab Bremsbeginn bei vergleichbaren Anhaltvorgängen vorgeschlagen. Dieses Merkmal wird von LEBLANC ET. AL. auch zur Situationsbewertung bei der Erkennung von Auffahrunfällen verwendet¹²⁸.

Aus der Beobachtung fremder Verkehrsteilnehmer bei der Annäherung an LSA-geregelte Kreuzungen mittels Lidar-Sensorik leiten BERNDT ET. AL.¹²⁹ Erkenntnisse zur Erkennbarkeit von Rotlicht-Überfahrten ab. Demnach ist das Warndilemma in dieser Situation für die Mehrheit der Fahrer beherrschbar. Zwar erfolgt die Reaktion auf eine rote LSA bei besonders sportlichen Fahrern erst nach dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt, jedoch gilt dies nur für einen sehr geringen Teil der Verkehrsteilnehmer¹³⁰. Ein weiteres Ergebnis ist, dass die meisten Verkehrsteilnehmer während der Annäherung die

von Kreuzungsassistenzsystemen und Funktionalitätserweiterungen durch den Einsatz von Kommunikationstechnologien.

¹²⁴ vgl. CHAN ET AL. (2004): *Threat Assessment of Traffic Moving Toward A Controlled Intersection* S. 931-936.

¹²⁵ vgl. u.a. LLOYD ET AL. (1999): *Brake Pulsing as Haptic Warning for an Intersection Collision Avoidance Countermeasure* S. 34-41, KATAOKA ET AL. (2005): *Analysis of driver's behavior at yellow signal in intersection*, SHEFFI; MAHMASSANI (1981): *A Model Of Driver Behavior At High Speed Signalized Intersections* S. 50-61, VAN DER HORST; WILMINK (1986): *Drivers' Decision-Making At Signalised Intersections: An Optimisation Of The Yellow Timing* S. 615-622.

¹²⁶ vgl. CHOVAN ET AL. (1994): *Examination of Intersection, Left Turn Across Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures* S. 19f.

¹²⁷ vgl. TIJERINA ET AL. (1994): *Examination of Signalized Intersection, Straight Crossing Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures*.

¹²⁸ vgl. LEBLANC ET AL. (2001): *Forward Collision Warning: Preliminary Requirements For Crash Alert Timing*

¹²⁹ vgl. BERNDT ET AL. (2007): *Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems*.

¹³⁰ nach BERNDT ET AL. (2007): *Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems* nähert sich bereits der 97% schnellste Fahrer deutlich langsamer der Kreuzung als der 100% schnellste Fahrer.

Linie des letztmöglichen Warnpunktes schneiden, eine Reaktion auf das Haltegebot ist jedoch schon vorher an der Verringerung der Fahrzeuggeschwindigkeit zu erkennen. Anhand dieser Ergebnisse wird auch die Beherrschbarkeit des Warndilemmas in VA-Situationen in Aussicht gestellt.

Den Einfluss des Phasenwechsels auf das Fahrerverhalten bei Annäherung an LSA-geregelte Kreuzungen untersuchten CHAN ET AL.¹³¹ mittels Radar-Sensoren. Wie bereits bei LLOYD ET AL.¹³² für STOP-Schild-Überfahrten werden TTI-Grenzwerte als geeignetes Merkmal zur Erkennung ausgewiesen, dass der Fahrer nicht mehr selbständig auf das Haltegebot reagieren wird. Eine Untersuchung der gewählten Verzögerung bei Phasenwechsel auf Rot ergab, dass sich nur bei ca. 20% der Fahrer Verzögerungen über $4,5 \text{ m/s}^2$ einstellen¹³³.

Wie bereits beschrieben existiert auch an Vorfahrt-Achten- (VA) oder Rechts-vor-Links (RvL)-geregelten Kreuzungen ein Haltepunkt, der jedoch nicht immer durch eine Haltelinie vorgegeben ist. Daher wird eine virtuelle Haltelinie eingeführt. Sie beschreibt den letztmöglichen Haltepunkt eines Fahrzeugs vor Eintritt in die Konfliktzone. Für einfache, rechteckige Kreuzungen entspricht die virtuelle Haltelinie der Verlängerung der dem eigenen Fahrzeug nächsten Fahrbahnbegrenzung des vorfahrtsberechtigten Querverkehrs (vgl. Abbildung 3.3).

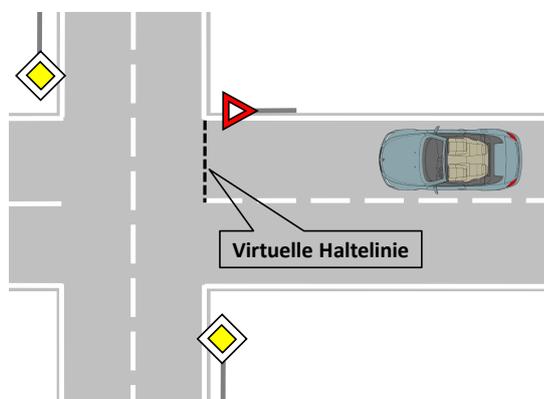


Abbildung 3.3: Virtuelle Haltelinie

Die Erkennung der Fahrerabsicht, ohne Halt in die Kreuzung einzufahren, ist auch für die Unterstützung des Fahrers an VA-geregelten Kreuzungen von großer Bedeutung, da nur die logische Kombination aus wahrscheinlicher Kollision mit dem Querverkehr und

¹³¹ vgl. CHAN ET AL. (2004): *Threat Assessment of Traffic Moving Toward A Controlled Intersection*

¹³² vgl. LLOYD ET AL. (1997): *Using Driver Primary Control Input to Determine the Timing of Alerts and Warnings*

¹³³ WORTMAN; MATTHIAS (1983): *Evaluation Of Driver Behavior At Signalized Intersections* S. 10-20.

ausbleibender Reaktion des Fahrers auf diese Verkehrssituation Systemeingriffe rechtfertigt.

Eine Verkehrsbeobachtung per Videoanalyse zum Vergleich des Fahrerverhaltens bei der Annäherung an zwei Kreuzungen (VA und RvL) beschreibt VAN DER HORST¹³⁴. Als Vergleichskriterium wird u.a. die Time-to-Intersection (TTI) bei Bremsbeginn verwendet¹³⁵. Diese weist keine signifikanten Unterschiede für unterschiedliche Manöver (Kreuzen, Links- oder Rechtseinbiegen) auf.

Als zusätzliches Kriterium wird die minimale TTI verwendet, wenn der Verlauf der TTI ein Minimum aufweist. Dieses entsteht, wenn der Fahrer während der Annäherung stark verzögert oder gar anhält, und die TTI aufgrund der deutlich verringerten Geschwindigkeit steigt. Existenz und Größe eines TTI-Minimums unterscheiden sich nach VAN DER HORST an der VA-Kreuzung nicht signifikant für unterschiedliche Manöver. Für RvL hat Rechtsabbiegen einen signifikant kleineren Anteil an Fahrten, die ein TTI-Minimum aufweisen, als andere Manöver. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Fahrer beim Rechtsabbiegen an RvL unabhängig von anderen Verkehrsteilnehmern keiner Wartepflicht unterliegt.

Neben diesen Vergleichen schlägt VAN DER HORST die Verwendung der TTI als Kriterium zur Erkennung eines ausbleibenden Fahrer-Haltewunsches vor, da die minimale TTI nur für 10% der selbständig anhaltenden Fahrer unter 1,5 s lag. Somit wäre die Erkennung von Überfahrten anhand eines einzelnen Kennwertes möglich.

Ein weiteres Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass die Mehrzahl der Fahrer den Bremsvorgang bei einer TTI von mindestens 3 s beginnt, während erste Kopfbewegungen zur Beobachtung von Querverkehr durchschnittlich erst bei einer TTI von 2,5 s festzustellen waren. Unter der Annahme, dass für Reaktion und Bremsbetätigung etwa 1 s vergeht, wird die Entscheidung zu bremsen bereits bei einer $TTI \geq 4$ s gefällt, also deutlich vor der ersten Beachtung des Fremdverkehrs.

3.3.2 Verhaltensprädiktion und Kollisionserkennung

Während Systeme zur Erkennung bevorstehender Kollisionen im Längsverkehr bereits in Serie verfügbar sind, besteht bei Bewertung der Gefahr von Kollisionen mit dem Querverkehr Bedarf für weitere Untersuchungen. Dies ist nicht nur auf die hohen Sensoranforderungen zur Erkennung querender Verkehrsteilnehmer zurückzuführen.

¹³⁴ vgl. VAN DER HORST (1991): *Video Analysis Of Road User Behaviour At Intersections* S. 93-109.

¹³⁵ Die TTI beschreibt die Zeitdauer bis zum Erreichen der Kreuzung unter Beibehaltung der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit. Sie ist wie folgt definiert: $TTI = d/v$. Als Bremsbeginn wird der Zeitpunkt gewählt, zu dem die aus den Videodaten berechnete Fahrzeugverzögerung 1m/s^2 überschreitet.

Auch das Abschätzen der Unfallgefahr gestaltet sich für Kreuzungssituationen mit Querverkehr schwieriger, da sich die potentiellen Unfallgegner in unterschiedliche Richtungen bewegen.

Ein Ansatz zur Erkennung von Kollisionen zwischen kreuzenden Fahrzeugen ist die Abstrahierung potentieller Kollisionspartner durch Rechtecke¹³⁶. Die Breite der Rechtecke entspricht der jeweiligen Fahrzeugbreite, während die Länge um mögliche Verzögerungen/Beschleunigungen des jeweiligen Fahrzeugs modifiziert wird. Diese Rechtecke bewegen sich von der jeweils aktuellen Position mit konstanter Geschwindigkeit in die Konfliktzone. Falls es dort zu einer Überlappung der Rechtecke kommt, ist eine Kollisionsgefahr gegeben. Zusätzlich kann der Grad der Überlappung als Maß für die Kollisionswahrscheinlichkeit herangezogen werden.

Als Indikator für die Wahrscheinlichkeit einer Kollision zwischen zwei kreuzenden Fahrzeugen verwenden MILLER & HUANG¹³⁷ für einen kommunikationsbasierten Kreuzungsassistenten die Differenz der Time-to-Cross (TTX). Der Betrag dieser Differenz entspricht dem zeitlichen Abstand, mit dem die Fahrzeuge den Schnittpunkt ihrer Trajektorien passieren.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Vorhersage möglicher Kollisionen ist eine Plan-Erkennung für alle beteiligten Verkehrsteilnehmer. DAGLI ET. AL.¹³⁸ stellen einen Ansatz der Fahrerverhaltensprädiktion für einen Spurwechselassistenten mit Hilfe einer Baumstruktur vor. Jedem Ast werden situationsabhängig Wahrscheinlichkeiten zugewiesen. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten aller Pfade, die eine Kollision zu Folge haben, entspricht der Kollisionswahrscheinlichkeit. Ähnlich arbeitet die Kollisionserkennung für autonome Fahrzeuge nach THORPE ET. AL.¹³⁹. Jeder möglichen Trajektorie in der Kreuzung werden Wahrscheinlichkeiten zugewiesen. Für die einzelnen Trajektorien ergeben sich wiederum Wahrscheinlichkeiten für eine Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern. Die Gesamt-Kollisionswahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Summe der Produkte von Trajektorienwahrscheinlichkeit und Kollisionswahrscheinlichkeit.

¹³⁶ vgl. BERNDT ET AL. (2007): *Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems*

¹³⁷ vgl. MILLER; HUANG (2002): *An Adaptive Peer-to-Peer Collision Warning System*. Einen ähnlichen Ansatz beschreibt das Patent JOCOY ET AL. (2003): *System and Method for Avoiding Accidents in Intersections*.

¹³⁸ vgl. DAGLI ET AL. (2002): *Action Recognition And Prediction For Driver Assistance Systems Using Dynamic Belief Networks* S. 179-194.

¹³⁹ vgl. THORPE ET AL. (2002): *Safe Robot Driving* S. 147-156

Eine häufige Unfallsituation im asiatischen Raum ist die Kollision zweier kreuzender Fahrzeuge mit hoher Geschwindigkeit an Kreuzungen ohne Sichtbehinderung, häufig als „Reisfeldszenario“ beschrieben. Die Fahrer nehmen den Kollisionspartner nicht wahr, da dieser sich immer im gleichen Sichtwinkel zum eigenen Fahrzeug befindet und somit keine Bewegung im eigenen Sehfeld erfährt¹⁴⁰. Ähnliche Unfälle ereignen sich u.a. auch in dünn besiedelten Gebieten in Australien¹⁴¹. Der Umstand der ausbleibenden Winkeländerung für die Kollision zweier kreuzender Fahrzeuge mit konstanter Geschwindigkeit lässt sich auch zur Erkennung von Kollisionen nutzen. YANG ET AL. verwenden C2C, um basierend auf diesem Sichtwinkel einen Kollisionsbewertungskoeffizienten zu berechnen¹⁴². Ändert sich der Kollisionsbewertungskoeffizient während der Kreuzungsannäherung, so werden beide Fahrzeuge die Kreuzung zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreichen.

Eine weitere Möglichkeit, Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern zu erkennen, ist die Darstellung der Situation mit Hilfe von 3D-Trajektorien. Dieser Ansatz findet in einem prototypischen Linksabbiegeassistenten Verwendung¹⁴³. In einem kreuzungsfesten Koordinatensystem wird neben zwei räumlichen Größen x und y als dritte Dimension die Zeit dargestellt, die ein Fahrzeug bis zum Erreichen des durch die zugehörigen x/y -Werte definierten Punktes benötigt. Somit ergeben sich für jedes beteiligte Fahrzeug dreidimensionale Wolken. Eine Kollision ist möglich, wenn ein Schnittbereich der Wolken zweier Fahrzeuge vorliegt.

Ebenfalls zur Kollisionserkennung beim Linksabbiegen vergleichen BRANZ & ÖCHSLE¹⁴⁴ die vorhandene Zeitlücke zum Gegenverkehr¹⁴⁵ mit der üblicherweise vom Fahrer akzeptierten und der zum Abbiegen erforderlichen Zeitlücke. Eingriffe erfolgen, wenn die vorhandene Zeitlücke kein Abbiegen zulässt oder die Größe üblicherweise akzeptierter Lücken deutlich unterschreitet.

¹⁴⁰ Im peripheren Sehfeld werden bewegte Objekte sehr viel besser wahrgenommen, vgl. u.a. UCHIDA ET AL. (1999): *Detection of vehicles on the other crossing path at an intersection: visual search performance of elderly drivers* S. 381-386 oder YANG ET AL. (2000): *Development of an Intersection Collision Warning System Using DGPS* S. 123-127.

¹⁴¹ vgl. TROUTBECK (1986): *Average Delay At An Unsignalized Intersection With Two Major Streams Each Having A Dichotomized Headway Distribution* S. 272-286.

¹⁴² Der Kollisionsbewertungskoeffizient entspricht dem Tangens des Sichtwinkels, vgl. YANG ET AL. (2000): *Development of an Intersection Collision Warning System Using DGPS* S. 123-127.

¹⁴³ vgl. MEITINGER ET AL. (2006): *Linksabbiegeassistentz*

¹⁴⁴ vgl. BRANZ; ÖCHSLE (2005): *Intersection Assistance: Collision Avoidance System for Turns Across Opposing Lanes of Traffic*

Um den Fahrer bei der Einschätzung vorfahrtsberechtigter Fahrzeuge zu unterstützen, schlagen TAMURA ET AL.¹⁴⁶ ein System zur Entscheidungshilfe vor. Dem Fahrer wird eine qualitative Information über die Gefahr der Situation übermittelt. Die Gefahrenanalyse erfolgt über eine nicht näher beschriebene Fuzzy Logic.

Eine Sonderstellung nimmt der von SAUERBREY¹⁴⁷ vorgestellte Rechtsabbiegeassistent für LKW ein. Adressiert werden durch Übersehen von Radfahrern oder Fußgängern beim Rechtsabbiegen verursachte Unfälle. Die Erkennung von Gefahrensituationen beschränkt sich hier auf die Detektion von Verkehrsteilnehmern im Gefahrenbereich rechts neben dem LKW mittels Laserscanner oder Short-Range-Radar.

3.4 HMI zur Kreuzungsassistentz

Für Assistenzansätze mit Systemkomponenten im Fahrzeug ergibt sich eine Vielzahl von Möglichkeiten bei der Gestaltung des HMI. Aktuelle Forschungsansätze unterscheiden sich hinsichtlich der gewählten Warn-/Eingriffsstrategie und der verwendeten Warnelemente.

Die Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung lassen sich in Information, Warnung und Eingriff unterteilen¹⁴⁸. ZAHN unterscheidet dementsprechend auch die Aufgaben informierender und warnender Kreuzungsassistenten: Außerhalb eindeutig kritischer Situationen übernimmt das Assistenzsystem keine Entscheidungen, es gibt lediglich Hinweise zur Allokierung der Aufmerksamkeit des Fahrers auf potentiell kritische Objekte. Bei Erkennung einer konkreten Gefahr warnt der elektronische Kopilot vor Bedingungen, denen der Fahrer offensichtlich keine Aufmerksamkeit geschenkt hat¹⁴⁹.

¹⁴⁵ Bestimmt über einen in Serie verfügbaren Radarsensor, bspw. für ACC.

¹⁴⁶ vgl. TAMURA ET AL. (2005): *Development Of Intersection Safety Support Systems Using Vehicle-To-Vehicle Communication*

¹⁴⁷ vgl. SAUERBREY (2004): *MAN Abbiegeassistent: Ein System zur Unfallvermeidung beim Rechtsabbiegen von Lkw*

¹⁴⁸ vgl. TIJERINA ET AL. (1994): *Examination of Signalized Intersection, Straight Crossing Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures* S. 20 oder BENMIMOUN ET AL. (2005): *Specification and Assessment of Different Intersection Assistance Concepts Based on IVC (Inter-Vehicle-Communication) and RVC (Roadside-Vehicle-Communication)*.

¹⁴⁹ vgl. ZAHN ET AL. (2004): *Hinweis – Warnung – Abgebremst! Neue Kreuzungs-Kopiloten – mehr aktive Sicherheit?* S. 769-788

Zur Information eignet sich bspw. das HUD¹⁵⁰. Vorschläge für geeignete Warnelemente umfassen neben visueller und akustischer Warnung¹⁵¹ auch Komponenten zur haptischen Rückmeldung, u.a. über ein aktives Fahrpedal¹⁵². Wird die erforderliche Kraft zur Pedalbetätigung erhöht, verringert sich während der Reaktionszeit des Fahrers die Fahrgeschwindigkeit, die für eine Fahrerreaktion zur Verfügung stehende Zeit nimmt zu¹⁵³.

Die direkte haptische Rückmeldung durch ein aktives Fahrpedal ist nur in Situationen möglich, in denen eine Betätigung des Fahrpedals vorliegt. Die folgenden Kapitel zeigen, dass diese Bedingung nur für einen Teil der typischen Unfallsituationen beim Einbiegen/Kreuzen erfüllt ist. Jedoch lässt sich der Effekt der zunehmenden verfügbaren Reaktionszeit durch eine autonome Teilverzögerung des Fahrzeugs auch unabhängig von einzelnen Bedienelementen nutzen¹⁵⁴. Lloyd et. al. schlagen in diesem Zusammenhang die Aktivierung autonomer, pulsierender Bremseingriffe vor, um durch orientierende Stimulation die Aufmerksamkeit des Fahrers nach vorne zu richten¹⁵⁵.

Zum Entschärfen von Gefahrensituationen, in denen keine Zeit für eine Fahrerreaktion zur Verfügung steht, wird der Einsatz eines Volleingriffs diskutiert. Mehrfach vorgeschlagen wird der Volleingriff im Stillstand zur Vermeidung des Eintritts in die

¹⁵⁰ Untersuchungen ergaben, dass Fahrer die Information via HUD einer Anzeige im Zentralsdisplay vorziehen, vgl. BENMIMOUN ET AL. (2006): *Analyse eines Kreuzungsassistenten in der Verkehrsfluss-simulation und im Fahrsimulator* S. 967-988. In Simulatorversuchen wurde zudem die Eignung des HUD zur Ampelassistenten unabhängig vom Fahrer-Alter nachgewiesen, vgl. CAIRD ET AL. (2005): *The Effect of In-Vehicle Advanced Signs on Older and Younger Drivers' Intersection Performance*.

¹⁵¹ Teils erfolgt sogar eine Unterteilung in Vorwarnung und Akutwarnung durch unterschiedlich intensive Warntöne, vgl. GEISER; NIRSCHL (1994): *Realisierung und Bewertung eines warnenden maschinellen Kopiloten für die Unterstützung bei der Längsführung eines Kraftfahrzeugs* S. 367-380.

¹⁵² Das aktive Fahrpedal wird auf dem US-Markt bereits in Serie eingesetzt, um den Fahrer über das Einsetzen der Antriebsschlupfregelung (ASR) zu informieren, vgl. LLOYD ET AL. (1999): *Brake Pulsing as Haptic Warning for an Intersection Collision Avoidance Countermeasure* S. 34-41. Die Nutzung dieses Warnelementes für Kreuzungsassistentensysteme wird bspw. vorgeschlagen in LLOYD ET AL. (1996): *Driver-Vehicle Interface (DVI) Design Issues Of An Intersection Collision Avoidance (ICA) System*.

¹⁵³ Vorgeschlagen zur Abstands- und Auffahrwarnung in MARETZKE; JACOB (1992): *Distance Warning and Control as a Means of Increasing Road Safety and Ease of Operation* S. 105-114.

¹⁵⁴ vorgeschlagen bspw. in TIJERINA ET AL. (1994): *Examination of Signalized Intersection, Straight Crossing Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures* S. 17ff.

¹⁵⁵ Vorgeschlagen wird die Verwendung mehrerer Bremsimpulse (-6 m/s², 100 ms, zeitlicher Abstand 100-200 ms), allerdings erfolgt keine Untersuchung der Fahrerreaktion oder -akzeptanz, vgl. LLOYD ET AL. (1999): *Brake Pulsing as Haptic Warning for an Intersection Collision Avoidance Countermeasure* S. 34-41.

Kreuzung¹⁵⁶. Erste Untersuchungen zeigen, dass der Fahrer diese Haltefunktion für einen Linksabbiege-Assistenten akzeptiert¹⁵⁷.

3.5 Verwandte Systeme im Fahrzeug

3.5.1 BAS-plus und PRE-SAFE-Bremse

Während Systeme zur Unterstützung des Fahrers auf der Stabilisierungsebene¹⁵⁸ bereits seit längerer Zeit in Serie verfügbar sind (bspw. ESP, ABS, etc), ergeben sich für Sicherheitssysteme auf Basis von Umfeldsensoren besondere Herausforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit bei der Erkennung von Gefahrensituationen. Eines der ersten Sicherheitssysteme, die bevorstehende Kollisionen auf Basis von Umfeldsensoren erkennen und den Fahrer durch eine Warnung auf diese Gefahr hinweisen, ist der sogenannte Bremsassistent-plus (BAS-plus). Dieses System zur Vermeidung von Auffahrunfällen auf Bundesautobahnen und gut ausgebauten Landstraßen verwendet Radarsensoren zur Erkennung potentieller Kollisionen. Liegt eine kritische Situation vor, so wird der Fahrer durch eine optische Warnung darauf hingewiesen. Zusätzlich werden Maßnahmen eingeleitet, damit bei Reaktion des Fahrers sofort die volle Bremswirkung zur Verfügung steht. Die Bremskraftunterstützung wird dabei so gewählt, dass sie einer Zielbremsung¹⁵⁹ entspricht. Dieser Eingriff setzt neben der erkannten Gefahr einen eindeutigen Bremswunsch des Fahrers voraus¹⁶⁰.

Falls der Fahrer auf die Warnung des BAS-plus nicht reagiert, erfolgt eine automatische Teilbremsung mit maximal -4 m/s^2 und eine optische/akustische Warnung. Bei Betätigung des Bremspedals steht dem Fahrer sofort die volle Bremsleistung zur Verfügung.

¹⁵⁶ Steht ein Fahrzeug direkt vor der Konfliktzone, so ist der Eintritt in diese durch eine Warnung nicht mehr zu verhindern, nachdem das Fahrzeug anfährt. Daher wird dieses Anfahren unterbunden, vgl. bspw. BRANZ; ÖCHSLE (2005): *Intersection Assistance: Collision Avoidance System for Turns Across Opposing Lanes of Traffic* oder MEITINGER ET AL. (2006): *Linksabbiegeassistentz*.

¹⁵⁷ vgl. BRANZ; ÖCHSLE (2005): *Intersection Assistance: Collision Avoidance System for Turns Across Opposing Lanes of Traffic*.

¹⁵⁸ vgl. bspw. DONGES (1993): *Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem* S. 241-280.

¹⁵⁹ vgl. RATH; KNECHTGES (1995): *Effective Active Safety to reduce Road Accidents*.

¹⁶⁰ vgl. SCHMID (2006): *Voraus schauen - voraus fahren: Die neuen Assistenzsysteme Bremsassistent BAS PLUS und PRE-SAFE(r) Bremse von Daimler Chrysler* oder MÜCKE; BREUER (2007): *Bewertung von Sicherheitssystemen in Fahrversuchen* S. 124f.

Reagiert der Fahrer nicht, wird durch die autonome Teilbremsung zumindest die Unfallschwere reduziert.

Die genannten Funktionen BAS-plus und PRE-SAFE-Bremse adressieren Auffahrunfälle im Längsverkehr. Eine dem BAS-plus ähnliche Funktion zur Vermeidung von STOP-Schild-Überfahrten ist seit Frühjahr 2008 auf dem japanischen Markt verfügbar. Der sogenannte „Brake Assist with Navigation Link“ weist den Fahrer bei der Annäherung an STOP-Schild-geregelte Kreuzungen mehrstufig auf die vorliegende Verkehrssituation hin. Erfolgt als Reaktion auf diese Warnung eine Bremsbetätigung durch den Fahrer, wird das Bremsmoment angepasst und eine Zielbremsung eingeleitet¹⁶¹.

3.5.2 Automatische Notbremse (ANB)

Der konventionelle Bremsassistent ist auf eine Reaktion des Fahrers angewiesen, da ein Eingriff von der Betätigungsgeschwindigkeit des Bremspedals abhängig ist. Zwar weisen Erweiterungen der BAS-plus den Fahrer durch eine Warnung auf die Gefahrensituation hin, dennoch ist weiterhin eine Reaktion des Fahrers erforderlich. Im Gegensatz dazu kann eine automatische Notbremsung (ANB) kritische Situationen erkennen und selbständig reagieren. Dies erfolgt jedoch nur, wenn der Fahrer keine Möglichkeit mehr hat, den Unfall zu vermeiden. Da die Unfallvermeidung bei höheren Geschwindigkeiten in vielen Fällen durch eine Bremsung nicht mehr abgewendet werden kann, während sie durch Lenken noch möglich ist, wird auch eine ANB nur einen Teil der Kollisionen vermeiden können. Allerdings lässt sich für die übrigen Fälle die Unfallschwere teils deutlich vermindern. Daher wird die ANB häufig als „elektronische Knautschzone“ bezeichnet¹⁶².

Als erstes auf dem europäischen Markt verfügbares System löst das sogenannte „City Safety System“ bei Geschwindigkeiten unterhalb von 30 km/h selbständig eine Notbremsung mit etwa -5 m/s^2 aus, wenn eine Kollision nur noch durch eine Bremsung vermeidbar ist. Bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 15 km/h lassen sich durch diesen Eingriff Kollisionen vollständig vermeiden¹⁶³.

¹⁶¹ vgl. N.N. (2008): *Pressemitteilung - Toyota Advances Brake Assist with Navigation Link*.

¹⁶² vgl. KOPISCHKE (2000): *Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden* S. 57ff. oder MÜCKE; BREUER (2007): *Bewertung von Sicherheitssystemen in Fahrversuchen* S. 119-129.

¹⁶³ vgl. N.N. (2008): *Collision Avoidance* S. 5 oder N.N. (2008): *Bits und Bytes retten Menschenleben - Notbremsassistenten im Test*.

3.6 Fazit und Untersuchungsbedarf

Kreuzungsassistenten ist derzeit ein wesentliches Thema im Bereich der aktiven Sicherheit. Wie dargestellt liegt der Forschungsschwerpunkt laufender Projekte zur Assistenz beim Einbiegen bzw. Kreuzen größtenteils auf den technologischen Voraussetzungen zur Erkennung und Berücksichtigung des Querverkehrs¹⁶⁴.

Untersuchungen des Fahrerverhaltens zur Identifikation von Kriterien, die eine Unterscheidung der Fahrerabsichten „Anhalten“ oder „Nicht-Anhalten“ erlauben, erfolgen meist mit dem Ziel der Vermeidung von STOP-Schild- oder Rotlichtüberfahrten. Sie beschränken sich daher fast ausschließlich auf die Annäherung an STOP-Schilder oder LSA¹⁶⁵. Die identifizierten Kriterien umfassen TTI-Werte, erforderliche Verzögerungen oder Hüllkurven der Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Kreuzung, die bei Anhaltevorgängen üblicherweise nicht unter- bzw. überschritten werden. Sie erlauben eine Erkennung, ob der Fahrer auf das Haltegebot reagiert. Inwieweit sich diese Kriterien auf das Verhalten in VA-Situationen übertragen lassen, in denen das Haltegebot von der Anwesenheit vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer abhängt, ist noch offen.

Die Kollisionserkennung und Gefahrenbewertung der vorgestellten Ansätze basiert auf unterschiedlichen Abstrahierungen der Verkehrssituation und einer Prädiktion künftiger Fahrzustandsgrößen für die Kollisionspartner. Nur ein kleiner Teil der Systeme berücksichtigt in der Berechnung evtl. Ungenauigkeiten dieser Prognosen, vielfach wird lediglich von konstanten Geschwindigkeits- oder Beschleunigungswerten ausgegangen. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass der Forschungsschwerpunkt meist auf der Erkennbarkeit fremder Verkehrsteilnehmer durch eine ausgewählte Sensor- oder Kommunikationslösung liegt. Entsprechend sind die tatsächlich erreichbaren Genauigkeiten der

¹⁶⁴ vgl. u.a. BENMIMOUN ET AL. (2005): *Specification and Assessment of Different Intersection Assistance Concepts Based on IVC (Inter-Vehicle-Communication) and RVC (Roadside-Vehicle-Communication)*, FRANKE ET AL. (2004): *Kamerabasierte Kreuzungsassistenten - Camera-Based Intersection Assistance*, TAMURA ET AL. (2005): *Development Of Intersection Safety Support Systems Using Vehicle-To-Vehicle Communication*, KLANNER ET AL. (2006): *ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenten* S. 989-1012

¹⁶⁵ Als Ausnahme ist eine Untersuchung des Annäherungsvorgangs an VA-geregelte und unbeschilderte Kreuzungen zu nennen, vgl. VAN DER HORST (1991): *Video Analysis Of Road User Behaviour At Intersections* S. 93-109.

Fahrerverhaltensprädiktion, die wiederum direkt die Genauigkeit der Kollisionserkennung beeinflussen, unbekannt¹⁶⁶.

Hinsichtlich einer geeigneten Warn- und Eingriffsstrategie wurden verschiedenste Maßnahmen, von der Information des Fahrers über Warnung¹⁶⁷ bzw. Teileingriff bis zu einem autonomen Volleingriff, für die Kreuzungsassistenz vorgeschlagen und teilweise prototypisch umgesetzt. Welches Potential die einzelnen Maßnahmen zur Vermeidung der unterschiedlichen Unfallszenarien beim Einbiegen oder Kreuzen bieten¹⁶⁸, ist für Kollisionen an VA nicht bekannt.

¹⁶⁶ Dem Autor ist keine Untersuchung von Auswirkungen der Streuung des Fahrerverhaltens auf die mögliche Genauigkeit von Algorithmen zur Gefahrenerkennung bekannt.

¹⁶⁷ Unterschiede der ausgewählten Warnemente seien an dieser Stelle unberücksichtigt.

¹⁶⁸ vgl. Kapitel 2.3 und 2.4.

4 Fahrerverhalten an Kreuzungen

Das übliche Fahrerverhalten an Kreuzungen gibt Aufschluss über Möglichkeiten und Probleme bei der Einbiege-/Kreuzenassistentz. Dies gilt insbesondere für die Identifikation von Warnkriterien und die Auswahl geeigneter Warnstrategien unter der Prämisse, störende Systemeingriffe auf ein Minimum zu beschränken¹⁶⁹. Anforderungen an geeignete Assistenzmaßnahmen ergeben sich aus einer Analyse des Fahrerhaltens für Verkehrssituationen, die den ausgewählten Unfallschwerpunkten entsprechen.

4.1 Methode und Untersuchungswerkzeuge

4.1.1 Vorhandene Messdaten zum Fahrerverhalten

Als Grundlage zur Fahrerhaltensanalyse wird auf die aufgezeichneten Messdaten einer im Rahmen des INVENT-Projektes durchgeführten Studie zum Verhalten von Fahrern in unterschiedlichen Verkehrssituationen im Kreuzungsbereich zurückgegriffen¹⁷⁰. Diese Studie umfasst Versuche mit 31 Probanden an 33 verschiedenen Kreuzungen. Auf Basis einer eigenen Auswertung der aufgezeichneten Daten ergeben sich grundlegende Informationen zu geeigneten Warnstrategien sowie zu Möglichkeiten der Erkennung potentieller Gefahrensituationen. Allerdings unterliegen die aufgezeichneten Messdaten Einschränkungen hinsichtlich Informationsverfügbarkeit und Genauigkeit¹⁷¹. Daher werden zur Absicherung der Ergebnisse und zur detaillierteren Untersuchung des Fahrerhaltens zusätzliche Versuche durchgeführt.

4.1.2 Anforderungen an die Untersuchung

Die durchzuführende Untersuchung hat neben grundsätzlichen Ansprüchen an die Übertragbarkeit der Ergebnisse auch spezifischen Anforderungen zu genügen, die sich aus den Zielen der Untersuchung ableiten lassen. Die Identifikation von Warnkriterien und die Untersuchung der Prädizierbarkeit des Fahrerhaltens stellen in diesem

¹⁶⁹ vgl. Kapitel 1.3 bzw. Kapitel 2.

¹⁷⁰ vgl. VOLLRATH ET AL. (2004): *INVENT Kreuzungsverhalten – Endbericht*.

¹⁷¹ Details zu den Messdaten finden sich in Kapitel 9.1 im Anhang.

Zusammenhang hohe Genauigkeitsanforderungen an die Fahrzeuggeschwindigkeit und den Abstand zur Kreuzung¹⁷².

Um den Einfluss einzelner Kreuzungsparameter zu isolieren, sind alle übrigen Parameter für einen direkten Vergleich konstant zu halten. Für die Versuche sind daher Kreuzungen auszuwählen, die sich nach Möglichkeit nur hinsichtlich des zu untersuchenden Einflussfaktors voneinander unterscheiden. Alle übrigen Randbedingungen sind weitestgehend konstant zu halten, um vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten.

Grundsätzliche Voraussetzungen für die Übertragbarkeit sind ein repräsentatives Probandenkollektiv und die Auswahl repräsentativer Versuchsszenarien. Zudem sind die Auswirkungen der Versuchsbedingungen auf das Fahrerverhalten zu minimieren. Diese Auswirkungen sind für Verkehrsbeobachtungen am geringsten, der Realitätsgrad sinkt bereits bei Untersuchungen in einem Versuchsfahrzeug¹⁷³. Außerdem erlaubt die Verkehrsbeobachtung die Untersuchung einer hohen Probandenzahl mit vertretbarem Aufwand.

Nachteilig gegenüber einer Probandenstudie in einem Versuchsträger ist hingegen, dass die Zusammensetzung des Probandenkollektivs nur mit zusätzlichem Aufwand erfasst oder beeinflusst werden kann. Sozioökonomische Faktoren, die einen Einfluss auf das Fahrerverhalten haben¹⁷⁴, lassen sich weder bestimmen noch beeinflussen. Zudem stehen Informationen über Fahrerreaktionen nicht direkt an den Bedienelementen zur Verfügung und müssen über Fahrzustandsänderungen approximiert werden¹⁷⁵.

Um die Vorteile beider Versuchsmethoden zu vereinen, umfasst die durchgeführte Fahrerverhaltensuntersuchung einerseits Probandenversuche mit einem mit Messtechnik ausgerüsteten Versuchsträger und andererseits eine Verkehrsbeobachtung im Kreuzungsbereich mit speziellen Radar-Messstationen. Der Vorteil dieser zweigeteilten Versuchsmethodik liegt in der Kombination aus hoher Datentiefe der Versuchsfahrten mit der großen Anzahl auswertbarer Kreuzungsdurchfahrten anhand der Verkehrsbeobachtung.

¹⁷² Die Berechnung der erforderlichen Verzögerung a_{nec} ist bei geringem Abstand zu Kreuzung aufgrund der Singularität für $d = 0$ anfällig auf Abstandsungenauigkeiten. Dies gilt analog für die Berechnung der TTI im Bereich geringer Geschwindigkeiten wegen der Polstelle für $v = 0$.

¹⁷³ vgl. KÄPPLER; BERNOTOT (1985): *Das Wirksystem Fahrer - Fahrzeug - Umwelt* S. 28.

¹⁷⁴ bspw. hat der Fahrtzweck einen Einfluss auf die Größe akzeptierter Lücken im Querverkehr, vgl. KAYSI; ALAM (2000): *Driver Behavior And Traffic Stream Interactions At Unsignalized Intersections* S. 498-505.

¹⁷⁵ Dies trifft u.a. auf den Beginn des Bremsvorgangs zu (bspw. zur Bestimmung der TTI_{Brems} , vgl. Kapitel 3.3.1).

4.1.3 Fahrversuche mit Probanden

Als Versuchswerkzeug dient ein Fahrzeug der Mercedes-Benz S-Klasse (W220) des Fachgebiets Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt. Die eingesetzte Messtechnik besteht aus einem optischen Geschwindigkeitssensor (Datron Correvit S400) und einer faserkreiselsbasierten Inertialplattform (ADMA19). Die Inertialplattform wird zusätzlich über GPS-Daten und die Geschwindigkeitsinformationen des Correvit-Sensors gestützt. Sie stellt aktuelle Zustandsgrößen wie Beschleunigungen, Drehraten und Position des Fahrzeugs zur Verfügung. Mittels im Fahrzeug vorhandener Seriensensoren erfolgt eine Plausibilisierung einzelner Messgrößen, um Fehlfunktionen der Messtechnik auszuschließen. Informationen über die Betätigung einzelner Bedienelemente, bspw. des Bremspedals, liefert ebenfalls der CAN-Bus des Fahrzeugs.

Um die Genauigkeit der Positionsbestimmung des Fahrzeugs für zu untersuchende Kreuzungen zu verbessern, sind zudem zwei Lichtschranken (Sick WL 24) am Fahrzeugheck montiert. Diese Lichtschranken senden polarisiertes Licht im Infrarotbereich aus und reagieren nur auf orthogonal polarisierte Reflektionen. An den zu untersuchenden Kreuzungen werden jeweils Reflektoren eingesetzt, die diese Umpolarisation übernehmen. Fehldetektionen durch spiegelnde Oberflächen werden somit minimiert. Abbildung 4.1 stellt die Anordnung von Lichtschranken und Reflektor dar.

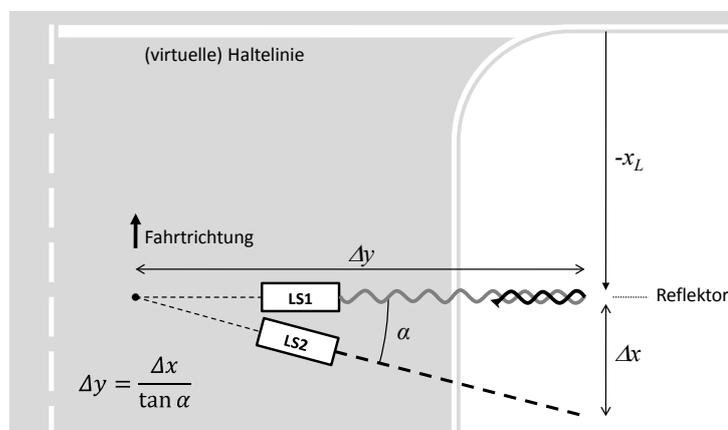


Abbildung 4.1: Geometrische Anordnung der Lichtschranken

Der Abstand des Fahrzeugs zur Kreuzung ergibt sich durch die Detektion des Reflektors über die orthogonal zur Fahrzeuglängsachse ausgerichtete Lichtschranke (LS₁). Die zweite Lichtschranke (LS₂) ist gegenüber LS₁ um den Winkel α nach hinten verdreht. Somit ergibt sich der seitliche Versatz des Fahrzeugs in Abhängigkeit von der Wegstrecke, die das Fahrzeug zwischen den Detektionen des Reflektors mit LS₁ und LS₂ zurückgelegt hat¹⁷⁶. Der seitliche Versatz ermöglicht bspw. die Erkennung von Fahr-

¹⁷⁶ Die in Abbildung 4.1 dargestellte, trigonometrische Beziehung stellt eine Vereinfachung des Zusammenhangs dar und hat nur Gültigkeit, wenn zwischen den Detektionspunkten der Lichtschranken

streifenwechselfvorgängen während der Kreuzungsannäherung¹⁷⁷. Somit ergibt sich die Position des Fahrzeugs in einem kreuzungsfesten Koordinatensystem. Die Kreuzungszuordnung erfolgt über die globalen Positionsdaten der Inertialplattform. Abbildung 4.2 fasst die Signalverarbeitung zusammen.

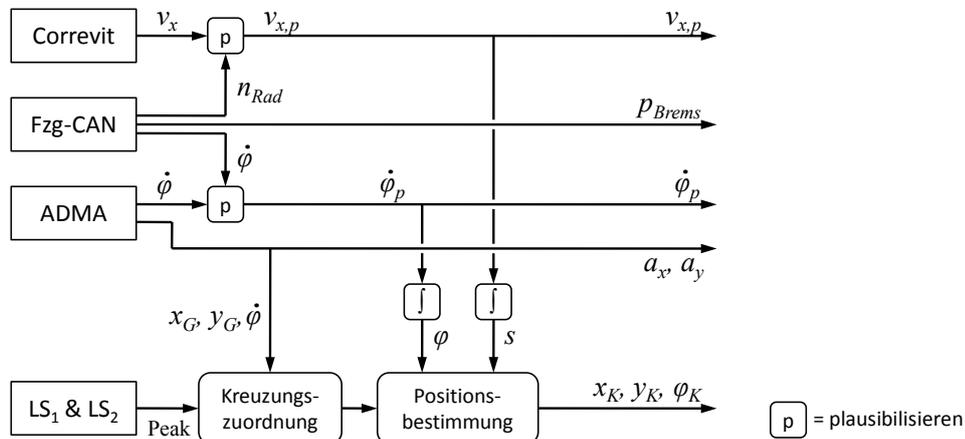


Abbildung 4.2: Datenfluss der aufgezeichneten Messdaten

Das Probandenkollektiv der Fahrversuche umfasst 50 Personen im Alter zwischen 20 und 67 Jahren (Altersdurchschnitt: 37 Jahre), darunter 38 männliche und 22 weibliche Fahrer. Eine erste Versuchsreihe wurde im Zeitraum vom 02. bis 13.11.2007 durchgeführt und beinhaltete 30 Versuchsfahrten, die zweite Versuchsreihe von 20 Fahrten erfolgte in der Zeit vom 18. bis 25.01.2008. Bei Fahrtantritt wurden die Probanden lediglich über den Versuchsablauf, nicht jedoch über das Untersuchungsziel informiert, um reaktive Messeffekte zu minimieren¹⁷⁸.

Die Versuchsdurchführung erfolgte zwischen 08.45 Uhr und 21.00 Uhr, wobei teils erhebliche Unterschiede in der Verkehrsdichte zu beobachten waren. Beide Versuchsreihen umfassen Fahrten bei Trockenheit und bei Niederschlag, nicht jedoch bei Straßenglätte. Somit wird ein breites Band typischer Verkehrssituationen im Stadtverkehr abgedeckt.

keine Richtungsänderung des Fahrzeugs vorliegt. Die Datenauswertung verwendet die in Kapitel 9.2.1 im Anhang hergeleitete, universell gültige Beziehung.

¹⁷⁷ Annäherungsfahrten, die durch Fahrstreifenwechselfvorgänge während der Annäherung (bspw. durch Überholen eines parkenden Fahrzeugs) beeinflusst werden, sind in der Auswertung nicht oder gesondert zu betrachten.

¹⁷⁸ vgl. SARRIS; REIB (2005): *Kurzer Leitfaden der Experimentalpsychologie* S.108.

Aufgrund von Verkehrsumleitungen¹⁷⁹ und sporadisch ausbleibenden Lichtschranken-dektionen, bspw. wegen eines durch Passanten oder parkende Fahrzeuge verdeckten Reflektors¹⁸⁰, reduziert sich die Anzahl der auswertbaren Kreuzungsdurchfahrten auf durchschnittlich etwa 28 Messungen je Kreuzung.

4.1.4 Verkehrsbeobachtung

Zur Untersuchung des Fahrerverhaltens während der Annäherung an die Kreuzung wurden zwei mobile Radarmessstationen aufgebaut. Mit Hilfe jeweils eines Radarsensors erlauben sie die Messung von Abstand und Geschwindigkeit für sich nähernde Verkehrsteilnehmer¹⁸¹. Bei idealer Positionierung und Ausrichtung ist mit zwei Messstationen die Verkehrsbeobachtung für vier in Kreuzungsrichtung weisende Segmente möglich.

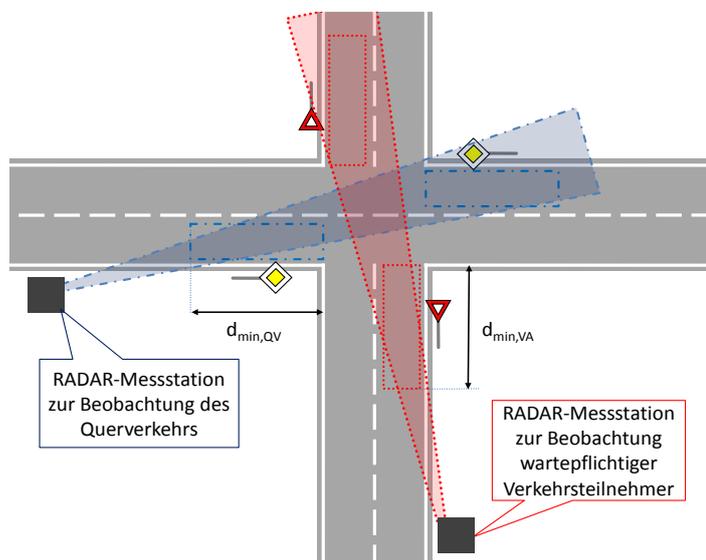


Abbildung 4.3 : Die Messbereiche der Verkehrsbeobachtungsstationen

¹⁷⁹ Während der Versuchsdurchführung wurden an zwei ausgewählten Kreuzungen für jeweils zwei Versuchstage Bauarbeiten durchgeführt. An den betroffenen Versuchstagen wurde die entsprechende Kreuzung umfahren.

¹⁸⁰ Bei der Anbringung der Reflektoren wurden Halteverbotszonen bevorzugt, um die Verdeckung des Reflektors durch parkende Fahrzeuge zu minimieren. Vereinzelt wurde vom Versuchsleiter dennoch eine Verdeckung durch widerrechtlich abgestellte Fahrzeuge beobachtet.

¹⁸¹ Die Messstationen arbeiten mit jeweils einem Long-Range Radarsensor der zweiten Generation der Firma Bosch.

Wie in Abbildung 4.3 illustriert, deckt der Erfassungsbereich einer Station das Fahrstreifen-segment in Ausrichtungsrichtung und das des gegenüberliegenden Astes ab¹⁸². Die Länge der Segmente, innerhalb derer eine Beobachtung von Verkehrsteilnehmern möglich ist, wird durch den Abstand der Messstationen zur Kreuzung beeinflusst¹⁸³. Allerdings steigt bei großen Abständen die Gefahr der Sichtverdeckung des Sensors durch weitere, nachfolgende Verkehrsteilnehmer. Zudem sind bei der Wahl des Abstands kreuzungsspezifische Faktoren wie parkende Fahrzeuge zu berücksichtigen¹⁸⁴. In der Praxis haben sich Abstände zwischen 30 und 50 m bewährt.

Die Stationen sind in Restmülltonnen eingebaut, um im Verkehrsbild nicht störend aufzufallen und nicht mit Einrichtungen zur Verkehrskontrolle verwechselt zu werden. Somit erfolgen die Messungen unbemerkt vom Fahrer und Rückwirkungen der Verkehrsbeobachtung auf das Fahrerverhalten werden minimiert. Die Tonnen bilden das Gehäuse für die Messtechnik und schützen sie vor äußeren Einflüssen.

Die Datenaufzeichnung erfolgt in beiden Messstationen unabhängig voneinander. Um die Interaktion der Verkehrsteilnehmer untereinander analysieren zu können, werden die Stationen vor Messbeginn synchronisiert. Im Anschluss an die Messung werden die Objektdaten beider Stationen auf eine gemeinsame Zeitbasis bezogen und in ein kreuzungsfestes Koordinatensystem überführt¹⁸⁵.

Die Verkehrsbeobachtung dient der Absicherung gewonnener Erkenntnisse aus den Probandenversuchen für ein breites Probandenkollektiv. Die Genauigkeitsanforderungen an die Messstationen sind daher geringer als für die Probandenversuche. Statische Messungen zur Abstandsgenauigkeit ergeben für beide Stationen eine durchschnittliche Abstandsabweichung von 0,27 m (Standardabweichung 0,28 m). Der maximale beobachtete Messfehler in statischen Versuchen lag bei 1,0 m.

¹⁸² Detaillierte Betrachtungen zur Ausrichtung der Messstationen finden sich in HEINZ ET AL. (2007): *Entwicklung einer mobilen Radarmessstation* S. 24f.

¹⁸³ Dies gilt insbesondere für das Segment in Ausrichtungsrichtung, bei geringen Abständen aufgrund des größeren Ausrichtungswinkels jedoch auch für das gegenüberliegende Segment.

¹⁸⁴ Große Abstände führen zu kleinen Ausrichtungswinkeln. Um bspw. einer Sichtverdeckung durch parkende Fahrzeuge entgegenzuwirken, kann bei großen Abständen die Positionierung der Messstation auf der Fahrbahn erforderlich sein. Um eine Behinderung des Verkehrs und eine Beeinflussung des Fahrerverhaltens auszuschließen, werden die Abstände so gewählt, dass eine Positionierung der Messstationen außerhalb der Fahrbahn, bspw. auf dem Bürgersteig, möglich ist.

¹⁸⁵ Die Routinen zur Synchronisation und Koordinatentransformation beschreibt Kapitel 9.3.2 im Anhang.

Bei Fahrzeugen, die sich der Kreuzung in Ausrichtungsrichtung einer Messstation nähern, erfasst der Radarsensor üblicherweise das Fahrzeugheck. Um den Eintritt der Fahrzeugfront in die Kreuzung zu bestimmen, wird in Vorversuchen die durchschnittliche Fahrzeuglänge erfasst. Hierzu werden beide Messstationen gegenseitig auf dasselbe Fahrstreifensegment eines Nebenastes mit STOP ausgerichtet¹⁸⁶. Bei bekanntem Abstand der Messstationen zueinander ergibt sich aus der Differenz der Objektabstände die jeweilige Fahrzeuglänge. Objekte mit einer Ursprungsgeschwindigkeit kleiner 25 km/h werden in den Betrachtungen (ebenso wie in späteren Auswertungen) nicht berücksichtigt, um eine Verfälschung der Daten bspw. durch Fahrradfahrer oder Fußgänger zu vermeiden. Es ergibt sich eine durchschnittliche Fahrzeuglänge von 4,26 m (Standardabweichung 0,73 m, vergleiche Abbildung 4.4).

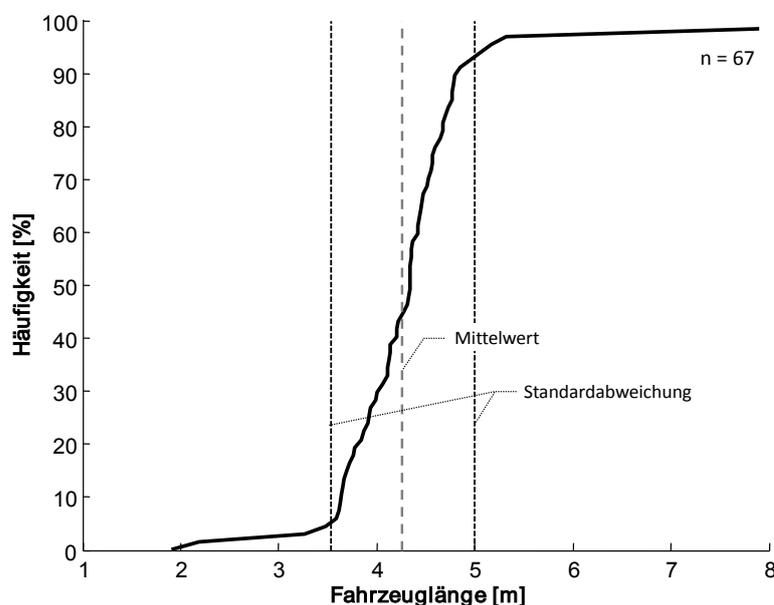


Abbildung 4.4: Verteilung der in Vorversuchen bestimmten Fahrzeuglänge

Da der Einfluss der Abstandsungenauigkeit auf verwendete Kennwerte für kleine Abstände zunimmt¹⁸⁷, wird für Objekte auf dem gleichsinnig ausgerichteten Fahrstreifensegment des Nebenastes nur der Beginn der Annäherungsphase betrachtet, um bei geringen Abständen zusätzliche Ungenauigkeiten durch die unbekannte Fahrzeuglänge zu

¹⁸⁶ Die Wahl fiel auf einen stets wartepflichtigen Nebenast, um den Einfluss evtl. Ungenauigkeiten der zeitlichen Synchronisation zu minimieren. Dieser Einfluss ist proportional zur Fahrzeuggeschwindigkeit und geht somit nahe dem Fahrzeugstillstand gegen null. Entsprechend erfolgte die Berechnung der Fahrzeuglänge zum Zeitpunkt des Geschwindigkeitsminimums bzw. Fahrzeugstillstands.

¹⁸⁷ Der Kennwert a_{nec} weist eine Singularität für $d = 0$ auf ($a_{nec} = -v^2/2d$) und reagiert daher im Bereich geringer Abstände empfindlich auf Abstandsabweichungen.

vermeiden. Dies führt zu einer verringerten Datenbasis für die Auswertung des Fahrerhaltens bei geringen Kreuzungsabständen.

Zusätzlich wird die Genauigkeit der Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Objekt-Abstand in dynamischen Versuchen ermittelt. Als Referenz dient ein Versuchsträger mit optischer Geschwindigkeitsmessung¹⁸⁸, dessen Position relativ zu den Messstationen über Lichtschrankenbaken definiert wird. Im Rahmen dieser Versuche wurden Fahrten mit konstanter Fahrgeschwindigkeit (Nachbildung von vorfahrtsberechtigtem Verkehr) und Anhaltvorgänge (Simulation wartepflichtiger Verkehrsteilnehmer) durchgeführt. Die durchschnittliche Geschwindigkeitsabweichung lag über alle Versuche bei 0,5 km/h (Standardabweichung 0,3 km/h). Alle beobachteten Ungenauigkeiten der Geschwindigkeit waren kleiner als 2 km/h¹⁸⁹.

Neben der Analyse des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer auf den Nebenästen erlaubt die beschriebene Methode zur Verkehrsbeobachtung auch die Untersuchung des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern auf der Hauptstraße. Diese Betrachtung wird u.a. genutzt, um die Gültigkeit von aufgestellten Arbeitshypothesen für das Verhalten des vorfahrtsberechtigten Querverkehrs zu überprüfen.

4.1.5 Einflussfaktoren auf das Fahrerverhalten

Neben der Absicherung der durch eine eigene Auswertung vorliegender Fahrerhaltensdaten gewonnenen Erkenntnisse ist das Ziel der Fahrerhaltensuntersuchung, den Einfluss einzelner Kreuzungsparameter oder Manöver auf das Fahrerverhalten während der Annäherung an die Kreuzung zu identifizieren und ggf. durch Berücksichtigung dieser Parameter die Qualität einer Fahrerabsichts- und Kollisionserkennung zu verbessern.

Im Rahmen dieser Parametervariation erfolgt eine differenzierte Betrachtung der Vorfahrtsregelung, es wird das Verhalten an STOP-Schildern mit dem an VA-geregelten Kreuzungen verglichen. Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, existiert in der Literatur eine Vielzahl von Untersuchungen des Fahrerhaltens während der Annäherung an STOP-Schilder oder rote LSA. Teilweise wird anhand dieses Verhaltens auf die Möglichkeiten der Fahrerunterstützung an VA-geregelten Kreuzungen geschlossen. Ein Ziel der Variation der Vorfahrtsregelung ist daher die Überprüfung, inwieweit die Annahme der Übertragbarkeit für diese Situationen gerechtfertigt ist.

¹⁸⁸ Bei dem verwendeten Sensor handelt es sich um einen Datron Correvit, vgl. Kapitel 4.1.3.

¹⁸⁹ Im Gegensatz zur Positionsbestimmung erfolgt für die Geschwindigkeit erkannter Objekte keine Koordinatentransformation, da der Fehler durch den Ausrichtungswinkel der Stationen kleiner als 1% ist, vgl. Kapitel 9.3.3 im Anhang.

Die Unfallzahlen von Kollisionen an STOP-Schildern liefern zudem die Motivation, durch Einbiege-/Kreuzenassistenten auch solche Unfälle zu adressieren¹⁹⁰. Dies gilt insbesondere, da die STOP-Schild-Assistenz keine zusätzlichen Informationen benötigt: Das Anfahren aus dem Stillstand entspricht dem Einbiegen/Kreuzen an VA¹⁹¹, und die zur Fahrerabsichtserkennung erforderlichen Daten zum Verkehrsumfeld beschränken sich auf die Kenntnis über ein STOP-Schild und den Abstand zur Haltelinie¹⁹².

Ein weiterer variierter Parameter ist der Grad der Sichtbehinderung in Bezug auf den vorfahrtsberechtigten Querverkehr. Eingeschränkte Sicht wird in der Literatur vielfach als eine der Hauptunfallursachen angegeben¹⁹³. Entsprechende Unfallszenarien sind demnach bei der Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen zu berücksichtigen. Es erscheint plausibel, dass eine Anpassung des Fahrerverhaltens erfolgt, wenn die Bewertung des Querverkehrs aufgrund starker Sichtbehinderung erst bei Erreichen der Kreuzung möglich ist. Die Variation des Parameters Sichtbehinderung erlaubt eine Aussage, inwieweit diese Änderung eine Anpassung von Warn- und Eingriffskriterien erforderlich macht.

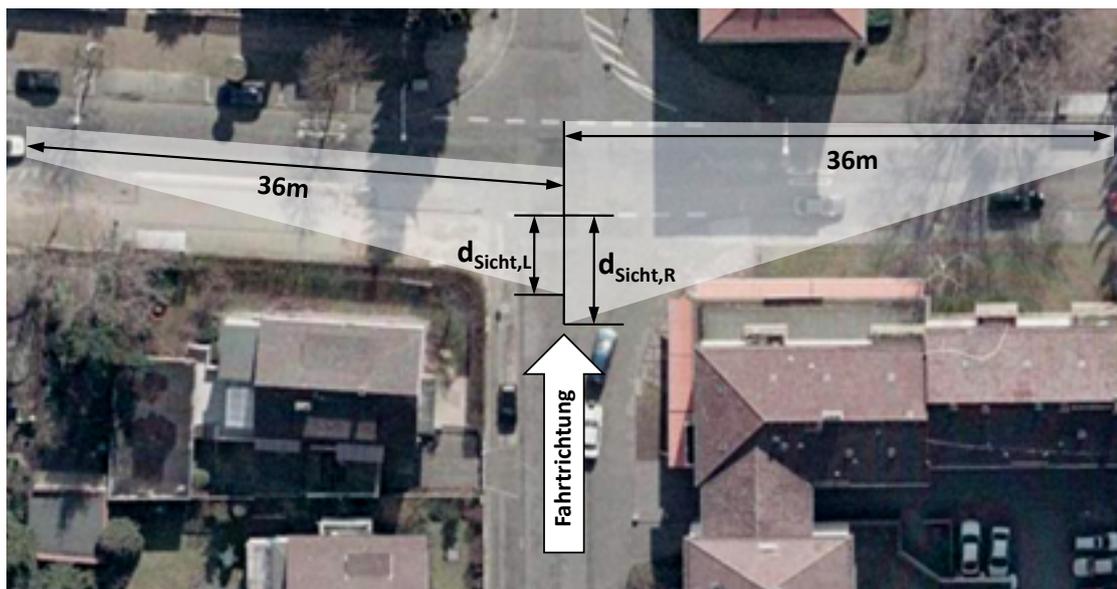


Abbildung 4.5: Bewertung der Sichtbehinderung am Beispiel der Kreuzung Rossdörfer Straße/Heidenreichstraße

¹⁹⁰ vgl. Kapitel 2.3.

¹⁹¹ MEITINGER ET AL. (2004): *Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen* S. 145-158.

¹⁹² vgl. bspw. GEISER; NIRSCHL (1994): *Realisierung und Bewertung eines warnenden maschinellen Kopiloten für die Unterstützung bei der Längsführung eines Kraftfahrzeugs* S. 367-380.

¹⁹³ vgl. Kapitel 2.3.

Es erfolgt eine Einteilung unterschiedlicher Kreuzungen gemäß dem Grad der Sichtverdeckung. Beim Einbiegen/Kreuzen akzeptiert der Fahrer üblicherweise keine Zeitlücken $< 4,3$ s im/zum Querverkehr¹⁹⁴. Dieser zeitliche Abstand entspricht im Stadtverkehr¹⁹⁵ einer Distanz zur Kreuzung von ca. 60 m, für Straßen mit einer vorgeschriebenen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h ergibt sich ein Abstand von ca. 36 m. Der Fahrer wird somit nur in die Kreuzung einfahren, wenn sich keine vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmer innerhalb dieses Bereichs befinden¹⁹⁶. Somit ergibt sich, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, der Abstand zur virtuellen Haltelinie, bei dem der Fahrer während der Annäherung an die Kreuzung erstmals einen Bereich von 4,3 s im Querverkehr von rechts/links überblicken kann, als Maß für die Sichtbehinderung in die entsprechende Richtung.

Erst unterhalb dieses Abstandes kann die Mehrzahl der Fahrer den für sie relevanten Bereich des Querverkehrs einschätzen. Bei extremer Sichtverdeckung kann dieser Abstand durchaus negativ werden, wenn ein Eintritt der Fahrzeugfront in den Konfliktbereich erforderlich ist, damit der Fahrer den Bereich der kritischen Zeitlücke überblicken kann. Zur besseren Vergleichbarkeit wird die Sichtbehinderung gemäß Tabelle 4.1 in mittel und stark eingeschränkte Sicht eingeteilt.

Tabelle 4.1: Einteilung der Sichtbehinderung

Sichtbehinderung	Sichtabstand
mittel	$> 2\text{m}$
stark	$\leq 2\text{m}$

Eine gesonderte Betrachtung der Auswirkungen von starker bzw. geringer Sichtbehinderung auf das Fahrerverhalten erfolgt im Rahmen der Verkehrsbeobachtung durch einen künstlich variierten Sichtabstand. Hierzu werden an einer exemplarischen Kreuzung mit geringer Sichteinschränkung durch Bebauung und Bepflanzung für eine erste Versuchsreihe Störobjekte auf beiden Seiten des zu untersuchenden Nebenastes platziert¹⁹⁷. Die StVO-konforme Aufstellung an der Kreuzung führt zu einer Reduzierung des Sichtabstands auf $-0,5$ m. Die zweite Versuchsreihe verzichtet auf die genannten Störobjekte, zusätzlich wird durch das Aufstellen von Pylonen eine Sichtbehinderung durch fremde, parkende Fahrzeuge vermieden. Somit ergibt sich für diese

¹⁹⁴ vgl. Kapitel 2.2.2.1.

¹⁹⁵ bei einer vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h.

¹⁹⁶ Unter der Annahme, dass sich vorfahrtsberechtigte Fahrzeug mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit fortbewegen.

¹⁹⁷ Bei den Störobjekten handelt es sich um einen Lieferwagen und einen Transportanhänger mit Plane.

Versuchsreihe ein Sichtabstand von ca. 6 m. Da eine identische Kreuzung für beide Versuchsreihen verwendet wird, kann der Einfluss zusätzlicher Kreuzungsparameter auf das Fahrerverhalten ausgeschlossen werden¹⁹⁸.

Neben der Variation von Kreuzungsparametern wird der Einfluss des Fahrmanövers auf den Annäherungsvorgang an die Kreuzung untersucht. Es werden die Manöver Links-einbiegen, Rechtseinbiegen und Kreuzen unterschieden. Neben dem Ziel, eventuelle Einflüsse des bevorstehenden Fahrmanövers auf Fahrerabsichtserkennung und Kollisionswahrscheinlichkeit zu identifizieren, wird geprüft, ob während der Annäherung an die Kreuzung eine Aussage über das gewählte Fahrmanöver unabhängig von eventuellen Betätigungen der Fahrtrichtungsanzeiger möglich ist¹⁹⁹.

Die variierten Einflussparameter fasst Abbildung 4.6 zusammen.

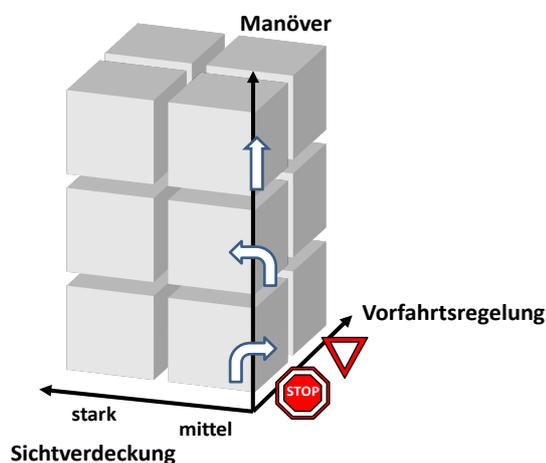


Abbildung 4.6: Übersicht der Einflussfaktoren in Form einer Variantenmatrix

4.1.6 Kreuzungsauswahl und Versuchsparcours

Die Auswahl geeigneter Kreuzungen zur Untersuchung des Fahrerverhaltens erfolgt anhand der Repräsentativität, der Variationsmöglichkeit eines Einflussparameters und der Erreichbarkeit der Kreuzung in Probandenversuchen²⁰⁰.

¹⁹⁸ Ein Einfluss der Pylonen auf das Fahrerverhalten ist hingegen nicht auszuschließen. Aus diesem Grund wurden kleine Pylonen verwendet, die vom Fahrer in einer späten Phase der Annäherung wahrgenommen werden.

¹⁹⁹ Diese Manövererkennung dient der Vermeidung von False-Positives /-Negatives für „blinkfaule“ Fahrer, falls sich Auswirkungen des Manövers auf die Zuverlässigkeit der Haltewunsch- bzw. Kollisionserkennung ergeben.

²⁰⁰ Die Reihenfolge der Kriterien entspricht der Priorität.

Unfallzahlen belegen²⁰¹, dass sich Kollisionen mit dem Querverkehr vorwiegend an rechtwinkligen, innerstädtischen Kreuzungen mit einem Fahrstreifen je Fahrtrichtung ereignen. Im Sinne der Repräsentativität werden für die Fahrerverhaltensanalyse Kreuzungen gewählt, deren Eigenschaften hinsichtlich Geometrie und Ortslage denen typischer Unfallschwerpunkte entsprechen. Die zu variierenden Kreuzungsparameter sind Vorfahrtregelung und Sichtbehinderung²⁰². Anhand dieser Kriterien wurden systematisch geeignete Kreuzungen in Darmstadt und Umgebung erfasst²⁰³.

Die Lage der Kreuzungen zueinander beeinflusst direkt die Fahrtdauer je Proband. Im Sinne der Zumutbarkeit der Versuchsdauer für die Probanden und zur Minimierung des Versuchsaufwands wird die Fahrtroute daher so gewählt, dass innerhalb einer Versuchsdauer von etwa einer Stunde möglichst viele geeignete Kreuzungsdurchfahrten erfolgen.

Die größte Dichte geeigneter Kreuzungen ergibt sich für Darmstadt: Hier befinden sich 14 von insgesamt 50 erfassten, repräsentativen Kreuzungen. Zur Minimierung der Versuchsdauer werden daher Probandenversuche an diesen Kreuzungen durchgeführt. Um Lerneffekte für einzelne Kreuzungsanfahrten zu vermeiden, nähert sich der Fahrer einer Kreuzung nie mehrmals aus der gleichen Richtung an. Abbildung 4.7 zeigt den verwendeten Versuchsparcours.

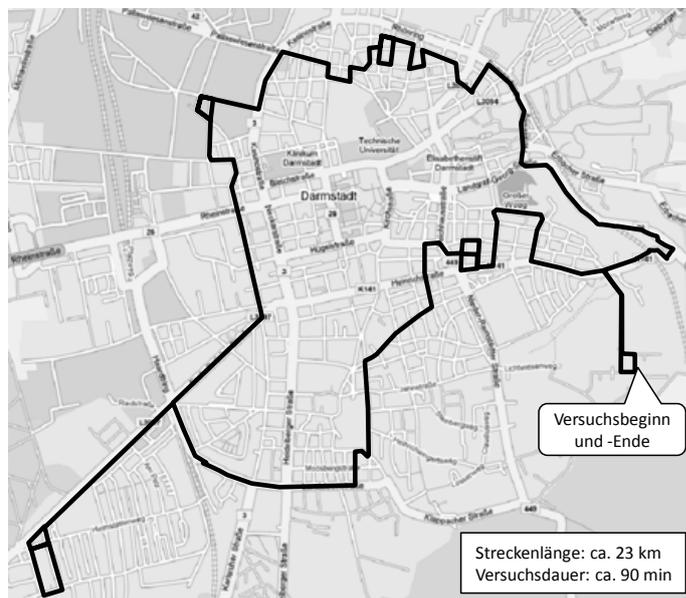


Abbildung 4.7: Versuchsparcours der Probandenversuche zum Fahrerverhalten

²⁰¹ vgl. Kapitel 2.3.

²⁰² vgl. Kapitel 4.1.5.

²⁰³ In einem Umkreis von etwa 15km erfolgte eine Vorauswahl potentiell geeigneter Kreuzungen über Satellitenaufnahmen (N.N. (2007): *Google Maps – Internetseite*) mit anschließender Prüfung der Kriterien vor Ort.

An den geeigneten Kreuzungen entlang des Versuchsparcours erfolgt zudem die Verkehrsbobachtung mit Hilfe der beschriebenen Radarmessstationen²⁰⁴. Da die Anfahrtdauer zu geeigneten Kreuzungen für die Verkehrsbeobachtung von untergeordneter Bedeutung ist, wird zusätzlich das Fahrerverhalten an geeigneten Kreuzungen außerhalb Darmstadts erfasst, um Lücken in der Variantenmatrix²⁰⁵ zu schließen.

4.1.7 Arbeitshypothesen zum Anhalteweg

Zur Bestimmung des spätestmöglichen Warnpunktes wird der Anhalteweg s_A vereinfachend in Reaktionsphase und Bremsphase unterteilt²⁰⁶. Während der Reaktionsphase bewegt sich das Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit. Nach Ablauf der Reaktionszeit erfolgt die Reaktion des Fahrers auf die Warnung in Form einer Bremsung mit konstanter Verzögerung. Die Frage, ob sich der Eintritt des Fahrzeugs in die Kreuzung durch eine Fahrerwarnung vermeiden lässt, erfordert somit grundlegende Annahmen für äußere und fahrerindividuelle Einflussparameter.

Der Begriff Reaktionszeit fasst mehrere Zeiten während der Reaktionsphase zusammen, darunter die Blickzuwendungszeit, die Umsetzzeit und die Betätigungszeit. GEISER & NIRSCHL bestimmten für akustische Warnungen eines STOP-Schild-Assistenten Reaktionszeiten zwischen 0,5 und max. 1,3 s²⁰⁷. Als Reaktionsdauer auf eine ebenfalls akustische Warnung eines Systems zur Vermeidung von Frontalkollisionen geben CHENG ET. AL. eine durchschnittliche Reaktionszeit von 1,08 s (Standardabweichung 0,38 s) an²⁰⁸, während BURCKHARDT für Auffahrsituationen einen Median von 1,34 s bestimmt²⁰⁹. Laut JOHANSSON & RUMAR beträgt die mittlere Reaktionszeit auf einen

²⁰⁴ vgl. Kapitel 4.1.4.

²⁰⁵ vgl. Kapitel 4.1.5.

²⁰⁶ Weitere Bestandteile des Anhaltewegs, bspw. durch Betätigungs- und Schwellzeiten, werden für die folgenden Betrachtungen vernachlässigt. Während des Bremsvorgangs wird die Verzögerung als konstant angenommen.

²⁰⁷ Die Untersuchungen wurden auf einem Versuchsgelände ohne Ablenkung durch andere Verkehrsteilnehmer etc. durchgeführt. Es wird darauf hingewiesen, dass im Realverkehr durchaus auch höhere Werte zu erwarten sind, vgl. GEISER; NIRSCHL (1994): *Realisierung und Bewertung eines warnenden maschinellen Kopiloten für die Unterstützung bei der Längsführung eines Kraftfahrzeugs* S. 367-380.

²⁰⁸ vgl. CHENG ET AL. (2002): *Analysis of driver response to collision warning during car following* S. 231-237.

²⁰⁹ vgl. BURCKHARDT (1985): *Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen*.

Warnton etwa 0,9 s, wobei etwa ein Viertel der Fahrer Reaktionszeiten von mehr als 1,2 s benötigt²¹⁰. Diese Ergebnisse führen zu der vereinfachenden Arbeitshypothese:

Die Reaktionszeit des Fahrers auf eine Warnung beträgt 1s.

Diese Festlegung auf einen Wert bietet den Vorteil, dass bei der Untersuchung des Fahrerhaltens keine Unschärfbereiche zu berücksichtigen sind. Die Auswirkungen dieser Vereinfachung werden in Kapitel 4.2.4 diskutiert.

Zusätzlich geht der Bremsweg s_{Brems} in die Berechnung des Anhaltewegs ein. Die Länge des Bremsweges ergibt sich bei konstanter Verzögerung a_{Brems} für eine vorgegebene Geschwindigkeit v_x zu:

$$s_{Brems} = -\frac{v_x^2}{2a_{Brems}} \quad (4.1)$$

Vereinfachend wird für die Berechnung des erforderlichen Bremsweges von einer konstanten Verzögerung ausgegangen, die mit aktuellen PKW-Reifen und Bremsanlagen üblicherweise darstellbar ist. Messungen auf dem Versuchsgelände der TU Darmstadt haben ergeben, dass auf geeignetem Fahrbahnbelag auch bei Nässe Verzögerungen von etwa 8 m/s^2 möglich sind²¹¹.

Die konstante Fahrzeugbeschleunigung während des Bremsvorgangs beträgt -8 m/s^2 .

Die Geschwindigkeit bei Bremsbeginn lässt sich mittels aktueller Fahrzustandsgrößen unter Berücksichtigung der Reaktionszeit prognostizieren. Diese Prognose trifft nur dann zu, wenn während der Reaktionszeit keine unerwarteten Fahrereingriffe erfolgen. Eine Änderung der Fahr- oder Bremspedalstellung kann bspw. dazu führen, dass die Geschwindigkeit bei Bremsbeginn nicht mit dem prognostizierten Wert übereinstimmt, was wiederum eine Abweichung des erwarteten Bremsweges mit sich bringt. Im ungünstigsten Fall führt dies trotz zutreffender Annahmen für Reaktionszeit und Bremsverzögerung zu einem Eintritt des Fahrzeugs in die Kreuzung.

Während der Reaktionszeit des Fahrers auf eine Warnung bleiben die Fahrzustandsgrößen konstant.

Somit ergibt sich der Anhalteweg zu:

$$s_A = -\frac{v_x^2}{2a_{Brems}} + t_R * v_x \quad (4.2)$$

²¹⁰ vgl. JOHANSSON; RUMAR (1971): *Drivers' Brake Reaction Times* S. 23-27.

²¹¹ vgl. bspw. REUL ET AL. (2007): *Bremswegverkürzung durch eine ABS-unabhängige Verstelldämpferregelung*.

4.2 Erkennung der Fahrerabsicht

4.2.1 Definition der Hypothesen

Eine notwendige Bedingung zur Umsetzung eines Einbiege-/Kreuzenassistenten ist, dass die gefahrbringende Fahrerabsicht, trotz vorfahrtsberechtigtem Querverkehr in die Kreuzung einzufahren, rechtzeitig zur Unfallvermeidung erkannt werden kann. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, kann die Ursache für eine falsche Fahrerentscheidung bei VA mit Fehlern bei der Identifikation und Interpretation der Vorfahrtsregelung oder bei der Erkennung und Bewertung des Querverkehrs zusammenhängen.

Die Negation der Annahme, dass die rechtzeitige Erkennbarkeit ausbleibender Fahrerreaktionen auf die Vorfahrtsregelung für das Einbiegen/Kreuzen an VA analog zu Anhaltvorgängen an STOP oder roter LSA²¹² gegeben ist, führt auf Hypothese H1:

H1: Während der Kreuzungsannäherung ist eine erste Reaktion auf die Vorfahrtsregelung für die überwiegende Mehrzahl anhaltender Fahrer nicht vor dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt erkennbar.²¹³

Das Unfallgeschehen im Kreuzungsbereich zeigt, dass Kollisionen durch Fehler bei der Erkennung und Bewertung des Querverkehrs wesentlichen Anteil an den Unfallzahlen haben. Da die Erkennung von Querverkehr in innerstädtischen Bereichen aufgrund von Sichtbehinderungen meist erst wenige Meter vor der Kreuzung möglich ist²¹⁴, wird davon ausgegangen, dass die Berücksichtigung vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer die Verringerung der eigenen Fahrgeschwindigkeit erfordert. Hypothese H2 beschreibt die Negation der Annahme, dass eine Reaktion auf die Vorfahrtsregelung (in Form einer Reduktion der Geschwindigkeit) üblicherweise feststellbar ist, selbst wenn der Fahrer die Kreuzung ohne Fahrzeugstillstand durchfährt:

²¹² Untersuchungen des Fahrerverhaltens an STOP-Schildern und roten LSA haben gezeigt, dass erste Fahrerreaktionen bei diesen Vorfahrtsregelungen vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt erfolgen, vgl. bspw. BERNDT ET AL. (2007): *Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems*, MEITINGER ET AL. (2004): *Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen* S. 145-158 oder VAN DER HORST (1991): *Video Analysis Of Road User Behaviour At Intersections* S. 93-109.

²¹³ Alle aufgeführten Hypothesen beziehen sich auf die Annäherung an VA-Kreuzungen im Stadtverkehr.

²¹⁴ Im Rahmen der systematischen Kreuzungserfassung konnten im Stadtverkehr keine VA-Kreuzungen ohne Sichtverdeckung gefunden werden. Eine Bewertung des Querverkehrs ist an den erfassten Kreuzungen für Abstände zur virtuellen Haltelinie oberhalb von 5m nicht möglich, vgl. Kapitel 4.1.5 bzw. 4.1.6.

H2: Während der Kreuzungsannäherung ist für die überwiegende Mehrzahl der nicht anhaltenden Fahrer eine Reaktion auf die Vorfahrtsregelung nicht oder erst nach dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt erkennbar.

Gelingt die Falsifizierung von Hypothese H2, so erlauben Kriterien zur Erkennung einer ausbleibenden ersten Fahrerreaktion zwar die rechtzeitige Erkennung von Kollisionen durch ungebremstes Einfahren in die Kreuzung, sie eignen sich jedoch nicht zur Erkennung von Fahrerfehlern wie Fehleinschätzung oder Übersehen von Querverkehr, die sich erst nach einer ersten Reaktion auf die Vorfahrtsregelung ereignen: Der Fahrer fällt während der Annäherung an die Kreuzung die Entscheidung, einen begonnenen Bremsvorgang fortzusetzen (wenn er dem Querverkehr Vorfahrt gewähren muss) oder den Anhaltevorgang abubrechen und in die Kreuzung einzufahren, falls die Verkehrssituation dies zulässt. Ist die Entscheidung zum Durchfahren der Kreuzung falsch, lassen sich mögliche Folgen nur vermeiden, wenn der Zeitpunkt der Fehlererkennung vor dem letztmöglichen Zeitpunkt für Interventionsmaßnahmen liegt. Die Negation dieser Bedingung führt auf die universelle Hypothese H3:

H3: Notwendige Kriterien für die Fahrerentscheidung, einen begonnenen Bremsvorgang abubrechen und die Kreuzung ohne Stillstand zu durchfahren, sind mehrheitlich erst nach dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt erkennbar.

Eine weiterer Faktor für die Realisierbarkeit eines Einbiege/Kreuzenassistenten ist die Beherrschbarkeit des Zielkonflikts zwischen False-Positives und False-Negatives²¹⁵. Die Kriterien zur Fahrerabsichtserkennung sind so zu wählen, dass die Quote der zu erwartenden Fehlwarnungen minimiert und gleichzeitig die Erkennungsrate von Fahrerfehlern maximiert wird. Dieser Zielkonflikt führt auf Hypothese H4:

H4: Kriterien zur mehrheitlich rechtzeitigen Erkennung abgebrochener Bremsvorgänge mit der Fahrerabsicht „Durchfahren“ führen zu einer vom Fahrer erwartungsgemäß nicht mehr akzeptierten Fehlerkennungsrate.

Die Untersuchung von Hypothese H4 setzt die Kenntnis eines im Folgenden als „kritische Fehlerkennungsrate“ bezeichneten Grenzwerts voraus, dessen Überschreiten vom Fahrer als störend wahrgenommen wird. Diese kritische Fehlerkennungsrate lässt sich nicht pauschal angeben, da die zu erwartende Akzeptanz für eine vorgegebene Fehlalarmrate von der gewählten Warn- und Eingriffsstrategie beeinflusst wird: False Positives werden vom Fahrer abhängig von der aktivierten Assistenzmaßnahme als

²¹⁵ vgl. Kapitel 2.2.1

unterschiedlich stark störend wahrgenommen²¹⁶. Vereinfachend wird nachfolgenden Betrachtungen eine angenommene kritische Fehlerkennungsrate von 2,5% zugrundegelegt. Die Auswirkungen der zu erwartenden Fehlerkennungsrate lassen sich somit anhand von Hypothese H4 nur tendenziell beurteilen. Eine abschließende Untersuchung der Fahrerakzeptanz für eine ausgewählte Warn- und Eingriffsstrategie erfolgt in Kapitel 6.

4.2.2 Ergebnis

Eine notwendige Bedingung für die Erkennung der Fahrerabsicht „Anhalten“ ist die Betätigung des Bremspedals während der Kreuzungsannäherung²¹⁷. Diese Bedingung ist jedoch nicht hinreichend, die Verringerung der Geschwindigkeit kann bspw. durch das bevorstehende Fahrmanöver begründet sein. Auch andere Faktoren, bspw. vorausfahrende Fahrzeuge oder die Straße überquerende Fußgänger können den Fahrer zu einer derartigen Reaktion veranlassen. Demnach erlaubt das Kriterium keine Aussage, dass ein Fahrer an der Kreuzung anhält.

Wenn jedoch zu dem Zeitpunkt keine Bremspedalbetätigung feststellbar ist, zu dem für die meisten Fahrer eine Reaktion erkennbar ist, liegt ein atypisches Fahrerverhalten vor. Da die Bremspedalbetätigung ein notwendiges Kriterium für einen Anhaltevorgang ist, wird davon ausgegangen, dass der Fahrer in diesem Fall nicht die Absicht hat, vor der Kreuzung anzuhalten. Von Interesse zur Vermeidung dieser Gefahrensituation durch ein warnendes Assistenzsystem ist daher, ob der übliche Zeitpunkt für eine Fahrerreaktion vor dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt liegt und somit eine positive Warnreserve gegeben ist²¹⁸.

Zur Prüfung der Hypothese H1 wird der erste Zeitpunkt der Bremspedalbetätigung aufgezeichneter Anhaltevorgänge an VA untersucht²¹⁹. Zusätzlich wird für Annäherungsfahrten ohne Fahrzeugstillstand untersucht, ob bzw. wann eine erste Reaktion des

²¹⁶ False Positives werden bspw. bei informierenden Funktionen eher akzeptiert, als bei autonom eingreifenden Systemen, vgl. JANSSEN (1989): *The impact of collision avoidance systems on driver behaviour and traffic safety: Preliminaries to studies within the GIDS projects* S. 18.

²¹⁷ Falls Geschwindigkeit und Abstand zur Kreuzung kein Anhalten ohne Bremsbetätigung (bspw. durch das Schleppmoment des Motors und den Rollwiderstand) zulassen.

²¹⁸ vgl. Kapitel 3.3.1.

²¹⁹ Betrachtet wird der Zeitpunkt der ersten Bremsbetätigung eines zusammenhängenden Anhaltevorgangs. Wird die Bremsbetätigung während des Anhaltevorgangs unterbrochen, wird die vorliegende Kreuzungsannäherung nicht ausgewertet, da evtl. äußere Einflüsse (vorausfahrende Fahrzeuge, Fußgänger etc.) zur ersten Bremsbetätigung geführt haben. Auch Annäherungsfahrten mit einem zusätzlichen Halt vor Erreichen der Kreuzung (bspw. aufgrund von vorausfahrenden Fahrzeugen) werden verworfen.

Fahrers auf die VA-Kreuzung feststellbar ist²²⁰. Um die Wirksamkeit einer Fahrerwarnung zum Zeitpunkt dieser Erkennung zu untersuchen, wird die verfügbare Zeit für eine Fahrerreaktion $T_{R,avail}$ bestimmt. Sie ergibt als Differenz aus TTI und Bremszeit:

$$T_{R,avail} = TTI - T_{Brems} = \frac{d}{v} + \frac{v}{2a_{Brems}} \quad (4.3)$$

Abbildung 4.8 stellt das Ergebnis dar.

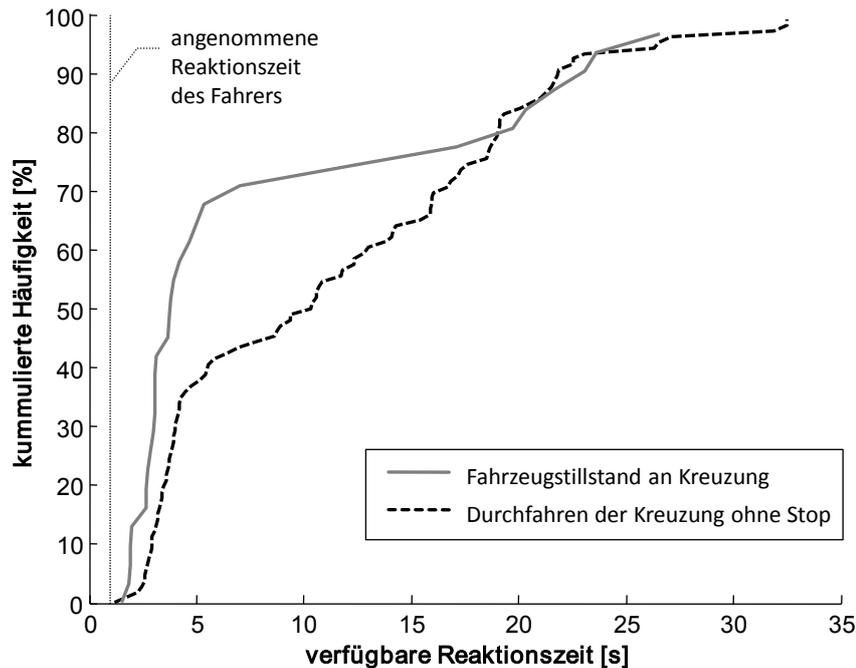


Abbildung 4.8: Verfügbare Reaktionszeit für eine Fahrerwarnung bei Bremspedalbetätigung.

Es zeigt sich, dass die Bremsbetätigung für alle aufgezeichneten Anhaltevorgänge an VA vor dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt²²¹ erfolgt. Hypothese H1 ist falsifiziert. Atypisches Fahrerverhalten in Form eines ausbleibenden Bremsengriffs lässt sich somit zu einem Zeitpunkt erkennen, zu dem der Eintritt des Fahrzeugs in die Kreuzung durch eine Fahrerwarnung noch vermeidbar ist. Für etwa 95% der Fahrten ergibt sich zudem eine positive Warnreserve von 1 s. Somit ist neben einer Fahrerwarnung auch die Verwendung einer informierenden Vorwarnung 1 s vor dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt denkbar. Erfolgt nach der angenommenen Reaktionszeit von 1 s ein Bremsengriff, kann auf eine Akutwarnung verzichtet werden.

Für alle Kreuzungsannäherungen an VA, in denen kein Fahrzeugstillstand erforderlich war, ist dennoch eine Reaktion des Fahrers auf die Kreuzung in Form eines Bremsvor-

²²⁰ vgl. Hypothese H2, Kapitel 4.2.1.

²²¹ dargestellt durch die angenommene erforderliche Reaktionszeit von 1s.

gangs erkennbar. Die Bremsbetätigung erfolgt ebenfalls durchweg vor dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt. Der Falsifizierungsversuch von Hypothese H2 ist demnach ebenfalls erfolgreich.

Zusätzlich fällt auf, dass die erste Reaktion auf die Kreuzung für abgebrochene Bremsvorgänge durchschnittlich früher erfolgt als für vollendete Haltevorgänge. Als möglicher Grund für dieses Verhalten wird die Stärke der Sichtbehinderung in Zusammenhang mit den Aufgaben des Fahrers während der Annäherung vermutet. Dieser Zusammenhang wird im Rahmen der Parametervariation untersucht²²².

Trotz einer Reaktion des Fahrers auf die Vorfahrtsregelung ist eine Kollision durch Fahrerfehler bei der Berücksichtigung des Querverkehrs möglich. Die Untersuchung der durchschnittlichen Time-to-Intersection bei Bremsbeginn (TTI_{BB}) zeigt, dass der Fahrer den Bremsvorgang bei einer TTI von 3,3 s (vollständiger Haltevorgang) respektive 3,8 s (Bremsvorgang mit anschließender Durchfahrt) einleitet, also deutlich vor dem in der Literatur angegebenen Zeitpunkt der ersten Blickzuwendung auf Querverkehr²²³.

Fällt der Fahrer während der gebremsten Annäherung die Entscheidung, die Kreuzung ohne Stopp zu durchfahren, äußert sich dies zunächst in einem Abbruch des Bremsvorgangs. Erste Anzeichen dieser Entscheidung liefert das Bremspedal, durch dessen Betätigung die Verzögerung des Fahrzeugs beeinflusst wird. Als Indikatoren für den erstmöglichen Erkennungszeitpunkt der Fahrerentscheidung „Fahren“ werden die Verringerung der Verzögerung und das vollständige Lösen des Bremspedals verwendet. Die verfügbare Zeit für eine Fahrerreaktion bei den durchgeführten Probandenversuche und der Verkehrsbeobachtung ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

²²² vgl. Kapitel 4.4.

²²³ Entsprechende Kopfbewegungen lassen sich an Kreuzungen durchschnittlich bei einer TTI von 2,5s beobachten, vgl. VAN DER HORST (1991): *Video Analysis Of Road User Behaviour At Intersections* S. 93-109.

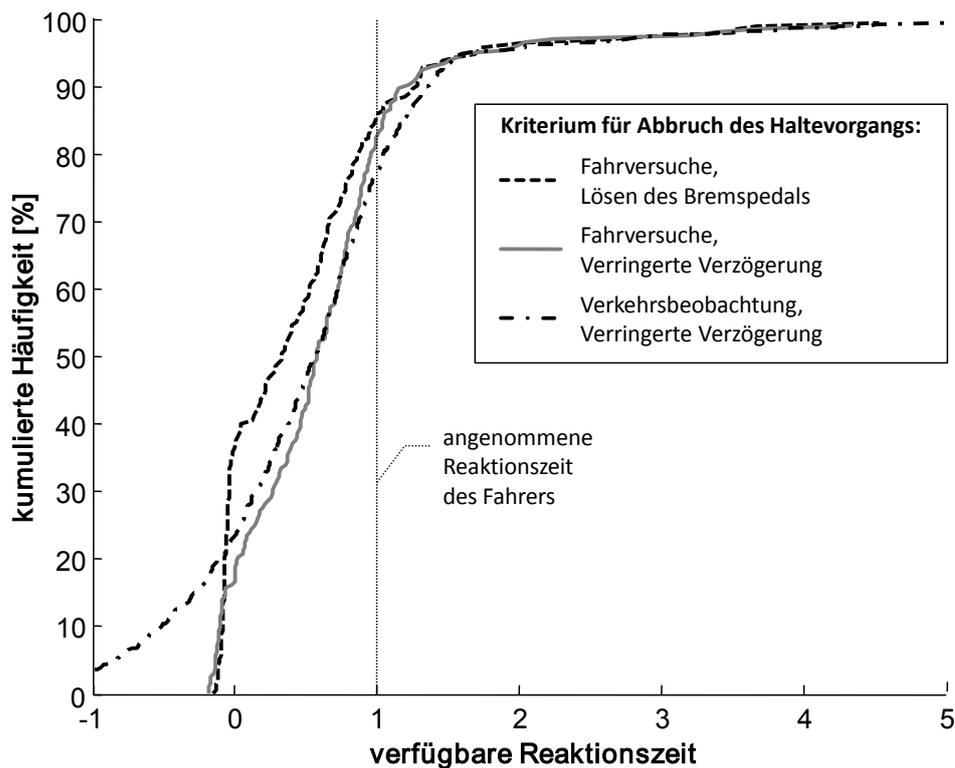


Abbildung 4.9: Verfügbare Reaktionszeit für Fahrerreaktionen auf Warnungen nach Erkennung des Abbruchs des Haltevorgangs

Es fällt auf, dass die angenommene Reaktionszeit von 1s unabhängig von dem gewählten Erkennungskriterium und der verwendeten Datenbasis in der Mehrzahl der Annäherungsfahrten nicht zur Verfügung steht. Der Vergleich der Kriterien zeigt zudem, dass das Freigeben des Bremspedals deutlich nach der ersten Verringerung der Verzögerung erfolgt. Entsprechend ist die verfügbare Reaktionszeit für dieses Erkennungskriterium durchweg kleiner. Im Bereich geringer Reaktionszeiten ist eine stärkere Streuung der Daten aus der Verkehrsbeobachtung zu beobachten. Mögliche Ursache hierfür ist die größere Ungenauigkeit der Messdaten, wodurch dem tatsächlichen Verlauf eine entsprechende Streuung überlagert ist, die sich umso stärker auswirkt, je kleiner die verfügbare Reaktionszeit ist.

Zudem zeigt sich, dass die Fahrerentscheidung, in die Kreuzung einzufahren, für einen Teil der Fahrer erst nach dem spätestmöglichen Bremspunkt erkennbar ist ($T_{R,avail} < 0\text{ s}$). Zu diesem Zeitpunkt ist ein Überfahren der virtuellen Halteline selbst durch einen Volleingriff nicht mehr vermeidbar.

Zwischen Warnung und autonomem Volleingriff wird die um einen Teileingriff erweiterte Akutwarnung eingeführt. Der Teileingriff bewirkt eine Geschwindigkeitsverringering während der Reaktionszeit des Fahrers und erhöht so die verfügbare Reaktionszeit. Daher ist eine Kombination aus Warnung und Teileingriff auch nach dem für „konventionelle Warnungen“ spätestmöglichen Warnzeitpunkt anwendbar. Abbildung 4.10 stellt

die Grenzkurven des Mindestabstands zur Kreuzung abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit für Warnung, Teileingriff und autonomen Volleingriff dar.

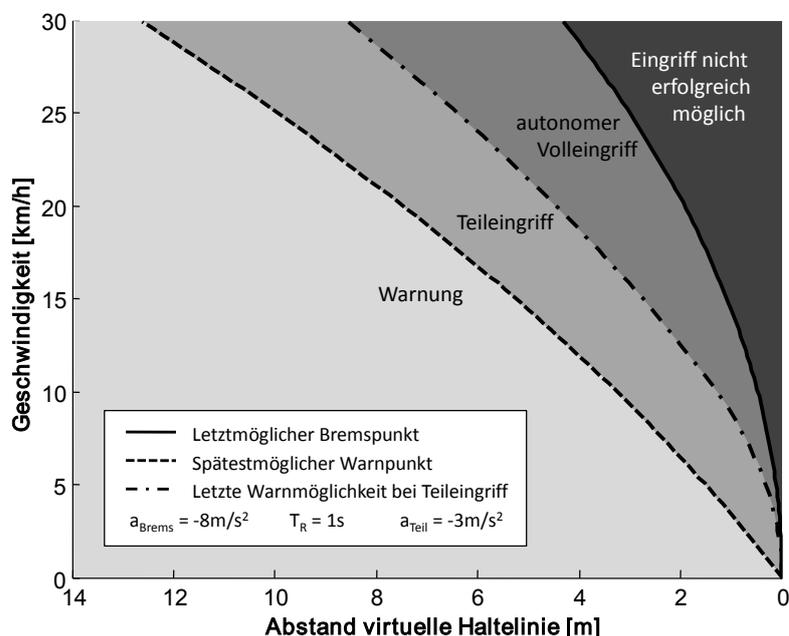


Abbildung 4.10: Möglichkeiten der Kollisionsvermeidung in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Abstand zur Kreuzung

Die Zuordnung von Geschwindigkeit und Abstand zum Zeitpunkt der Absichtserkennung ergibt den Anteil der abhängig von der eingesetzten Warn-/Eingriffsstrategie rechtzeitig erkennbaren Kreuzungsdurchfahrten, wie in Abbildung 4.11 dargestellt. Dabei wird von einem Teileingriff mit einer Verzögerung von 3 m/s^2 ausgegangen.

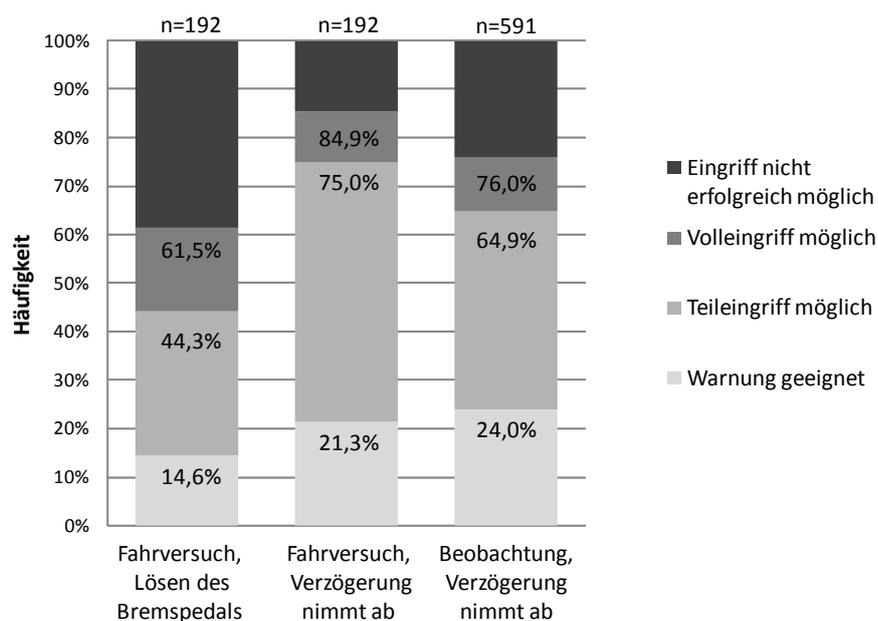


Abbildung 4.11: Eingriffsmöglichkeit bei der Fahrerabsichtserkennung „Fahren“

Es zeigt sich, dass erste Indizien für die Fahrerabsicht „Fahren“ nur für etwa 20% der Annäherungsfahrten hinreichend rechtzeitig vorliegen, um den Fahrer durch eine Warnung zu unterstützen. Die Kombination aus Warnung und Teileingriff erhöht das Potential der Assistenz an VA deutlich, wählt man das Kriterium abnehmender Verzögerung, sind Fahrerentscheidungen in etwa 2/3 der aufgezeichneten Fahrten rechtzeitig erkennbar. Wird die Warnstrategie zusätzlich um einen autonomen Volleingriff erweitert, so steigt der Anteil rechtzeitig erkannter Situationen. Die universelle Hypothese H3 bewährt sich somit für reine Warnelemente²²⁴. Für eine um einen Teileingriff²²⁵ erweiterte Warnstrategie ist Hypothese H3 falsifiziert.

Die aufgeführten Kriterien „Verringerung der Verzögerung“ oder „Lösen des Bremspedals“ sind notwendige Bedingungen für das Durchfahren der Kreuzung ohne Halt. Die Verringerung der Verzögerung allein erscheint als hinreichendes Kriterium zur Fahrerabsichtserkennung ungeeignet, da eine abnehmende Verzögerung u.a. bei degressivem Bremsen während der Annäherung auftritt²²⁶. Um Fehlwarnungen in derartigen Situationen zu vermeiden, werden zusätzliche Bedingungen zur Aktivierung intervenierender Maßnahmen eingeführt.

Degressives Bremsen wird bspw. ausgeschlossen, wenn die aktuelle Verzögerung nicht ausreicht, um einen Eintritt in die Konfliktzone zu vermeiden. Es erfolgt ein Vergleich zwischen aktueller Verzögerung und erforderlicher Verzögerung a_{nec} . Die erforderliche Verzögerung beschreibt die konstante Geschwindigkeitsänderung, die erforderlich ist, um das Fahrzeug genau an der virtuellen Haltelinie zum Stillstand zu bringen. Sie ergibt sich aus der aktuellen Geschwindigkeit und dem Abstand zur Haltelinie:

$$a_{nec} = -\frac{v^2}{2d} \quad (4.4)$$

Degressives Bremsen liegt nicht vor, wenn bei Verringerung der Verzögerung gilt:

$$a > a_{nec} \quad (4.5)$$

Eine weitere Möglichkeit ist der Vergleich von a_{nec} mit Werten, die bei Anhaltvorgängen üblicherweise nicht überschritten werden. Eine entsprechende Auswertung der Fahrerverhaltensdaten zeigt, dass a_{nec} -Werte von $-3,1 \text{ m/s}^2$ bei etwa 95% aller Anhaltvorgängen nicht unterschritten werden. Dieses 95. Perzentil wird im Folgenden

²²⁴ unter Berücksichtigung der Arbeitshypothesen zum Anhalteweg, vgl. Kapitel 4.1.7.

²²⁵ mit einer autonomen Verzögerung von -3 m/s^2

²²⁶ Dieses Problem tritt bei Verwendung des Kriteriums „Freigeben des Bremspedals“ nicht auf, jedoch ist die Fahrerabsicht anhand dieses Kriteriums erst zu einem späteren Zeitpunkt erkennbar, vgl. Abbildung 4.11.

vereinfachend als $a_{nec,min}$ bezeichnet²²⁷. Die Fahrerabsicht „Anhalten“ erscheint unwahrscheinlich, wenn sich während der Kreuzungsannäherung eine erforderliche Verzögerung einstellt, die betragsmäßig größer ist, als das 95. Perzentil von a_{nec} :

$$a_{nec} < a_{nec,min} \quad (4.6)$$

Beschränken sich Assistenzmaßnahmen auf eine reine Warnung, ist dieses Kriterium jedoch ungeeignet, da es unterhalb einer von $a_{nec,min}$ abhängigen Grenzggeschwindigkeit erst nach dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt erfüllt ist. Das Auflösen der Definition von a_{nec} (Gleichung 4.4) nach d ergibt:

$$d = -\frac{v^2}{2a_{nec}} \quad (4.7)$$

Gleichsetzen mit der Formel des Anhaltewegs (4.2) und Auflösen nach v führt auf:

$$v = 2 \frac{t_R * a_{nec} * a_{Brems}}{a_{nec} - a_{Brems}} \quad (4.7)$$

Durch Einsetzen von $a_{nec,min} = -3,1 \text{ m/s}^2$ ergibt sich diese Grenzggeschwindigkeit zu 36,4 km/h, vgl. Abbildung 4.12²²⁸. Die Anpassung von $a_{nec,min}$ auf den 50%-Fahrer ($a_{nec,max,50\%} = -2,0 \text{ m/s}^2$) erlaubt die rechtzeitige Absichtserkennung noch oberhalb von 19,2 km/h, für $a_{nec,min} = -1,0 \text{ m/s}^2$ ergibt sich eine Mindestgeschwindigkeit von 8,2 km/h.

Auch das vollständige Freigeben des Bremspedals lässt den Fahrerwunsch, anzuhalten, unwahrscheinlich erscheinen und eignet sich somit als hinreichendes Kriterium für intervenierende Maßnahmen. Jedoch liegt dieses Erkennungskriterium erst zu einem späteren Zeitpunkt vor, die Zahl der vermeidbaren Kreuzungseinfahrten verringert sich entsprechend, vgl. Abbildung 4.11.

²²⁷ Für die durchgeführten Probandenversuche ergibt sich $a_{nec,min}$ zu $-3,1 \text{ m/s}^2$, während sich für die Verkehrsbeobachtungen ein Wert von $-3,2 \text{ m/s}^2$ einstellt. Eine beim Projektpartner durchgeführte Fahrerhaltensanalyse bestätigt den ermittelten Wert $a_{nec,min} = -3,1 \text{ m/s}^2$, vgl. Rohrmüller (2007): Prädiktion des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Trajektorien bei der Kreuzungsassistenz S. 41f. Die eigene Auswertung der Messdaten einer im Rahmen von INVENT durchgeführten Fahrerhaltensstudie (vgl. Vollrath et al. (2004): *INVENT Kreuzungsverhalten - Endbericht*) führt ebenfalls auf $a_{nec,min} = -3,1 \text{ m/s}^2$, allerdings unter Verwendung des Abstands zum Anhaltepunkt als Bezugsgröße d (der Kreuzungsabstand steht in diesen Daten nicht mit hinreichender Genauigkeit zur Verfügung).

²²⁸ unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.1.7 eingeführten Arbeitshypothesen.

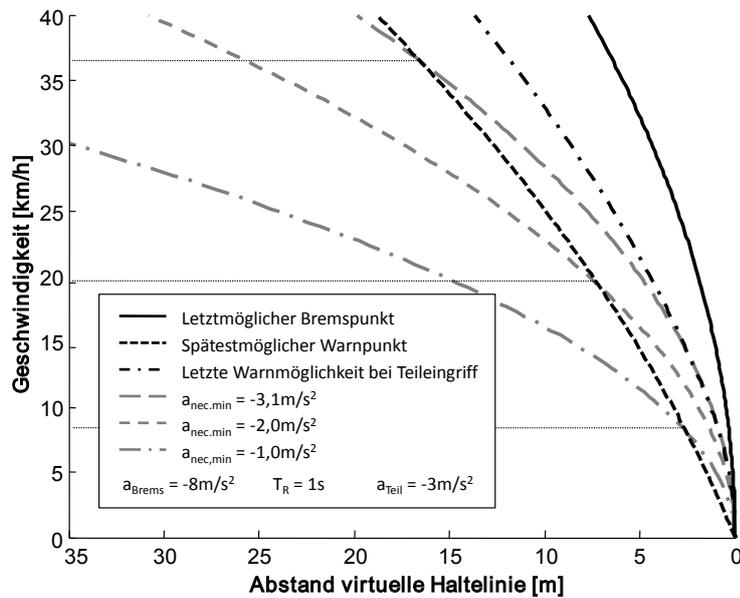


Abbildung 4.12: Vergleich der Warnmöglichkeiten in Abhängigkeit von $a_{nec,min}$

Um das zu erwartende Verhältnis aus Erkennungsrate und Quote der Fehlalarme zu vergleichen, werden die genannten Kriterien jeweils zum spätestmöglichen Eingriffszeitpunkt auf vollständige und abgebrochene Haltevorgänge angewendet. Aus den durchgeführten Probandenversuchen liegen an VA-Kreuzungen 192 Kreuzungsdurchfahrten ohne Stillstand und 75 vollständige Anhaltevorgänge vor. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4.13.

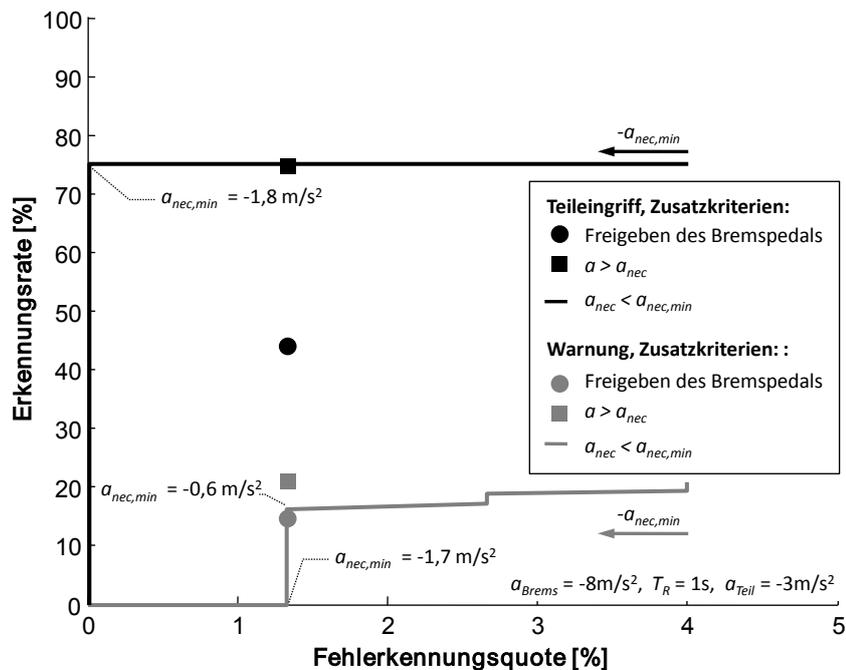


Abbildung 4.13: Vergleich von Erkennungsrate und Fehlerkennungsquote für verschiedene Zusatzkriterien zur hinreichenden Fahrerabsichtserkennung – Daten der Probandenversuche

Abgebildet sind die Erkennungs- bzw. Fehlerkennungsquote für vorgeschlagene, hinreichende Kriterien zur Aktivierung intervenierender Maßnahmen. Der Grenzwert $a_{nec,min}$ wurde dabei zwischen 0 und -8 m/s^2 variiert, so dass sich Erkennungs- und Fehlerkennungsrate für die Bedingung $a_{nec} < a_{nec,min}$ als Funktion von $a_{nec,min}$ ergeben. Die übrigen Kriterien sind als Punkte dargestellt.

Ein ideales Systemverhalten äußert sich in einer hohen Erkennungsrate bei geringer Fehlerkennungsquote und findet sich somit im oberen linken Bereich des Diagramms wieder. Dieses Verhalten ist für ein warnendes System unabhängig von den verwendeten Zusatzkriterien erwartungsgemäß nicht zu beobachten, da die verringerte Verzögerung meist erst nach dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt vorliegt.

Zudem zeigt sich, dass das notwendige Kriterium der verringerten Verzögerung nur in drei der 75 vollständigen Anhaltevorgänge feststellbar ist. Aus diesem Grund liegt die Quote der Fehlwarnungen unabhängig von evtl. Zusatzbedingungen bei maximal 4%. Ein Vergleich der Zusatzbedingungen ist wegen dieser geringen Stichprobengröße nur unter Vorbehalt möglich. Jedoch fällt auf, dass sich Fehlwarnungen durch alle genannten Zusatzkriterien zumindest reduzieren lassen. Für das vollständige Freigeben des Bremspedals ergibt sich zudem eine erhebliche Reduktion der Erkennungsrate bei Verwendung eines Teileingriffs.

Durch die Verkehrsbeobachtung steht eine größere Anzahl von Annäherungsfahrten (591 Durchfahrten, 207 vollständige Haltevorgänge – davon 26 bzw. 29 mit verringerter Verzögerung am letztmöglichen Warn- bzw. Teileingriffspunkt) mit geringerer Messgenauigkeit zur Verfügung. Die vorgeschlagenen Kriterien werden vergleichend auf diese Datenbasis angewendet²²⁹, vgl. Abbildung 4.14.

Erneut zeigt sich das vergleichsweise geringe Potential einer reinen Fahrerwarnung. Bei Erweiterung der Warnstrategie um einen Teileingriff steigt die Erkennungsrate ungeachtet der Zusatzkriterien deutlich. Des Weiteren fällt auf, dass sich für Annäherungsvorgänge der Verkehrsbeobachtung eine höhere Fehlwarnungsquote ergibt, was zumindest teilweise auf die geringere Genauigkeit von Abstand und Geschwindigkeit zurückzuführen ist. Dennoch ergibt sich bei einem Teileingriff für beide Zusatzkriterien ein akzeptabler Kompromiss aus Erkennungsrate und Fehlerkennungsquote.

²²⁹ Das Freigeben des Bremspedals steht für Daten der Verkehrsbeobachtung nicht zur Verfügung und wird somit nicht ausgewertet.

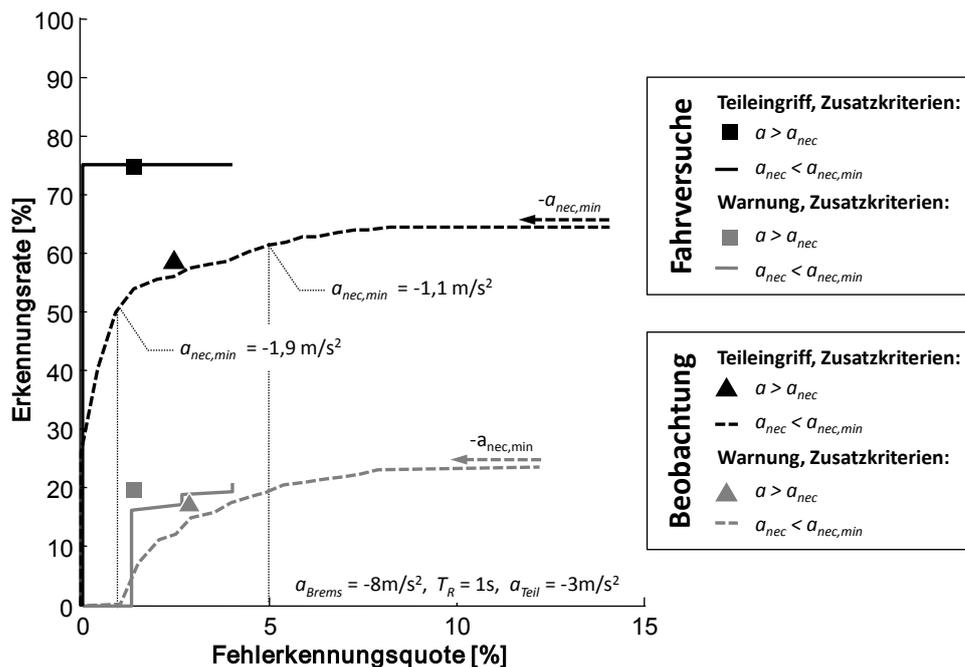


Abbildung 4.14: Vergleich von Erkennungsrate und Fehlerkennungsquote für verschiedene Zusatzkriterien zur hinreichenden Fahrerabsichtserkennung – Verkehrsbeobachtung und Probandenversuche

Das günstigste Verhältnis von Erkennungs- und Fehlerkennungsrate bietet in diesem Zusammenhang die Bedingung $a > a_{nec}$ mit einer Erkennungsrate von 59% bei einer Fehlerkennungsquote von 2,5%. Bei Verwendung des Kriteriums $a_{nec} < a_{nec,min}$ ergibt sich für diese Fehlerkennungsquote eine um etwa 3% geringere Erkennungsrate. Die Verwendung des Grenzwertes $a_{nec,min}$ bietet jedoch den Vorteil, das System gezielt auf eine vorgegebene Fehlerkennungsquote zu optimieren²³⁰. Für Fehlerkennungsquoten von 1% bzw. 5% ergeben sich für einen Teileingriff bspw. Erkennungsraten von 51% bzw. 61%. Der entsprechende Grenzwert $a_{nec,min}$ für diese Fehlerkennungsquoten liegt mit $-1,9 \text{ m/s}^2$ respektive $-1,1 \text{ m/s}^2$ interessanterweise deutlich unter dem bestimmten Minimum $a_{nec,min} = -3,1 \text{ m/s}^2$ für 95% aller Annäherungsfahrten. Für die Erkennung abgebrochener Bremsvorgänge ist dieses Kriterium daher auf betragsmäßig geringere Werte anzupassen.

Zusammenfassend ist Hypothese H4 falsifiziert, wenn die Fahrerwarnung um einen Teileingriff ergänzt wird. Dann erlauben die Zusatzbedingungen $a > a_{nec}$ oder $a_{nec} < a_{nec,min}$ die Erkennung der Mehrzahl der Durchfahrten bei Fehldetektionsquoten

²³⁰ Derartige Vorgaben können bspw. aus Untersuchungen zur Fahrerakzeptanz von Fehlwarnungen resultieren.

bis 2,5%²³¹. Eine reine Warnung bei Abbruch des Bremsvorgangs erscheint hingegen ungeeignet zur Kollisionsvermeidung, da die Erkennungsrate zu gering ist.

4.2.3 Bedeutung des Teileingriffs für das Unfallgeschehen

Die Analyse des Fahrerverhaltens zeigt, dass die Warnreserve bei Erkennung einer ausbleibenden Reaktion des Fahrers auf die Kreuzung bzw. Vorfahrtsregelung ausreicht, um Unfälle mit dem Querverkehr zu vermeiden²³², während eine ausbleibende/falsche Reaktion auf vorfahrtsberechtigten Querverkehr üblicherweise erst nach dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt erkennbar ist.

Die Unfalldaten lassen anhand der codierten Hauptunfallursache keine Unterscheidung zwischen den Unfallszenarien „ausbleibende Reaktion auf VA“ und „keine/falsche Reaktion auf Querverkehr“ zu²³³. Um die Bedeutung eines Teileingriffs auf das Unfallvermeidungspotential eines Einbiege-/Kreuzenassistenten abschätzen zu können, erfolgt für entsprechende Unfalldaten eine Untersuchung der Ausgangsgeschwindigkeit des wartepflichtigen Fahrzeugs²³⁴.

Da der letztmögliche Warnzeitpunkt unfallindividuell erfassbar ist, erfolgt vereinfachend ein Vergleich zwischen der Ausgangsgeschwindigkeit v_0 und der Geschwindigkeit, bei der 50% der Fahrer während eines Anhaltevorgangs die Kurve des letztmöglichen Warnzeitpunktes schneiden. Diese Geschwindigkeit, im Folgenden als $v_{Warn,50}$ bezeichnet, ergibt sich anhand der Fahrerverhaltensanalyse zu ca. 21 km/h²³⁵. Für Unfalldaten mit $v_0 \geq v_{Warn,50}$ wird vereinfachend die Vermeidbarkeit des Unfalls

²³¹ Zu berücksichtigen ist, dass es sich bei der kritischen Fehlerkennungsrate von 2,5% lediglich um einen angenommenen Wert handelt, da der reale Wert von der gewählten Warn-/Eingriffsstrategie beeinflusst wird, vgl. Kapitel 4.2.1. Durch Anpassung des Grenzwerts $a_{nec,min}$ (bei Verwendung des Kriteriums $a_{nec} < a_{nec,min}$) ist Hypothese H4 jedoch auch für Fehlerkennungsrate bis etwa 1% falsifiziert.

²³² Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.1.7 vorgestellten Arbeitshypothesen.

²³³ Dies erhobenen Unfallursachen unterscheiden nicht zwischen den entsprechenden Unfallszenarien, für eine Liste der codierten Ursachen vgl. OTTE; NEHMZOW (2002): *Codierungs-Katalog zur Dokumentation von Verkehrsunfällen* S. 10f.

²³⁴ Die Ausgangsgeschwindigkeit bezeichnet die Fahrgeschwindigkeit vor Erkennen der Gefahr. Sie ist durch Unfallrekonstruktion, Schätzung oder Teilberechnung bestimmt, vgl. OTTE; NEHMZOW (2002): *Codierungs-Katalog zur Dokumentation von Verkehrsunfällen* S. 313f.

²³⁵ Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.1.7 vorgestellten Arbeitshypothesen wird für sämtliche im Rahmen der Fahrerverhaltensanalyse aufgezeichneten Annäherungsfahrten untersucht, bei welcher Geschwindigkeit erstmals die Bedingung $d = v^2/2a_{Brems} + v * t_R$ erfüllt ist (an dieser Stelle schneidet der Geschwindigkeitsverlauf die Kurve des letztmöglichen Warnzeitpunkts). $v_{Warn,50}$ bezeichnet den Median dieser Geschwindigkeit.

durch eine Warnung angenommen, unterhalb dieser Grenzggeschwindigkeit scheinen zusätzliche Maßnahmen wie der beschriebene Teileingriff erforderlich.

Da die Kurve des letztmöglichen Warnzeitpunktes bei Teileingriff in der Mehrzahl der selbständigen Anhaltvorgänge nicht geschnitten wird, kann auf die Einführung einer weiteren Mindestgeschwindigkeit für den Teileingriff verzichtet werden. Jedoch zeigt die Auswertung abgebrochener Haltvorgänge, dass sich auch durch Einsatz eines Teileingriffs nicht alle zusätzlichen Vorfahrtsmissachtungen vermeiden lassen.

Einzeln aufgeführt werden zudem Unfälle, die sich als Folge von Anfahren aus dem Stillstand ereignen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4.15.

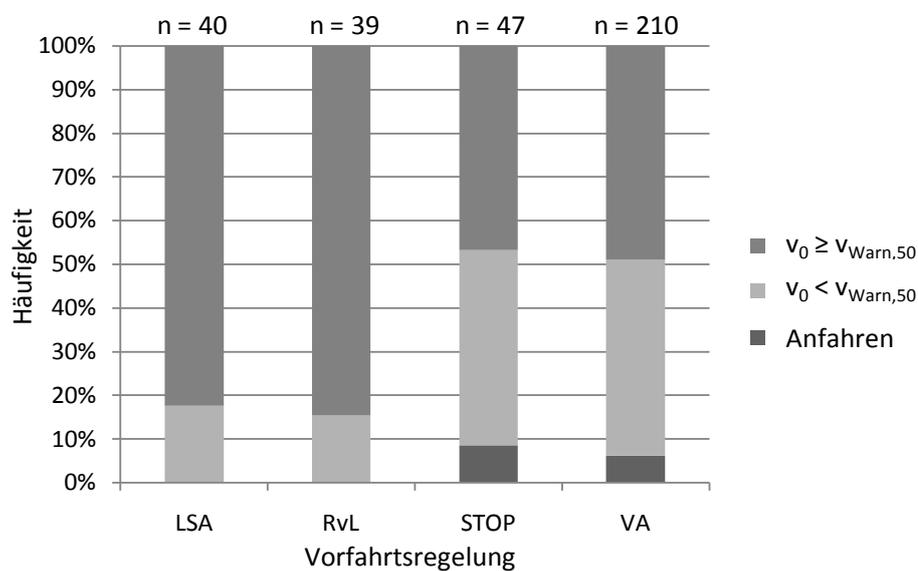


Abbildung 4.15: Anteil der Unfälle mit verschiedenen Ursprungsgeschwindigkeiten am Unfallgeschehen im Kreuzungsbereich²³⁶

Es fällt auf, dass sich Unfälle an LSA und RvL vorwiegend mit Ursprungsgeschwindigkeiten oberhalb von $v_{Warn,50}$ ereignen, während sich etwa die Hälfte der Unfälle an STOP-Schild- und VA-geregelten Kreuzungen mit Ursprungsgeschwindigkeiten kleiner $v_{Warn,50}$ zuträgt. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass ein wesentlicher Teil der Kollisionen beim Einbiegen/Kreuzen (auch in Anbetracht der hohen Unfallzahlen an VA im Vergleich zu anderen Vorfahrtsregelungen) durch die Verwendung reiner Warn-elemente nicht vermeidbar ist.

Zusätzlich zeigt sich, dass Kollisionen in Folge von Anfahren aus dem Stillstand mit weniger als 10% einen vergleichsweise geringen Anteil am Unfallgeschehen haben.

²³⁶ Dargestellt sind nur Unfälle mit codierter Ursprungsgeschwindigkeit, Unfalldaten aus GIDAS, Stand: Juni 2005.

4.2.4 Einfluss der Reaktionszeit

Die bisherigen Betrachtungen gehen bei der Berechnung des spätestmöglichen Warnzeitpunktes von einer konstanten Reaktionszeit von 1 s aus²³⁷. Allerdings ist die Reaktionszeit nicht konstant und durch die Wahl der Warnelemente beeinflussbar. Sie lässt sich bspw. durch haptische Warnelemente reduzieren, wenn der Fahrer das haptische Feedback intuitiv der Situation zuordnen kann²³⁸. Bei akustischen Warnelementen beeinflusst u.a. der Warnton selbst die Reaktionszeit. So erhalten CHENG ET. AL. für verschiedene Warntöne signifikant unterschiedliche Reaktionszeiten mit einer durchschnittlichen Differenz von 0,18 s²³⁹.

HOFFMANN & WINNER vergleichen verschiedene Warnelemente hinsichtlich Reaktionszeit und Wirksamkeit als Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Es zeigt sich, dass die Verwendung eines sogenannten Auditory Icons als akustische Warnung verglichen mit einer Kombination aus Warnsymbol und Sitzvibration zu einer Verringerung der Reaktionszeit von durchschnittlich 0,21 s führt. Aufgrund dieser verringerten Reaktionszeit wird in Versuchen bei Verwendung des Auditory Icons eine ähnliche Wirksamkeit zur Verminderung von Frontalkollisionen (gemessen als Verringerung der Geschwindigkeit vor der Kollision) erreicht wie bei Einsatz eines Teileingriffs²⁴⁰.

Da der letztmögliche Warnzeitpunkt das zu erwartende Unfallvermeidungspotential warnender bzw. teileingreifender Assistenzsysteme direkt beeinflusst, wird im Folgenden untersucht, welchen Einfluss eine Variation der angenommenen Reaktionszeit auf die Wirksamkeit entsprechender Maßnahmen hat. Es erfolgt eine Variation der Reaktionszeit von $\pm 0,2$ s, entsprechend dem in der Literatur genannten Einfluss geeigneter Warnelemente auf die Reaktionszeit²⁴¹.

Die verfügbare Reaktionszeit bei Erkennung einer ersten Reaktion des Fahrers auf die Kreuzung bzw. Vorfahrtsregelung ist für alle im Rahmen der Fahrversuche aufgezeichneten Kreuzungsannäherungen größer als 1 s, für über 95% der Annäherungsfahrten ist

²³⁷ vgl. die Arbeitshypothesen zum Anhalteweg, Kapitel 4.1.7.

²³⁸ vgl. LLOYD ET AL. (1996): *Driver-Vehicle Interface (DVI) Design Issues Of An Intersection Collision Avoidance (ICA) System*.

²³⁹ vgl. CHENG ET AL. (2002): *Analysis of Driver Response to Collision Warning During Car Following* S. 231-237.

²⁴⁰ Als Auditory Icon wird das Geräusch von Reifenquietschen eingespielt. Bei dem untersuchten Teileingriff handelt es sich um einen Bremsruck mit -5m/s^2 für 0,5s, vgl. HOFFMANN; WINNER (2008): *EVITA – Das Untersuchungswerkzeug für Gefahrensituationen*.

²⁴¹ vgl. die aufgeführten Untersuchungsergebnisse von CHENG ET. AL. bzw. HOFFMANN & WINNER.

sie größer als 2 s ²⁴². Eine ausbleibende Reaktion des Fahrers ist in dieser Situation somit auch für die variierten Reaktionszeiten $t_R = 0,8\text{ s}$ bzw. $1,2\text{ s}$ üblicherweise durch eine reine Fahrerwarnung vermeidbar.

Im Gegensatz dazu zeigt sich für die Erkennung abgebrochener Bremsvorgänge während der Kreuzungsannäherung, dass insbesondere das Potential warnender Systeme von einer verkürzten Reaktionszeit profitiert. Abbildung 4.16 stellt die Eingriffsmöglichkeiten zum Zeitpunkt der Fahrerabsichtserkennung für unterschiedliche Reaktionszeiten dar. Für das Kriterium der abnehmenden Verzögerung steigt der Anteil der durch eine Warnung vermeidbaren Kollisionen für $t_R = 0,8\text{ s}$ auf etwa 30%, während sich für $t_R = 1,2\text{ s}$ ein Anteil von etwa 10% ergibt.

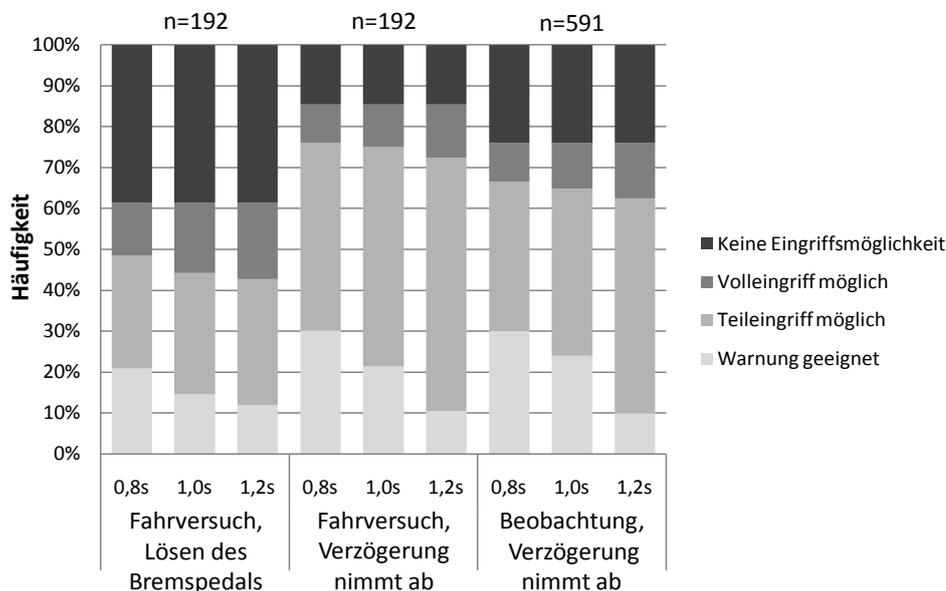


Abbildung 4.16: Eingriffsmöglichkeit bei Abbruch des Bremsvorgangs für unterschiedliche Reaktionszeiten

Auch das Potential der um einen Teileingriff erweiterten Akutwarnung steigt, jedoch nicht in dem Maße, wie es für eine reine Warnung der Fall ist. Der Anteil rechtzeitig erkennbarer Gefahrensituationen variiert lediglich um ca. 5% zwischen den angenommenen Reaktionszeiten $t_R = 0,8 \dots 1,2\text{ s}$. Das Potential des autonomen Volleingriffs zur Unfallvermeidung wird durch die Reaktionszeit nicht beeinflusst.

Der Vergleich des Anhaltewegs für unterschiedliche Reaktionszeiten mit dem Anhalteweg bei Teilwarnung zeigt, warum der Teileingriff bei der Einbiege-/Kreuzenassistenz im Gegensatz zur Vermeidung von Auffahrunfällen²⁴³ ein offensichtlich höheres

²⁴² vgl. Abbildung 4.10 in Kapitel 4.2.2.

²⁴³ vgl. HOFFMANN; WINNER (2008): *EVITA – Das Untersuchungswerkzeug für Gefahrensituationen*.

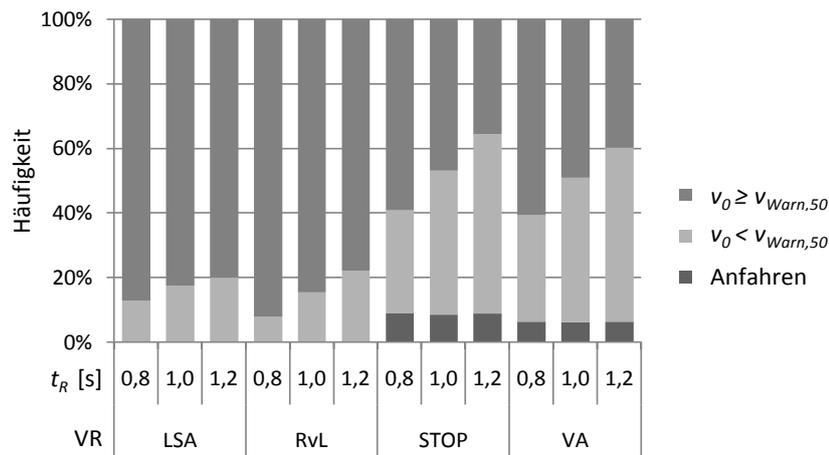


Abbildung 4.18: Anteil der Unfälle mit verschiedenen Ursprungsgeschwindigkeiten am Unfallgeschehen im Kreuzungsbereich – Variation der angenommenen Reaktionszeit²⁴⁵

Es zeigt sich, dass eine Variation der angenommenen Reaktionszeit kaum Einfluss auf die Verteilung der Unfallhäufigkeit an LSA-geregelten und unbeschilderten Kreuzungen hat, die überwiegende Mehrzahl der Unfälle ereignet sich bei Ursprungsgeschwindigkeiten, bei denen die Kollisionsvermeidung durch warnende Maßnahmen möglich scheint. An VA- und STOP-Schild-geregelten Kreuzungen hingegen ist ein deutlicher Anstieg der Unfälle feststellbar, die durch eine reine Warnung nicht vermeidbar sind. Dieser Anteil nimmt bei Verlängerung bzw. Reduktion der Reaktionszeit um 0,2 s um etwa 10% zu bzw. ab.

Zusammenfassend ergibt sich ein quantitativer Einfluss der angenommenen Reaktionszeit auf die Ergebnisse der Kapitel 4.2.2 und 4.2.3. Die qualitativen Aussagen werden durch eine Variation der Reaktionszeit im Bereich von 0,8 s bis 1,2 s nicht beeinflusst. Dies gilt sowohl für die Hypothesen H1 bis H4 als auch für die erwartete Bedeutung des Teileingriffs im Unfallgeschehen.

4.3 Genauigkeit der Kollisionserkennung

4.3.1 Definition der Hypothesen

Neben einer ausbleibenden/falschen Reaktion des Fahrers auf die vorliegende Verkehrssituation ist die Erkennung einer Kollision notwendige Bedingung für die Aktivierung von Unfallvermeidungsmaßnahmen²⁴⁶. Da zur Bewertung der Kollisionswahrschein-

²⁴⁵ Dargestellt sind nur Unfälle mit codierter Ursprungsgeschwindigkeit, Unfalldaten aus GIDAS (Stand Juni 2005).

²⁴⁶ vgl. Kapitel 1.3.

lichkeit eine Prognose über zukünftige Fahrzustände erforderlich ist, die ihrerseits von den beteiligten Fahrern vorgegeben werden, ist die typische Streuung des Fahrerhaltens an Kreuzungen ein Maß für die erreichbare Genauigkeit bei der Fahrerhaltensprognose²⁴⁷. Als Bedingung für die Realisierbarkeit eines Einbiege-/Kreuzenassistenten gilt, dass diese Genauigkeit zum Zeitpunkt zumindest der Fahrer-Fehler-Erkennung der Gefahrenwahrnehmung des Fahrers entspricht²⁴⁸. Die Unterscheidung der Unfallszenarien anhand der Fahrerfehler²⁴⁹ führt zu den Hypothesen H5 und H6:

H5: Die Unterschiede im Fahrerverhalten lassen zum Zeitpunkt der Erkennung ausbleibender Fahrerreaktionen auf die Kreuzung bzw. Vorfahrtsregelung (vor dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt) keine Aussage über die Kollisionswahrscheinlichkeit mit hinreichender Genauigkeit zu.

H6: Die Unterschiede im Fahrerverhalten lassen zum Zeitpunkt der Erkennung einer ausbleibenden bzw. falschen Reaktion auf vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer im Querverkehr (vor dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt) keine Aussage über die Kollisionswahrscheinlichkeit mit hinreichender Genauigkeit zu.

Die beschriebene, hinreichende Genauigkeit der Kollisionswahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Anforderung, dass die Gefahrenwahrnehmung eines Kreuzungsassistenten idealerweise mit der für vergleichbare Situationen üblichen Gefahrenwahrnehmung des Fahrers übereinstimmt, vgl. Kapitel 2.2.2.

4.3.2 Vorgehen

Ungeachtet des Unfallszenarios ist zur Bewertung der zeitlichen Kollisionsgefahr zweier Fahrzeuge für einen beliebigen Punkt in der Konfliktzone die Zeitdauer zu bestimmen, die jedes Fahrzeug bis zum Erreichen dieses Punktes benötigt²⁵⁰. Eine Kollision steht bevor, wenn beide Kollisionspartner die Konfliktzone mit hoher Wahrscheinlichkeit zur selben Zeit passieren. Wird ein zeitlicher Abstand *TGZ* (für Time Gap in CollisionZone) zwischen den Fahrzeugen prognostiziert, so sinkt die Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit zunehmender *TGZ*.

²⁴⁷ Ungeachtet evtl. Abweichungen der aktuellen Zustandsgrößen, bspw. durch Sensorungenauigkeiten.

²⁴⁸ vgl. Kapitel 3.3.2.

²⁴⁹ Ausbleibende Reaktion auf die Vorfahrtsregelung bzw. keine/falsche Reaktion auf Querverkehr, vgl. Kapitel 2.4.

²⁵⁰ Voraussetzung ist die räumliche Kollisionsgefahr: die Trajektorien der Kollisionspartner schneiden sich in mindestens einem Punkt.

Beschreibt man analog zur Time-To-Collision (TTC)²⁵¹ die Zeit bis zum Eintritt eines Verkehrsteilnehmers in die Kollisionszone als Time-To-CollisionZone (TTZ) und die Zeit bis zum Verlassen der Kollisionszone als Time-Leaving-CollisionZone (TLZ), so ergibt sich der zeitliche Abstand zweier Kollisionspartner A und B beim Durchfahren der Kollisionszone TGZ_{AB} zu:

$$TGZ_{AB} = \begin{cases} TTZ_A - TLZ_B, & \text{wenn } TTZ_A > TLZ_B \\ TTZ_B - TLZ_A, & \text{wenn } TTZ_B > TLZ_A \\ 0, & \text{wenn } (TTZ_A \leq TLZ_B \wedge TTZ_B \leq TLZ_A) \end{cases} \quad (4.8)$$

Da sich die Genauigkeitsanforderungen nicht auf die TGZ , sondern auf die Differenz der TTI , im Folgenden als TGI bezeichnet (für Time-Gap in Intersection), beziehen, wird die zu erwartende Ungenauigkeit dieser Differenz bestimmt. Sie ergibt sich zu

$$\Delta TGI_{AB} = \Delta TTI_A + \Delta TTI_B \quad (4.9)$$

Die unabhängig von der Prognosemethode²⁵² erreichbare Genauigkeit ergibt sich aus der Streuung der entsprechenden Zeiten. Daher wird im Folgenden für die Manöver Kreuzen und Einbiegen die Streuung der tatsächlichen Zeiten (ΔTTI_{real}) bestimmt.

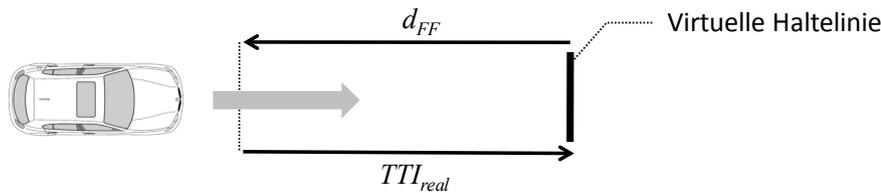


Abbildung 4.19: Vorgehen bei der Bestimmung der Zeiten TTI_{real}

Abbildung 4.19 veranschaulicht das Vorgehen. Der dargestellte Abstand d_{FF} kennzeichnet die geschwindigkeitsabhängige Position, für die die Erkennung von Fahrerfehlern möglich ist. Er ergibt sich zu

$$d_{FF} = v * TTI_{FF} \quad (4.10)$$

Ausgehend von dieser Position werden die tatsächlich erforderlichen Zeiten bis zum Erreichen der Kreuzung bzw. bis zum Verlassen der Kollisionszone bestimmt.

Hypothese H5 behandelt ΔTGI für Situationen, in denen zum Zeitpunkt der erwartungsgemäß ersten Fahrerreaktion des wartepflichtigen Verkehrsteilnehmers auf die Kreuzung

²⁵¹ Die TTC dient als Maß für die Kritikalität bevorstehender Auffahrunfälle, vgl. bspw. LEE; PENG (2005): *Evaluation Of Automotive Forward Collision Warning And Collision Avoidance Algorithms* S. 735-751.

²⁵² Einfache Möglichkeiten der Zeitprognose, bspw. für kreuzende, vorfahrtsberechtigzte Verkehrsteilnehmer, basieren auf der Annahme konstanter Fahrzustandsgrößen wie Geschwindigkeit oder Beschleunigung.

zung keine entsprechende Reaktion feststellbar ist. Das kennzeichnende Unfallszenario entsteht durch Nicht-Wahrnehmen der Kreuzung oder durch eine Fehlinterpretation der Vorfahrtsregelung. Die TTI_{FF} ergibt sich aus den Untersuchungen des Bremsbeginns bei Annäherung an die Kreuzung²⁵³. Einer Untersuchung der TTI bei Bremsbeginn ergibt, dass die TTI_{BB} für 95% aller Kreuzungsannäherungen keine Werte unter 2,7 s einnimmt. Daher wird das Unterschreiten dieser TTI ohne Bremsengriff als hinreichendes Kriterium für eine Vorwarnung (VW) gewählt, es gilt $TTI_{FF,VW} = 2,7$ s.

Als hinreichendes Kriterium zum Auslösen eines Teileingriffs wird das Erreichen des letztmöglichen Warnzeitpunktes ohne Bremsbetätigung herangezogen²⁵⁴. Für alle untersuchten Kreuzungsannäherungen an VA liegt eine Bremsbetätigung vor. Daher wird untersucht, bei welcher TTI der letztmögliche Warnzeitpunkt erreicht würde, falls sich das Fahrzeug mit Ursprungsgeschwindigkeit weiterbewegt hätte. So ergibt sich für den Teileingriff (Teil) eine $TTI_{FF,Teil}$ von durchschnittlich 1,4 s (Standardabweichung $< 0,1$ s).

Als Bewertungsgrundlage werden für die jeweils angegebene, charakteristische TTI bei Erreichen des Kriteriums der Vorwarnung (VW), des Teileingriffs (Teil) und des Bremsabbruchs (BA) die zu erwartenden Abweichungen ΔTTI_{real} des wartepflichtigen Ego-Fahrzeugs und eines Verkehrsteilnehmers im Querverkehr verglichen:

$$\Delta TGI_{VW} = \Delta TTI_{Ego,real}(TTI_{FF,VW}) + \Delta TTI_{QV,real}(TTI_{FF,VW}) \quad (4.11)$$

$$\Delta TGI_{Teil} = \Delta TTI_{Ego,real}(TTI_{FF,Teil}) + \Delta TTI_{QV,real}(TTI_{FF,Teil}) \quad (4.12)$$

$$\Delta TGI_{\neq A} = \Delta TTI_{Ego,real}(TTI_{FF,BA}) + \Delta TTI_{QV,real}(TTI_{FF,BA}) \quad (4.13)$$

Als zu erwartende ΔTTI_{real} wird der Interquartilsabstand²⁵⁵ der jeweiligen, tatsächlichen TTI verwendet. Die Betrachtung dieser Ungenauigkeit erscheint ausreichend, da nur für 6,25% aller Fälle mit dem Aufeinandertreffen der Bedingungen $TTI_{Ego,real} \leq TTI_{Ego,real,25}$ und $TTI_{QV,real} > TTI_{QV,real,75}$ zu rechnen ist²⁵⁶.

Hypothese H6 adressiert Unfallszenarien, die durch den Fahrerfehler bei der Berücksichtigung des Querverkehrs entstehen. Diese Fehler lassen sich erst bei Abbruch des Bremsvorgangs (BA) erkennen. Die Untersuchung der durchschnittlichen TTI zum Erkennungszeitpunkt abgebrochener Haltevorgänge führt auf $TTI_{FF,BA} = 1,3$ s. Abbildung 4.20 veranschaulicht die Herkunft der genannten Zeiten.

²⁵³ vgl. Kapitel 4.2.2.

²⁵⁴ Die Berechnung dieses Warnzeitpunktes berücksichtigt die Auswirkung des Teileingriffs auf den Anhalteweg.

²⁵⁵ Der Interquartilsabstand bezeichnet die Differenz des 75. und des 25. Perzentils einer Verteilung.

²⁵⁶ Die Verwendung des 95. bzw. 5. Perzentils würde hier auf nur 0,25% aller Fälle führen.

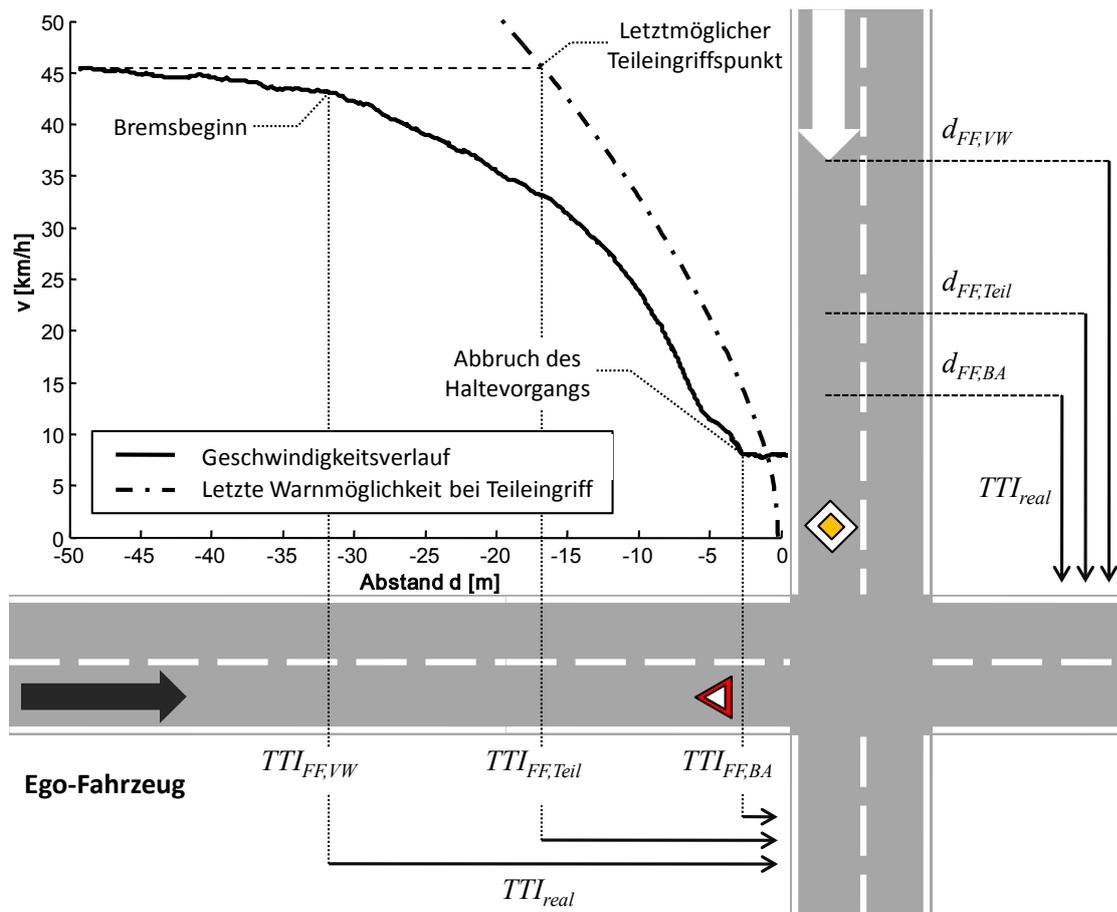


Abbildung 4.20: Die unterschiedlichen Zeiten der Fahrerfehlererkennung

Für nachfolgende Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass das Fahrerverhalten des wartepflichtigen Verkehrsteilnehmers bei ausbleibender Reaktion auf die Kreuzung dem Verhalten vorfahrtsberechtigter Fahrzeuge beim Kreuzen entspricht. Hintergrund dieser Annahme ist, dass kein Bremsengriff als Reaktion auf die Kreuzung vorliegt. Das Manöver Einbiegen umfasst jedoch auch bei vorfahrtsberechtigten Fahrzeugen üblicherweise eine Bremsbetätigung, wie die Ergebnisse in Kapitel 4.3.3 zeigen.

Das Fahrverhalten nach Bremsende ergibt sich aus der Analyse von Kreuzungsdurchfahren, in denen der Fahrer den Haltevorgang abgebrochen und die Kreuzung ohne Fahrzeugstillstand durchfahren hat.

4.3.3 Ergebnisse

Eine Betrachtung des Bremsbeginns für vorfahrtsberechtigte Fahrzeuge (Daten der Verkehrsbeobachtung) zeigt, dass das Manöver Kreuzen üblicherweise keinen Bremsen-

griff beinhaltet (92% der Messungen), während bei der überwiegenden Mehrzahl der Einbiegevorgänge vorfahrtsberechtigter Fahrzeuge ein Bremsenriff vorliegt (95%)²⁵⁷.

Diese Betrachtung liefert zudem wesentliche Erkenntnisse zur Erkennung des bevorstehenden Fahrmanövers vorfahrtsberechtigter Fahrzeuge. Der Vergleich der $TTI_{BB,QV}$ mit der TTI_{FF} für Vorwarnung bzw. Teileingriff zeigt, dass erste Bremsenriffe für einbiegenden, vorfahrtsberechtigten Querverkehr zu 45% vor einer TTI von 2,7 s und zu über 95% vor einer TTI von 1,4 s erfolgen (vgl. Abbildung 4.20).

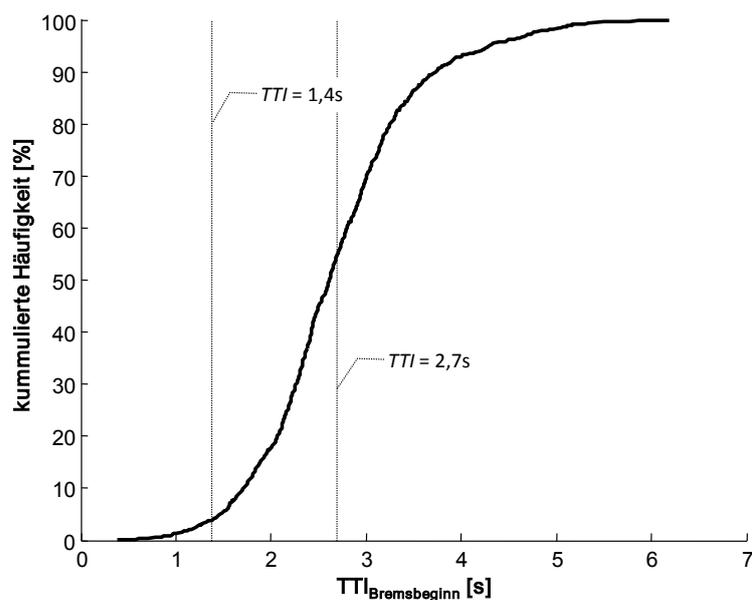


Abbildung 4.20: TTI bei Bremsbeginn für einbiegende, vorfahrtsberechtigte Fahrzeuge im QV²⁵⁸

Demnach lassen sich Einbiegemanöver für potentielle Kollisionspartner im Querverkehr zum Zeitpunkt der Vorwarnung in etwa der Hälfte der Fälle anhand des Bremsbeginns erkennen. Bei Erreichen des spätestmöglichen Teileingriffspunkts und bei Detektieren eines abgebrochenen Haltevorgangs ist diese Erkennung hingegen für 95% der Einbiegevorgänge möglich. Im Umkehrschluss kann Einbiegen mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden, wenn bei einer TTI_{QV} von 1,4 s kein Bremsenriff für das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug erkennbar ist. Aus diesem Grund erscheint die separierte Betrachtung der ΔTTI_{QV} für die Manöver Einbiegen und Kreuzen angebracht.

Wie in Abbildung 4.20 dargestellt, wird ΔTTI_{QV} durch den Vergleich der tatsächlichen TTI, ausgehend von den geschwindigkeitsabhängigen Abständen $d_{FF,VW}$, $d_{FF,Teil}$ und $d_{FF,BA}$, bestimmt. Der Vergleich der Interquartilsabstände der tatsächlichen TTI ergibt für den Querverkehr die in Tabelle 4.2 aufgeführten, zu erwartenden Ungenauigkeiten:

²⁵⁷ Ein Bremsenriff wird erkannt, wenn eine Verzögerung größer als 1m/s^2 vorliegt, vgl. Kapitel 4.4.1.1.

²⁵⁸ Eine Unterscheidung zwischen Rechtseinbiegen und Linkseinbiegen erfolgte nicht.

Tabelle 4.2: ΔTTI_{QV} für die Vorwarnung bzw. den Teileingriffs und zum Zeitpunkt der Erkennung eines abgebrochenen Bremsvorgangs

Situation	Kreuzen	Einbiegen
Vorwarnung ($TTI_{FF} = 2,7$ s)	0,3 s	0,6 s
Teileingriff ($TTI_{FF} = 1,4$ s)	0,1 s	0,5 s
Abbruch Bremsung ($TTI_{FF} = 1,3$ s)	0,1 s	0,5 s

Es zeigt sich, dass die Abweichungen beim Einbiegen jeweils größer sind als beim Kreuzen. Inwieweit durch eine Unterscheidung der Manöver Links- bzw. Rechts-einbiegen eine Verringerung von ΔTTI_{QV} zu erwarten ist, ist nicht bekannt.

Für die zu erwartenden Ungenauigkeiten der Fahrerfehlererkennung für Vorwarnung bzw. Teileingriff bei ungebremster Kreuzungsdurchfahrt wird, wie im vorigen Unterkapitel beschrieben, auf die Streuung des Fahrerhaltens vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer beim Kreuzen zurückgegriffen. Die Zeitdauer, die zwischen Abbruch des Haltevorgangs und Eintritt des Ego-Fahrzeugs in die Kreuzung vergeht, wird aus den Messdaten der Probandenversuche bestimmt und mit der prognostizierten TTI verglichen. Abbildung 4.21 stellt als Ergebnis die Differenz von tatsächlicher und berechneter TTI für alle abgebrochenen Anhaltevorgänge der Probandenversuche dar.

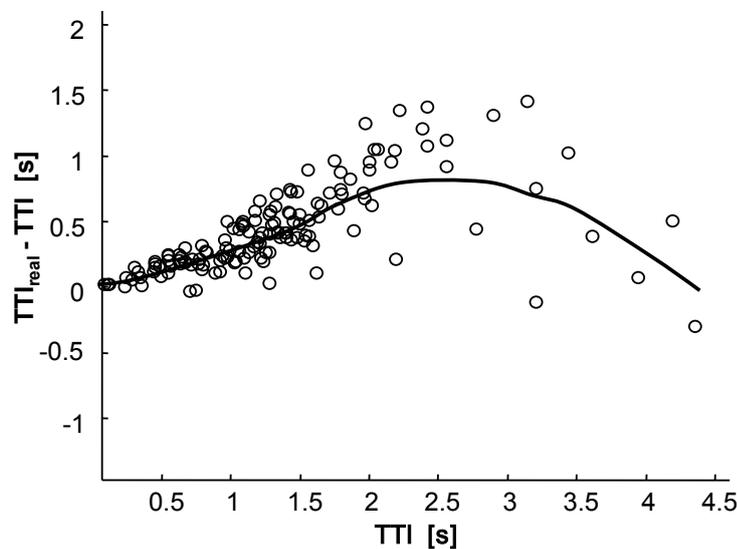


Abbildung 4.21: Abweichung zwischen tatsächlicher und prognostizierter TTI bei Abbruch des Bremsvorgangs – jede Markierung entspricht einem Anhaltevorgang. Zusätzlich ist der geglättete Verlauf der Verteilung dargestellt²⁵⁹.

Bei sehr geringer TTI ist die Differenz $TTI_{real} - TTI$ erwartungsgemäß ebenfalls klein. Mit zunehmender TTI vergrößert sich auch die Streuung der Werte. Interessant erscheint

²⁵⁹ Erzeugt über einen Moving-Average-Tiefpass.

in diesem Zusammenhang der geglättete Verlauf, der darauf hindeutet, dass die durchschnittliche Differenz aus tatsächlicher und prognostizierter TTI mit steigender TTI zunächst ansteigt, um ab einer TTI von etwa 2,5 s wieder zu fallen.

Eine mögliche Ursache für diese Tendenz liefert das Fahrerverhalten nach Abbruch des Anhaltevorgangs. Vergeht zwischen der Verringerung der Verzögerung (als Kriterium für den Abbruch des Bremsvorgangs) und der Betätigung des Fahrpedals eine Umsetzzeit, innerhalb der die Fahrgeschwindigkeit sinkt²⁶⁰, führt dies zu einem Anstieg der tatsächlichen TTI . Das Beschleunigen des Fahrzeugs nach Ablauf der Umsetzzeit und der resultierende Anstieg der Geschwindigkeit verringert die tatsächliche TTI . Diese Aussage lässt sich wegen der geringen Anzahl aufgezeichneter Bremsabbrüche bei größerer TTI nicht statistisch belegen.

Ohne Berücksichtigung dieser Kurve ergibt sich der Interquartilsabstand der dargestellten Differenz ($TTI_{Ego,real} - TTI_{Ego}$) zu 0,3 s für das Manöver Kreuzen respektive 0,4 s beim Einbiegen. Tabelle 4.3 fasst die zu erwartenden Ungenauigkeiten für das wartepflichtige Fahrzeug zusammen.

Tabelle 4.3: ΔTTI_{Ego} für die Vorwarnung bzw. den Teileingriffs und zum Zeitpunkt der Erkennung eines abgebrochenen Bremsvorgangs

Situation	Kreuzen	Einbiegen
Vorwarnung ($TTI_{FF} = 2,7$ s)	0,3 s	-
Teileingriff ($TTI_{FF} = 1,4$ s)	0,1 s	-
Abbruch Bremsung TTI_{FF}	0,3 s	0,4 s

Die zu erwartenden Ungenauigkeiten der TGI für die genannten Szenarien, jeweils für die Manöver mit der höchsten zu erwartenden Ungenauigkeit, zeigt Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4: ΔTGI – berechnet zum Zeitpunkt der Erkennung hinreichender Kriterien für die Aktivierung einer Vorwarnung bzw. eines Teileingriffs und zum Zeitpunkt der Erkennung abgebrochener Anhaltevorgänge

Situation	ΔTGI
Vorwarnung ($TTI_{FF} = 2,7$ s)	0,9 s
Teileingriff ($TTI_{FF} = 1,4$ s)	0,6 s
Abbruch Bremsung TTI_{FF}	1,0 s

Zusammenfassend zeigt sich, dass die zu erwartenden Ungenauigkeiten der zeitlichen Fahrerverhaltensprädiktion für zwei potentielle Kollisionspartner beim Einbiegen und Kreuzen in dem vom Fahrer für eine Warnung akzeptierten, zeitlichen Abstand von

²⁶⁰ u.a. durch Restverzögerung und Motorschleppmoment.

± 1 s liegen²⁶¹. Die Bedingung $\Delta TGI \leq 2$ s ist für alle untersuchten Szenarien erfüllt, die Hypothesen H5 und H6 sind somit falsifiziert.

4.4 Einflussparameter

Das Fahrerverhalten an Kreuzungen wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst²⁶². Im Folgenden wird untersucht, inwieweit ein Einfluss des Fahrmanövers (Kreuzen, Rechtseinbiegen oder Linkseinbiegen) sowie der Kreuzungsparameter Sichtbehinderung und Vorfahrtsregelung (VA oder STOP) auf den Annäherungsvorgang vorliegt. Die Untersuchung basiert auf der universellen Hypothese, dass sich durch Variation jeweils eines der genannten Einflussfaktoren keine signifikanten Unterschiede im Annäherungsverhalten an Kreuzungen ergeben.

4.4.1 Beschreibung der Kriterien

4.4.1.1 Beginn der Reaktion auf die Kreuzung

Zur Untersuchung des Einflusses der genannten Parameter auf das Fahrerverhalten werden verschiedene Kriterien definiert. Als Kriterium für die erste Reaktion auf die Kreuzung wird der Beginn des Bremsvorgangs verwendet. Zum Zeitpunkt der ersten Bremsbetätigung werden die Größen TTI_{BB} und $a_{nec, BB}$ bestimmt. Beide Größen beschreiben indirekt die Dringlichkeit der Fahrerreaktion. $a_{nec, BB}$ beschreibt die betragsmäßig mindestens erforderliche Verzögerung, um ein Einfahren in die Kreuzung zu vermeiden. Die TTI_{BB} gibt die Zeit bis zum Erreichen der Kreuzung bei ausbleibender Reaktion des Fahrers an. Sie erlaubt zudem einen Vergleich mit anderen Untersuchungen des Fahrerverhaltens²⁶³ und die Abschätzung des Zeitpunkts der Fahrerentscheidung²⁶⁴.

²⁶¹ vgl. entsprechende Erkenntnisse der Vorversuche in Kapitel 2.2.2

²⁶² Kreuzungseigenschaften beeinflussen bspw. die Größe der gerade noch akzeptierten Lücken im QV, vgl. RAGLAND ET AL. (2005): *Using Field Observation Video for the Analysis of Driver Behaviors in Left-Turn Maneuvers against Oncoming Vehicles*. Das Fahrmanöver hat bspw. an LSA einen Einfluss auf den Beginn der Annäherung, vgl. LLOYD ET AL. (1997): *Using Driver Primary Control Input to Determine the Timing of Alerts and Warnings* S. 63-67.

²⁶³ Es liegen in der Literatur bspw. Vergleiche der TTI_{BB} für unterschiedliche Manöver an STOP oder Vergleich des Verhaltens an VA und RvL vor, vgl. u.a. LLOYD ET AL. (1997): *Using Driver Primary Control Input to Determine the Timing of Alerts and Warnings* S. 63-67, VAN DER HORST (1991): *Video Analysis Of Road User Behaviour At Intersections* S. 93-109 oder ROHRMÜLLER (2007): *Prädiktion des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Trajektorien bei der Kreuzungsassistenz* S. 28ff.

Der Bremsbeginn ergibt sich für die durchgeführten Probandenversuche über das Signal des Bremslichtschalters. Für die Verkehrsbeobachtung wird der Anstieg der Verzögerung auf Werte größer 1 m/s^2 als Bremsbeginn interpretiert²⁶⁵.

4.4.1.2 Der Bremsvorgang

Um den Einfluss der genannten Parameter auf den Bremsvorgang zu analysieren, werden für alle Annäherungsvorgänge die maximal erforderliche Verzögerung $a_{nec,min}$ und die minimale TTI während der Annäherung analysiert. Der Verlauf von TTI und a_{nec} ist in Abbildung 4.22 dargestellt.

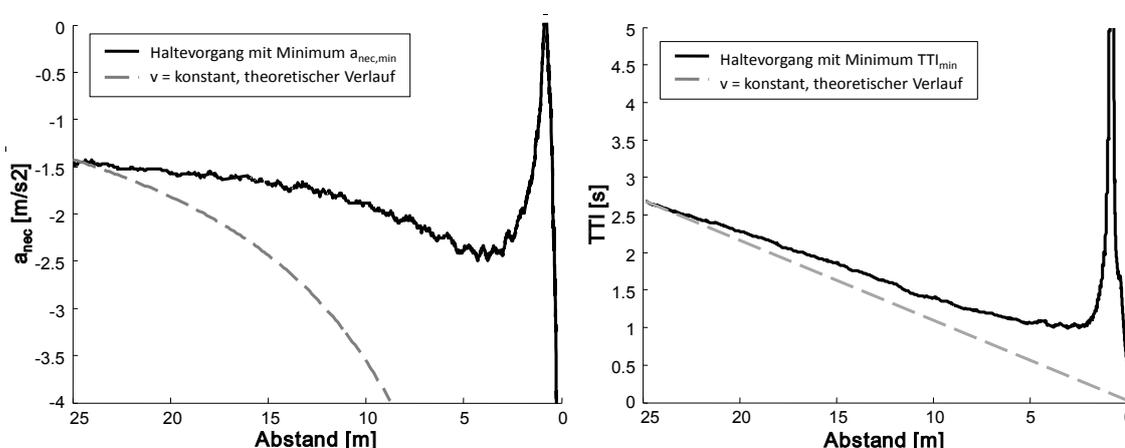


Abbildung 4.22: Exemplarischer Verlauf von a_{nec} und TTI

Bei Anhaltevorgängen ist a_{nec} zum Zeitpunkt des Stillstands null. Für $d = 0$ weist a_{nec} eine Singularität auf und läuft gegen negativ unendlich. Die TTI läuft bei Fahrzeugstillstand gegen positiv unendlich, beim Einfahren in die Kreuzung erreicht sie den Wert null. Die Lage eines Minimums für die erforderliche Verzögerung a_{nec} ist von dem Verlauf der Beschleunigung des Fahrzeugs während der Annäherung abhängig. Für

$$a_{nec} = -\frac{v^2}{d} \quad (4.14)$$

²⁶⁴ Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Dauer für das Lösen des Fahr- und Betätigen des Bremspedals von etwa 0,6s und einer Ansprechzeit des Bremssystems von etwa 0,4 s ergibt sich, dass die Fahrerentscheidung, den Bremsvorgang zu beginnen, ca. 1 s vor dem tatsächlichen Bremsbeginn erfolgt, vgl. VAN DER HORST (1991): *Video Analysis Of Road User Behaviour At Intersections* S. 106 zitiert MALATERRE ET AL. (1987): *L'Estimation des Manoeuvres réalisables en situation d'urgence au volant d'une automobile* bzw. GLENCROSS; ANDERSON (1976): *Operator Response Factors in the Location and Control of Foot Pedals* S. 399-408.

²⁶⁵ Verzögerungen bis 1 m/s^2 werden dem Motorschleppmoment zugeschrieben, vgl. VAN DER HORST (1991): *Video Analysis Of Road User Behaviour At Intersections* S. 93-109.

ergibt sich durch Ableiten Gleichung 4.15:

$$\frac{\partial a_{nec}}{\partial t} = -\frac{2dva - v^3}{d^2} \quad (4.15)$$

Die Bedingung

$$\frac{\partial a_{nec}}{\partial t} = 0 \quad (4.16)$$

führt durch Umformen auf Gleichung 4.17:

$$a = -\frac{v^2}{d} = a_{nec} \quad (4.17)$$

Identisches Vorgehen für die TTI

$$TTI = \frac{d}{v} \quad (4.18)$$

ergibt die Ableitung

$$\frac{\partial TTI}{\partial t} = \frac{v^2 - da}{v^2} \quad (4.19)$$

Die Bedingung

$$\frac{\partial TTI}{\partial t} = 0 \quad (4.20)$$

liefert durch Umformen erneut

$$a = -\frac{v^2}{d} = 2a_{nec} \quad (4.21)$$

Somit ergibt sich ein Minimum $a_{nec,min}$ immer dann, wenn die Beschleunigung von $a > a_{nec}$ auf $a < a_{nec}$ sinkt. Minima im Verlauf der TTI liegen vor, wenn die Beschleunigung auf Werte kleiner als $2a_{nec}$ sinkt.

4.4.1.3 Ende des Anhaltevorgangs

Die Untersuchung des Fahrerverhaltens zeigt, dass für alle Annäherungsfahrten an VA-Kreuzungen zunächst eine Bremsbetätigung vorliegt. Die Fahrerentscheidung, eine Kreuzung ohne Stillstand zu durchfahren, äußert sich in diesen Situationen in einem Abbruch des Bremsvorgangs²⁶⁶. Um insbesondere den Einfluss der Sichtbehinderung

²⁶⁶ vgl. Kapitel 4.2.2.

auf diese Entscheidung zu analysieren, wird der Abstand zur virtuellen Haltelinie bei Abbruch des Bremsvorgangs d_{BA} bestimmt. Ein Bremsvorgang wird analog zu den Betrachtungen in Kapitel 4.2 als abgebrochen interpretiert, wenn eine positive Ableitung der Beschleunigung vorliegt.

Für vollständige Anhaltevorgänge wird der Abstand zwischen Anhaltepunkt und virtueller Haltelinie untersucht. Da an VA-Kreuzungen kein präzise definierter Haltepunkt vorgegeben ist, verwenden alle bisherigen Betrachtungen die virtuelle Haltelinie als Bezugspunkt²⁶⁷. Überfährt ein Fahrzeug die virtuelle Haltelinie nur um wenige Zentimeter (weil bspw. die Sicht durch Bebauung oder parkende Fahrzeuge stark eingeschränkt und an der virtuellen Haltelinie keine Beurteilung des QV möglich ist), so überschreitet die erforderliche Verzögerung den angegebenen Grenzwert. Ohne Zusatzkriterien führt dies fälschlicherweise zur Erkennung der Fahrerabsicht „Fahren“. Um derartige False Positives zu vermeiden, wird untersucht, ob die betrachteten Einflussfaktoren zu einer Verschiebung des Anhaltepunkts führen.

4.4.2 Ergebnis

Die Untersuchung der Auswirkungen eines Einflussparameters erfolgt jeweils unter konstanten Bedingungen für die übrigen Parameter. Dies bedeutet, dass der Einfluss der Sichtbehinderung für jede Kombination aus Manöver und Vorfahrtsregelung einzeln zu prüfen ist. Für die Einflussparameter Vorfahrtsregelung und Fahrmanöver wird analog vorgegangen. Somit ergeben sich unter Berücksichtigung der Variationsmatrix²⁶⁸ 12 unterschiedliche Situationen, was zu insgesamt 24 Paarvergleichen²⁶⁹ mit 6 Unterscheidungskriterien führt.

Wegen der hohen Anzahl entsprechender Berechnungen wird im Folgenden das Vorgehen einmalig vorgestellt, anschließend werden die Ergebnisse in Tabellenform zusammengefasst. Signifikante Ergebnisse werden im Anschluss gesondert diskutiert.

Die Prüfung auf Unterschiede zwischen den einzelnen Verteilungen geschieht anhand eines Paarvergleichs auf signifikante Abweichungen der Mittelwerte. Vor der Durchführung der Paarvergleiche wird getestet, ob die Stichproben einer normalverteilten Gesamtheit angehören. Hierzu wird der Kolmogorov-Smirnov-Test²⁷⁰ angewendet.

²⁶⁷ vgl. Abbildung 3.3 in Kapitel 3.3.1.

²⁶⁸ vgl. Abbildung 4.6 in Kapitel 4.1.5.

²⁶⁹ Je Kombination aus VR und Sichtbehinderung 3 Vergleiche der Manöver (12) plus je Kombination aus Manöver und VR ein Vergleich der Sichtbehinderung (6) plus je Kombination aus Manöver und Sichtbehinderung ein Vergleich der VR (6).

²⁷⁰ vgl. LEHN; WEGMANN (2004): *Einführung in die Statistik* S. 102-105.

Liegen für ein Kriterium normalverteilte Stichproben mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ vor, erfolgt die Anwendung des t-Tests für ungepaarte Stichproben²⁷¹. Der t-Test prüft, ob zwei normalverteilte Stichproben aus einer Population mit identischen Mittelwerten stammen²⁷². Sind die Stichproben nicht normalverteilt, wird der Mann-Whitney-U-Test angewendet, mit dem geprüft werden kann, ob sich die untersuchten Stichproben in ihrer Lage unterscheiden²⁷³. Die Statistiktests erfolgen mit der Programmierumgebung Matlab²⁷⁴. Das Ergebnis wird für jeden Vergleich in Form des entsprechenden Signifikanzniveaus angegeben.

Die Resultate der Probandenversuche und der Verkehrsbeobachtung werden einzeln betrachtet. Die im Rahmen der Probandenversuche aufgezeichneten Kreuzungsfahrten decken nicht die gesamte Variationsmatrix ab. Es ergeben sich jeweils an STOP-Schildgeregelten Kreuzungen Lücken für das Kreuzen bei mittlerer Sichtbehinderung und für das Rechtseinbiegen bei starker Sichtbehinderung. Abbildung 4.23 stellt die Anzahl der untersuchten Kreuzungssituationen dar.

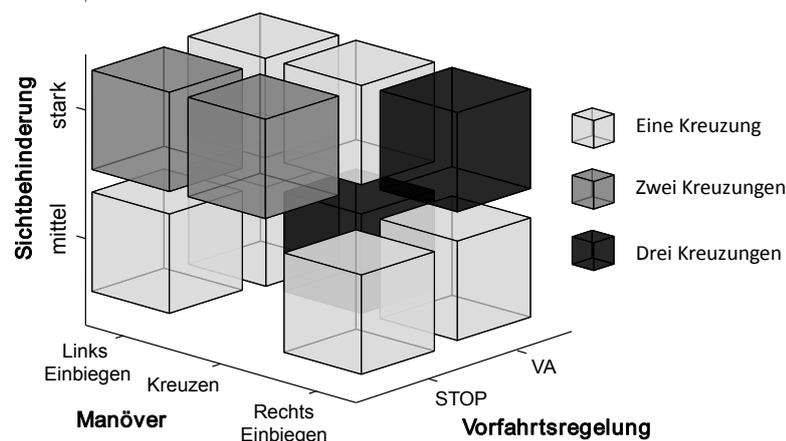


Abbildung 4.23: Variationsmatrix für Probandenversuche – Anzahl entsprechender Kreuzungen

Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst²⁷⁵. Signifikante und tendenzielle Unterschiede (ab einem Signifikanzniveau kleiner 0,05 bzw. 0,1) sind dunkel- bzw.

²⁷¹ Da nicht jede Versuchsfahrt an allen Kreuzungen auswertbar ist (vgl. Kapitel 4.1.3), liegt mitunter eine unterschiedliche Anzahl von Kreuzungsdurchfahrten vor. Es handelt es sich also nicht um gepaarte Stichproben.

²⁷² vgl. BORTZ (2005): *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* S.136 – 146.

²⁷³ vgl. LEHN; WEGMANN (2004): *Einführung in die Statistik* S. 170-173.

²⁷⁴ Verwendet werden die Funktionen `kstest`, `ttest2` und `ranksum`.

²⁷⁵ Legende der verwendeten Abkürzungen in den Ergebnistabellen: Sicht = Grad der Sichtbehinderung, st.S = starke Sichtbehinderung, m.S = mittlere Sichtbehinderung, M = Manöver, X = Kreuzen, R = Rechtseinbiegen, L = Linkseinbiegen, MW = Mann-Whitney-U-Test, T = t-Test, $xe^{-n} = x \cdot 10^{-n}$.

hellgrau hinterlegt. Wegen der genannten Lücken in der Variationsmatrix sind einzelne Zeilen der Ergebnistabelle nicht ausgefüllt.

Tabelle 4.5: Ergebnis der Signifikanztests der Probandenversuche

Parameter			Bremsbeginn		Bremsvorgang		Ende Annäherung	
			TTI _{BB}	a _{nec,BB}	TTI _{min}	a _{nec,min}	d _{BA}	d _{Halt}
Einfluss	konstant		Test	α	Test	α	Test	α
Sicht	VA,	X	MW 0.978	MW 0.366	MW 0.300	T 0.831	MW 0.008	MW 0.133
Sicht	VA,	R	MW 0.692	MW 0.750	MW 0.643	T 0.818	MW 0.049	MW 0.090
Sicht	VA,	L	MW 0.267	MW 0.135	MW 0.074	T 0.094	MW 0.091	MW 0.214
Sicht	STOP,	X						
Sicht	STOP,	R						
Sicht	STOP,	L	MW 0.217	MW 0.015	MW 0.065	T 0.046	MW 0.644	MW 0.727
VR	st. S,	X	MW 0.970	MW 0.568	MW 0.481	T 0.962	MW 0.248	MW 0.415
VR	st. S,	R						
VR	st. S,	L	MW 0.541	MW 0.839	MW 0.225	T 0.478	MW 0.032	MW 0.503
VR	m. S,	X						
VR	m. S,	R	MW 0.024	MW 0.570	MW 0.187	T 0.929	MW 0.514	MW 0.387
VR	m. S,	L	MW 0.071	MW 4.8e ⁻⁵	MW 0.004	T 9.5e ⁻⁵	MW 0.653	MW 0.299
M: X-R	VA,	st. S	MW 0.349	MW 0.655	MW 0.232	T 0.703	MW 0.738	MW 0.496
M: X-L	VA,	st. S	MW 0.252	MW 0.701	MW 0.957	T 0.537	MW 0.004	MW 0.379
M: L-R	VA,	st. S	MW 0.149	MW 0.989	MW 0.274	T 0.695	MW 0.367	MW 0.401
M: X-R	VA,	m. S	MW 0.681	MW 0.578	MW 0.441	T 0.654	MW 0.021	MW 0.184
M: X-L	VA,	m. S	MW 0.746	MW 0.916	MW 0.075	T 0.008	MW 3.7e ⁻⁴	MW 0.361
M: L-R	VA,	m. S	MW 0.280	MW 0.178	MW 0.420	T 0.097	MW 0.305	MW 0.104
M: X-R	STOP,	st. S						
M: X-L	STOP,	st. S	MW 0.415	MW 0.687	MW 0.393	T 0.984	MW 0.435	MW 0.387
M: L-R	STOP,	st. S						
M: X-R	STOP,	m. S						
M: X-L	STOP,	m. S						
M: L-R	STOP,	m. S	MW 6.1e ⁻⁴	MW 0.010	MW 0.002	T 0.191	MW 0.341	MW 0.512

Die im Rahmen der Verkehrsbobachtung analysierten Annäherungsvorgänge erfolgen ohne Vorgabe des Manövers. Durch die Wahl der Kreuzungen ergibt sich die in Abbildung 4.24 dargestellte Anzahl untersuchter Kreuzungen in Abhängigkeit von den Umgebungsparametern Vorfahrtsregelung und Sichtbehinderung.

Sichtbehinderung	stark	4	5
	mittel	2	5
		STOP	VA
		Vorfahrtsregelung	

Abbildung 4.24: Variationsmatrix für Verkehrsbeobachtung – Anzahl der untersuchten Kreuzungen

Für die Messdaten der Verkehrsbeobachtungsstationen erfolgt anhand der jeweiligen Objekttrajektorie eine Unterscheidung zwischen den Manövern Kreuzen und Einbiegen.

Eine weitere Unterteilung in Rechts- und Linkseinbiegen wird nicht vorgenommen. Die Ergebnisse der Verkehrsbeobachtung fasst Tabelle 4.6 zusammen. Um den Einfluss der Sichtbehinderung detaillierter untersuchen zu können, wurde an einer exemplarischen Kreuzung künstlich eine starke oder mittlere Sichtbehinderung erzeugt²⁷⁶. Die entsprechenden Ergebnisse finden sich am Ende der Tabelle (Einflussparameter Sicht-K).

Tabelle 4.6: Ergebnis der Signifikanztests der Verkehrsbeobachtung²⁷⁷

Parameter		Bremsbeginn		Bremsvorgang		Ende der Annäherung							
		TTI_{BB}	$a_{nec, BB}$	TTI_{min}	$a_{nec, min}$	d_{BA}	d_{Halt}						
Einfluss	konstant	Test	α	Test	α	Test	α	Test	α				
Sicht	VA, X	MW	0.072	MW	0.826	MW	0.542	T	0.302	MW	0.016	MW	0.470
Sicht	VA, E	MW	0.138	MW	0.597	MW	0.080	T	0.063	MW	0.084	MW	0.207
Sicht	STOP, X	MW	0.242	MW	0.370	MW	0.762	T	0.173	MW	0.172	MW	0.062
Sicht	STOP, E	MW	0.304	MW	0.511	MW	0.377	T	0.244	MW	0.074	MW	0.138
VR	st. S, X	MW	0.292	MW	0.200	MW	0.240	T	0.080	MW	0.681	MW	0.449
VR	st. S, E	MW	0.137	MW	0.374	MW	0.100	T	0.277	MW	0.576	MW	0.763
VR	m. S, X	MW	0.040	MW	0.189	MW	0.075	T	0.013	MW	0.092	MW	0.495
VR	m. S, E	MW	0.093	MW	0.072	MW	0.376	T	0.158	MW	0.704	MW	0.176
M: X-E	VA, st. S	MW	0.168	MW	0.296	MW	0.067	T	0.210	MW	0.243	MW	0.462
M: X-E	VA, m. S	MW	0.087	MW	0.070	MW	0.053	T	0.008	MW	0.062	MW	0.471
M: X-E	STOP, st. S	MW	0.441	MW	0.238	MW	0.175	T	0.231	MW	0.372	MW	0.339
M: X-E	STOP, m. S	MW	0.084	MW	0.047	MW	0.367	T	0.087	MW	0.248	MW	0.088
Sicht-K	VA, X	MW	0.166	MW	0.244	MW	0.244	T	0.044	MW	0.004	MW	0.182
Sicht-K	VA, E	MW	0.281	MW	0.371	MW	0.060	T	0.278	MW	$1.3e^{-4}$	MW	0.087

Im Folgenden werden die Ergebnisse für signifikante und ausgewählte tendenzielle Unterschiede diskutiert.

4.4.2.1 Einfluss des Manövers

Der Vergleich der Manöver anhand der Probandenversuche ergibt für den Bremsbeginn lediglich bei mittlerer Sichtbehinderung an STOP-Schildern signifikante Unterschiede. Hier liegt für das Manöver Linkseinbiegen eine hochsignifikant kleinere TTI_{BB} vor ($\alpha = 0,00061$). Für $a_{nec, BB}$ ergeben sich tendenzielle Unterschiede.

Die Erhebungen der Verkehrsbeobachtung zeigen, dass der Fahrer den Bremsvorgang für das Manöver Einbiegen bei mittlerer Sichtverdeckung bei tendenziell geringeren TTI_{BB} und $a_{nec, BB}$ beginnt. An STOP-Schildern ist dieser Einfluss auf $a_{nec, BB}$ signifikant ($\alpha = 0,047$). Die tendenziellen Unterschiede der TTI_{BB} bestätigen entsprechende Aus-

²⁷⁶ vgl. Kapitel 4.1.5.

²⁷⁷ Da auf eine Unterscheidung der Einbiegemanöver verzichtet wird, sind sie in der Ergebnistabelle zusammengefasst und mit E abgekürzt.

sagen in der Literatur²⁷⁸. Für Kreuzungen, an denen die Sichtbarkeit des Querverkehrs stark eingeschränkt ist, lassen sich hingegen keine Unterschiede feststellen.

Hinsichtlich des Bremsvorgangs weisen die Probandenversuche eine signifikante Verringerung²⁷⁹ der minimal erforderlichen Beschleunigung $a_{nec,min}$ für das Kreuzen im Vergleich zum Linkseinbiegen, jeweils bei mittlerer Sichtbehinderung, nach ($\alpha = 0,008$). Der analoge Paarvergleich der TTI_{min} zeigt entsprechende Tendenzen. Die Messdaten der Verkehrsbeobachtung zeigen ein ähnliches Verhalten. Vergleicht man an VA bei mittlerer Sichtbehinderung die Manöver Einbiegen und Kreuzen, so ergeben sich auch hier signifikant kleine Werte für $a_{nec,min}$ ($\alpha = 0,008$) und tendenziell geringere TTI_{min} .

Auch an STOP-Schild-geregelten Kreuzungen sind Unterschiede für die den Bremsvorgang beschreibenden Kriterien erkennbar. Bei mittlerer Sichtbehinderung zeigen sich beim Linkseinbiegen signifikant kleinere Werte der TTI_{min} , als beim Einbiegen nach rechts ($\alpha = 0,002$, Probandenversuche).

Der Abstand, bei dem ein begonnener Bremsvorgang abgebrochen wird, ist beim Linksabbiegen an VA bei geringer Sichtverdeckung signifikant größer als beim Kreuzen ($\alpha = 0,004$), während sich für weniger stark beeinträchtigte Sichtbarkeit des Querverkehrs ein gegenläufiger, hochsignifikanter Unterschied zeigt ($\alpha = 0,0004$). Mögliche Ursachen für dieses uneinheitliche Verhalten liefert die Untersuchung zum Einfluss der Sichtbehinderung²⁸⁰.

Ein Einfluss des Manövers auf den Halteabstand ist nicht zu erkennen.

4.4.2.2 Einfluss der Vorfahrtsregelung

Signifikante Unterschiede für den Bremsbeginn ergeben sich für die Ergebnisse der Probandenversuche aus der Variation der Vorfahrtsregelung für mittlere Sichtbehinderung beim Linkseinbiegen. Dies zeigen die hochsignifikant geringeren Werte von $a_{nec,BB}$ ($\alpha = 0,00005$) und die tendenziell geringere TTI_{BB} . Für die Probandenversuche weisen die an VA im Vergleich zu STOP signifikant größere Werte der TTI_{BB} beim Kreuzen Unterschiede nach ($\alpha = 0,04$). Eine entsprechende Tendenz offenbaren TTI_{BB} und $a_{nec,min}$ beim Einbiegen, jeweils bei mittlerer Sichtverdeckung.

Unterschiede hinsichtlich des Bremsvorgangs in Abhängigkeit von der Vorfahrtsregelung zeigen sich erneut nur beim Linksabbiegen bei mittlerer Sichtverdeckung. Die

²⁷⁸ vgl. VOLLRATH ET AL. (2004): *INVENT Kreuzungsverhalten - Endbericht* S. 63.

²⁷⁹ Entspricht einem betragsmäßig höheren Wert $|a_{nec,min}|$.

²⁸⁰ vgl. Abschnitt 4.4.2.3.

Werte von TTI_{min} und $a_{nec,min}$ sind demnach an STOP signifikant kleiner als an VA ($\alpha = 0,008$ bzw. $0,0001$). Die Daten der Verkehrsbeobachtung ergeben signifikant kleinere Werte der $a_{nec,min}$ beim Kreuzen mit mittlerer Sichtbarkeit des Querverkehrs für STOP im Vergleich zu VA). Ähnliche Tendenzen sind für die TTI_{min} erkennbar.

Der Abbruch des Bremsvorgangs weist nur beim Linksabbiegen mit stark eingeschränkter Sicht signifikante Unterschiede durch die Variation der Vorfahrtsregelung auf. So sind die Abstände, bei denen der Fahrer die Entscheidung zum Durchfahren fällt, an STOP signifikant kleiner als an VA ($\alpha = 0,032$).

Auch für die Variation der Vorfahrtsregelung zeigt sich kein signifikanter Unterschied des Halteabstands.

4.4.2.3 Einfluss der Sichtbehinderung

An VA sind keine signifikanten Einflüsse der Sichtbehinderung auf den Bremsbeginn zu erkennen. Die Vermutung, dass der Fahrer bei freier Sicht früher auf die Kreuzung reagiert²⁸¹, kann somit nicht bestätigt werden. Lediglich für Kreuzen an VA sind in den Daten der Verkehrsbeobachtung entsprechende Tendenzen erkennbar.

Für den Bremsvorgang ergeben sich signifikante Unterschiede nur bei Linkseinbiegen an STOP-Schild-geregelten Kreuzungen. Hier offenbaren sich bei starker Sichtbehinderung signifikant/tendenziell geringere Werte für $a_{nec,min}$ ($\alpha = 0,046$) und TTI_{min} . Die Verkehrsbeobachtung bestätigt diese Unterschiede nicht.

Eine Übereinstimmung liefern die Daten der Probandenversuche und die Ergebnisse der Verkehrsbeobachtung für das (Links-)Einbiegen an VA. TTI_{min} und $a_{nec,min}$ nehmen in dieser Situation bei starker Sichtverdeckung tendenziell geringere Werte an. Für Untersuchungen mit künstlich eingeschränkter Sicht ergeben sich signifikante Unterschiede für $a_{nec,min}$. Bei starker Sichtverdeckung sind hier signifikant kleinere Werte zu beobachten.

Besonders deutlich fällt der Unterschied durch Variation der Sichtverdeckung für den Abstand zur Kreuzung bei Abbruch des Anhaltevorgangs aus. Die Messdaten von Verkehrsbeobachtung und Probandenversuchen offenbaren für das Manöver „Kreuzen“ an VA signifikante Unterschiede des Abstands d_{BA} ($\alpha = 0,008$ bzw. $\alpha = 0,016$), d_{BA} ist an Kreuzungen mit starker Sichtbehinderung signifikant kleiner als bei mittlerer Sichtverdeckung. Dies zeigen auch die Messungen bei künstlich eingeschränkter Sicht

²⁸¹ vgl. ROHRMÜLLER (2007): *Prädiktion des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Trajektorien bei der Kreuzungsassistenz* S. 36. Entsprechende Versuche des Autors ergeben entsprechende Tendenzen, jedoch keine signifikanten Unterschiede, vgl. S. 45.

($\alpha = 0,004$). Ein quantitativer Vergleich zwischen d_{BA} und dem Grad der Sichtbehinderung, gemessen über den Sichtabstand d_{Sicht}^{282} , veranschaulicht die Zusammenhänge. Abbildung 4.25 stellt d_{BA} als Boxplot über d_{Sicht} für das Manöver „Kreuzen“ an unterschiedlichen Kreuzungen dar.

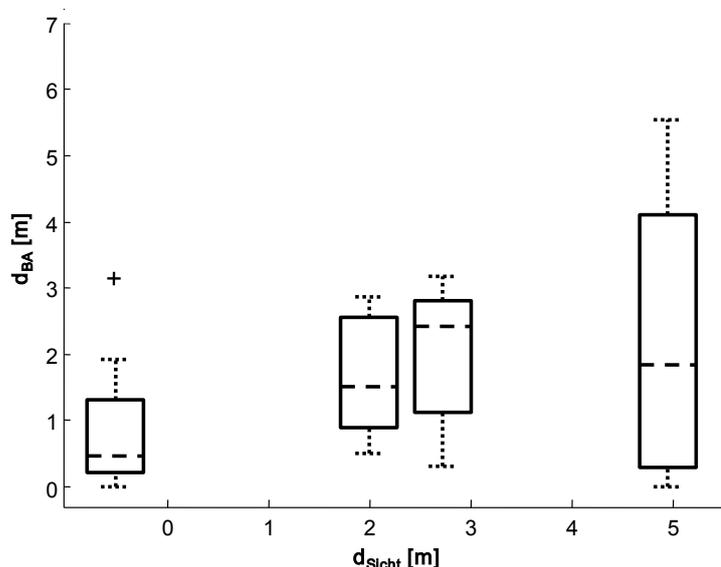


Abbildung 4.25: Boxplot des Abstands bei Abbruch des Bremsvorgangs d_{BA} über dem Sichtabstand d_{Sicht} – „Kreuzen“ an VA, Daten der Probandenversuche

Zunächst fällt auf, dass erste Indizien für einen Abbruch des Bremsvorgangs teilweise bei $d_{BA} > d_{Sicht}$ erkennbar sind. Somit reduziert ein Teil der Fahrer die Verzögerung, bevor ein Einsehen des Querverkehrs möglich ist. Des Weiteren zeigt sich ein eher uneinheitlicher Verlauf für den Median der Boxplots, dafür jedoch ein deutlich erkennbarer Zusammenhang des oberen Quartils (dargestellt durch die obere Kante der jeweiligen Box) und des Interquartilsabstands (Abstand der oberen von der unteren Kante) mit dem Sichtabstand.

Entsprechende Betrachtungen für Einbiegemanöver an VA ergeben abweichende Resultate. Unterschiede beim Rechtseinbiegen²⁸³ sind für die Probandenversuche gerade noch signifikant ($\alpha = 0,049$). Der Boxplot von d_{BA} über d_{Sicht} zeigt, dass mit sich Ausnahme einer Kreuzung ein mit d_{Sicht} steigender Verlauf des oberen Quartils und des Medians von d_{BA} ergibt, vgl. Abbildung 4.26.

²⁸² vgl. Kapitel 4.1.5.

²⁸³ Im Gegensatz zu den Manövern „Kreuzen“ und „Linkseinbiegen“ wird für das Rechtseinbiegen nur der Grad der Sichtbehinderung nach links betrachtet.

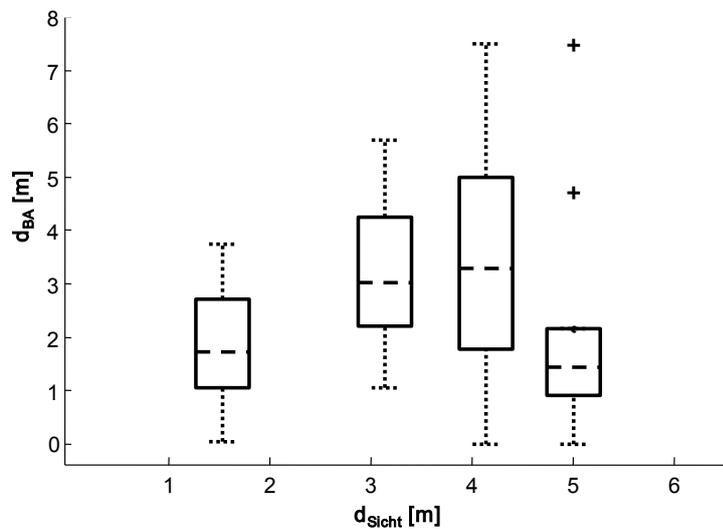


Abbildung 4.26: Boxplot des Abstands bei Abbruch des Bremsvorgangs d_{BA} über dem Sichtabstand d_{Sicht} – „Rechtseinbiegen“ an VA, Daten der Probandenversuche

Für das Linkseinbiegen ergeben sich gegenläufige, tendenzielle Unterschiede ($\alpha = 0,091$). Mögliche Ursachen für dieses Ergebnis liefert der entsprechende Boxplot. Aus Abbildung 4.27 geht hervor, dass der Median von d_{BA} mit steigendem Sichtabstand abnimmt²⁸⁴, während für das 75. Perzentil an zwei der drei Kreuzungen erneut eine steigende Tendenz für d_{BA} erkennbar ist.

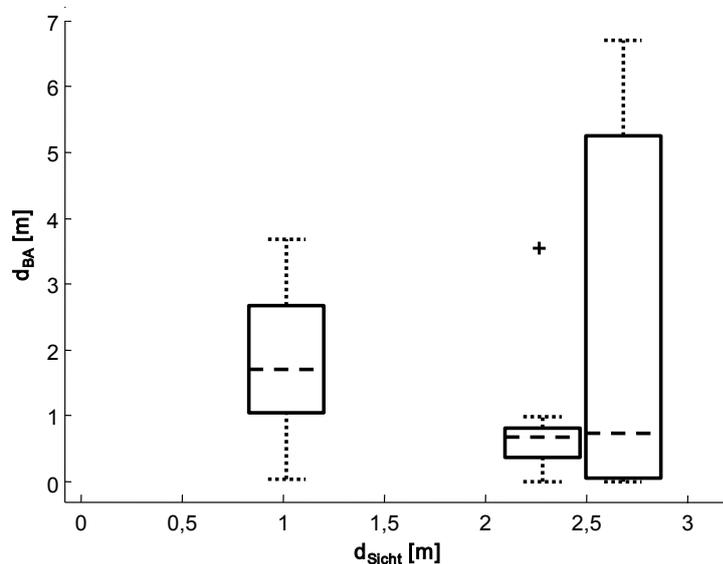


Abbildung 4.27: Boxplot des Abstands bei Abbruch des Bremsvorgangs d_{BA} über dem Sichtabstand d_{Sicht} – „Linkseinbiegen“ an VA, Daten der Probandenversuche

²⁸⁴ Das verwendete Testverfahren prüft auf Abweichungen des Mittelwerts, das angegebene Signifikanzniveau gilt somit nicht für den Median.

Eine der Kreuzungen weist im Boxplot trotz mittlerem Sichtabstand vergleichsweise geringe Werte für d_{BA} auf. Dieser durchweg sehr geringe Abstand d_{BA} an dieser Kreuzung liefert den Grund für die uneinheitliche Richtung der signifikanten Unterschiede bei Variation des Manövers. Möglicherweise ist diese Abweichung auf zusätzliche, nicht berücksichtigte Einflussparameter zurückzuführen.

In der Auswertung der Verkehrsbeobachtung sind Rechts- und Linkseinbiegen zusammengefasst. Hier ergibt sich über alle Kreuzungen ein bei starker Sichtverdeckung tendenziell verringerter Abstand d_{BA} ($\alpha = 0,084$). Für die künstliche Variation der Sichtbehinderung ist dieser Unterschied höchstsignifikant ($\alpha = 0,0001$).

An Stop-Schild-geregelten Kreuzungen kann kein signifikanter Unterschied für d_{BA} festgestellt werden. Unabhängig von Manöver und Vorfahrtsregelung sind zudem keine signifikanten Unterschiede des Abstands bei Fahrzeugstillstand zu erkennen.

4.5 Fazit

Die Analyse des Fahrerverhaltens an Kreuzungen zeigt, dass die Gefahrenerkennung als Verknüpfung von Fahrerabsichts- und Kollisionserkennung nur für einen Teil der untersuchten Unfallszenarien vor dem spätestmöglichen Warnzeitpunkt möglich ist. Als problematisch erweisen sich in diesem Zusammenhang Gefahrensituationen, die als Folge von Fahrerfehlern bei der Wahrnehmung und Bewertung vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer an Vorfahrt-Achten-Kreuzungen entstehen. In diesen Situationen ist die Fahrerabsicht, einen begonnenen Bremsvorgang abubrechen und die Kreuzung ohne Stillstand zu durchfahren, für die Mehrzahl der untersuchten Annäherungsfahrten erst zu einem Zeitpunkt möglich, zu dem der Eintritt des Fahrzeugs in die Konfliktzone durch eine Warnung nicht mehr vermeidbar ist.

Diese Problematik ergibt sich nicht für die LSA-Assistenz, da die genannten Fehlerursachen an Lichtsignalanlagen von untergeordneter Bedeutung sind. Entsprechend wird dieses Unfallszenario von Ansätzen zur Einbiege-/Kreuzenassistentz, die auf Basis des Fahrerverhaltens an LSA oder STOP-Schildern entwickelt werden/wurden, nicht berücksichtigt²⁸⁵.

Der Anteil entsprechender Unfallsituationen am Unfallgeschehen ist nicht genau bekannt. Untersuchungen der Ursprungsgeschwindigkeit und der wesentlichen Unfallursachen zeigen jedoch, dass die Zahl der an VA-Kreuzungen durch konventionelle

²⁸⁵ vgl. u.a. BERNDT ET AL. (2007): *Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems*.

Warnelemente nicht vermeidbaren Unfälle in der Größenordnung der durch eine Fahrerwarnung vermeidbaren Kollisionen liegt²⁸⁶.

Um den Anwendungsbereich des Einbiege-/Kreuzenassistenten auf diese Szenarien zu erweitern, wird eine um einen Teileingriff erweiterte Akutwarnung vorgestellt. Hiermit wird der Anteil rechtzeitig erkennbarer Fahrerfehler bei der Wahrnehmung und Bewertung des Querverkehrs von etwa 20% auf über 70% erhöht. Durch die Wahl geeigneter Zusatzkriterien werden False Positives bei der Fahrerabsichtserkennung minimiert. Eine Variation der den Berechnungen zugrunde liegenden Reaktionszeit des Fahrers demonstriert, dass diese Ergebnisse durch die Reaktionszeit zwar quantitativ beeinflusst werden, die grundsätzlichen Zusammenhänge dadurch jedoch in ihrer Gültigkeit nicht eingeschränkt sind.

Zusammenfassend leiten sich aus diesen Betrachtungen Anforderungen an Einbiege- und Kreuzenassistenzsysteme ab. Zudem ergeben sich aus den Untersuchungen wesentliche Informationen über geeignete Warnkriterien und Schwellwerte zur Fahrerabsichtserkennung beim Einbiegen und Kreuzen.

Mit Hilfe der Fahrerhaltensanalyse wird zudem gezeigt, welche zeitlichen Abweichungen im Fahrerverhalten unabhängig von dem gewählten Prädiktionsansatz zu erwarten sind. Aus dieser Betrachtung leitet sich ab, dass für den zeitlichen Abstand, mit dem zwei potentielle Kollisionspartner die Kreuzung erreichen, stets eine Gesamtungenauigkeit von etwa 1 s zu berücksichtigen ist. Da diese Ungenauigkeit innerhalb des vom Fahrer für eine Warnung akzeptierten Bereichs liegt²⁸⁷, erscheint die Umsetzung einer Kollisionserkennung für die untersuchten Kreuzungen mit hinreichender Genauigkeit möglich. Inwieweit sich diese Aussage auf andere, im Rahmen der Fahrerhaltensanalyse nicht untersuchte Kreuzungsszenarien übertragen lässt (bspw. auf Landstraßenknotenpunkte), ist nicht bekannt und bedarf zusätzlicher Untersuchungen.

Die Variation der Einflussparameter zeigt, dass Unterschiede durch Variation eines Einflussfaktors stark von den Rahmenbedingungen abhängig sind, die durch weitere Parameter definiert werden. So ist bspw. für alle Annäherungen an VA-Kreuzungen ein zumindest tendenzieller Einfluss der Sichtverdeckung auf den Abstand erkennbar, bei dem der Fahrer die Entscheidung zum Durchfahren der Kreuzung fällt und den Bremsvorgang abbricht. Für STOP-Schild-geregelte Kreuzungen weist dieser Abstand hingegen

²⁸⁶ Auf durch konventionelle Warnungen vermeidbare und durch konventionelle Warnungen nicht vermeidbare Unfälle entfallen an VA jeweils etwa die Hälfte aller Einbiege-/Kreuzenunfälle, die sich nicht als Folge von Anfahren aus dem Stillstand ereigneten.

²⁸⁷ vgl. Kapitel 2.2.2 für die üblicherweise akzeptierten Zeitlücken und die Ergebnisse der entsprechenden Vorversuche.

keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Sichtverdeckung auf. Umgekehrt wird gezeigt, dass sich für jeden der untersuchten Einflussparameter signifikante Unterschiede für einen Teil der Kriterien und Situationen ergeben. Dieser Zusammenhang veranschaulicht die Herausforderungen an ein Fahrerverhaltensmodell, das den Einfluss verschiedener Kreuzungsparameter auf Kennwerte bspw. zur Fahrerabsichtserkennung berücksichtigt, da das Zusammenwirken mehrerer Faktoren zu beachten ist.

Eine Möglichkeit zur Anpassung des Fahrerabsichtserkennungsalgorithmus anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse bietet an VA-Kreuzungen der Einfluss der Sichtverdeckung auf den Abstand, bei dem der Fahrer einen begonnenen Bremsvorgang abbricht, um die Kreuzung zu durchfahren. Die dargestellten Boxplots zeigen, dass insbesondere das obere Quartil dieses Abstands von dem Grad der Sichtverdeckung beeinflusst wird²⁸⁸. Ist ein Abbruch des Bremsvorgangs bei deutlich größerem Kreuzungsabstand erkennbar, so kann dies als Indikator für eine unvollständige Beachtung des Querverkehrs verwendet werden. Entsprechendes Verhalten erscheint zwar nicht hinreichend für die Aktivierung von Assistenzmaßnahmen, jedoch erlaubt es die Anpassung der Schwellwerte, um entsprechende Maßnahmen in Anbetracht des geringen Zeitbudgets ggf. früher anzusteuern.

²⁸⁸ Ein möglicher Grund für den geringeren Einfluss der Sichtverdeckung auf Median und unteres Quartil ist, dass der Fahrer die Entscheidung zum Durchfahren der Kreuzung nur trifft, wenn er keinem Verkehrsteilnehmer im Querverkehr Vorfahrt gewähren muss. Demnach wäre das obere Quartil das Maß für das Verhalten des Fahrers bei freier Kreuzung.

5 Technische Voraussetzungen

5.1 Sensorik und Kommunikation

5.1.1 Erkennung der Fahrerabsicht

Die Umsetzung der beschriebenen Kreuzungsassistenzfunktionen im Fahrzeug ist mit Anforderungen an Informationsverfügbarkeit und -Qualität verbunden, die teilweise deutlich über die Möglichkeiten aktuell in der Serie verfügbarer Sensoren und Technologien hinausgehen. Die erforderlichen Signale umfassen unter anderem Informationen über Art, Geometrie und Vorfahrtsregelung der vorliegenden Kreuzung sowie über Position und Fahrzustand des eigenen sowie fremder Fahrzeuge im Querverkehr. Die erforderlichen Genauigkeiten der letztgenannten Daten hängen dabei vor allem von den adressierten Unfallszenarien und der gewählten Eingriffsstrategie ab.

Dabei steigen die Anforderungen an die Genauigkeit von Positions- und Geschwindigkeitsdaten mit abnehmender Fahrzeuggeschwindigkeit aufgrund der geringeren Warnreserve. Diese ist bspw. für die Erkennung von ungebremstem Kreuzen an VA erheblich größer als bei der Erkennung abgebrochener Bremsvorgänge an VA. Bei Verwendung einer reinen Fahrerwarnung ergibt sich bei Erkennung von ungebremstem Kreuzen für 95% der Fahrer eine positive Warnreserve von +1 s, während sich bei Abbruch eines Bremsvorgangs für 95% der Fahrer eine negative Warnreserve von -1,1 s ergibt²⁸⁹.

Abbildung 5.1 stellt den Einfluss unterschiedlicher Abstandsungenauigkeiten auf die Erkennungsrate und die Quote zu erwartender Fehlerkennungen für abgebrochene Bremsvorgänge dar. Der Einfluss von Ungenauigkeiten der Fahrzeuggeschwindigkeit wird vernachlässigt, da aktuelle Raddrehzahlsensoren diese Information mit hoher Qualität zur Verfügung stellen²⁹⁰.

²⁸⁹ vgl. Kapitel 4.2.2.

²⁹⁰ Durch nicht präzise bekannten Reifenzustand ergeben sich Ungenauigkeiten von ca. 2%. Bei starken Verzögerungen ist mit zusätzlichen Abweichungen von $\Delta v \cong 1\% * a_x$ durch den Schlupf zu rechnen, vgl. WINNER (2006): *Kraftfahrzeuge II* S. 376.

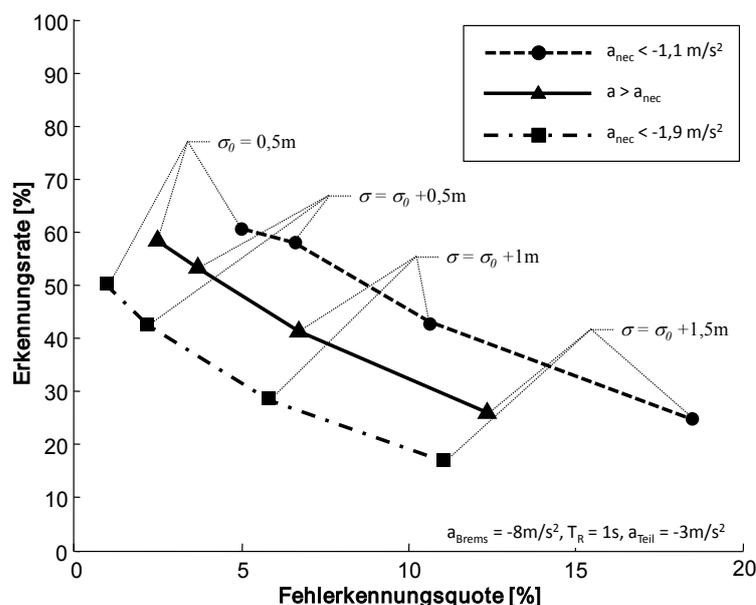


Abbildung 5.1: Einfluss von Abstandsungenauigkeiten auf Erkennungsrate und Fehlerkennungsquote bei Abbruch des Bremsvorgangs für die aufgezeichneten Daten der Verkehrsbeobachtung

Dargestellt sind die Erkennungsrate und die Fehlerkennungsquote für die Messdaten der Verkehrsbeobachtung. Für die Abstandsungenauigkeit der verwendeten Radarmessstationen wurde in Vorversuchen eine Standardabweichung $\sigma_0 = 0,5 \text{ m}$ bestimmt. Dieser Ungenauigkeit werden zusätzliche, normalverteilte Abstandsungenauigkeiten mit $\sigma_{Sensor} = 0,5 \dots 1,5 \text{ m}$ überlagert. Die Offline-Auswertung mit den Zusatzkriterien $a > a_{nec}$ und $a_{nec} < a_{nec,min}$, jeweils unter Verwendung eines Teileingriffs²⁹¹, ergibt die dargestellten Kurven.

Es zeigt sich, dass eine zusätzliche, normalverteilte Abstandsungenauigkeit sowohl die zu erwartende Erkennungsrate als auch die entsprechende Fehlerkennungsquote empfindlich beeinflusst. Um eine Erkennungsrate über 50% bei einer Fehlerkennungsquote unter 5% zu erreichen, sind demnach hochgenaue Abstandsinformationen erforderlich.

Für die Erkennung von ungebremstem Kreuzen kann hingegen eine größere Abstandstoleranz zugelassen werden. Die für 95% der Fahrer verfügbare Warnreserve von 1 s (1,4 s bei Teileingriff) führt abhängig von der Fahrgeschwindigkeit auf einen Abstandsbereich von

$$\Delta d = v * t_{R,avail} \quad (5.1).$$

Innerhalb dieses Bereichs sind Assistenzmaßnahmen für 95% der Fahrer erfolgreich, um den Eintritt des Fahrzeugs in die Konfliktzone zu vermeiden. Somit ergeben sich für eine Ursprungsgeschwindigkeit von 30 km/h bzw. 50 km/h zulässige Abstands-

²⁹¹ Zu den aufgeführten Zusatzkriterien vgl. Kapitel 4.2.2.

ungenauigkeiten²⁹² von $\pm 4,2$ m respektive $\pm 7,8$ m. Bei Verwendung eines Teileingriffs ($a_{Teil} = -3 \text{ m/s}^2$) erhöht sich die zulässige Abstandungenauigkeit auf $\pm 5,8$ m bzw. $\pm 10,9$ m.

Ein Vergleich dieser Anforderungen mit den repräsentativen Genauigkeiten aktueller GNSS-Systemen (± 10 m für GPS und ± 2 m für Differential GPS (DGPS)²⁹³) zeigt, dass die informellen Anforderungen zur Fahrerabsichtserkennung insbesondere im Bereich geringer Geschwindigkeiten derzeit eine technologische Herausforderung darstellen.

5.1.2 Bewertung der Kollisionswahrscheinlichkeit

Zusätzlich ergibt sich ein Einfluss der Datenungenauigkeiten auf die berechnete Kollisionswahrscheinlichkeit. Ungenaue Fahrzustandsdaten von Ego- und insbesondere Fremdfahrzeug beeinflussen unter anderem die prädizierten Zeiten, zu denen die Fahrzeuge den Schnittpunkt ihrer Trajektorien in der Kreuzung erreichen. Zu beachten ist, dass sich die insgesamt zu erwartende Ungenauigkeit der Kollisionswahrscheinlichkeit aus Abweichungen der Fahrerverhaltensprädiktion²⁹⁴ und aus Sensorungenauigkeiten zusammensetzt.

Als Maß für den Einfluss von Sensorungenauigkeiten wird der zeitliche Abstand zweier Fahrzeuge bei Erreichen der Kreuzung TGI betrachtet.

$$TGI = |TTI_{Ego} - TTI_{QV}| \quad (5.2)$$

Unter der Annahme konstanter Geschwindigkeit ergibt sich

$$TTI_{Ego} = \frac{d_{Ego}}{v_{Ego}} \quad (5.3)$$

$$TTI_{QV} = \frac{d_{QV}}{v_{QV}} \quad (5.4)$$

Damit gilt Gleichung 5.5:

²⁹² Mit $\frac{1}{2}\Delta d$ als maximal zulässige Abstandungenauigkeit.

²⁹³ vgl. MANSFELD (2004): *Satellitenortung und Navigation – Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme* S. 174 und KLANNER (2004): *Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistenz* S. 77. Angegeben ist die grundlegende Systemgenauigkeit, die in spezifischen Situationen, bspw. durch Mehrwegreflektionen, evtl. nicht gegeben ist.

²⁹⁴ vgl. Kapitel 4.3

$$\Delta TGI = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial(\Delta TTI)}{\partial d_{Ego}}\right| * \Delta d_{Ego}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial(\Delta TTI)}{\partial v_{Ego}}\right| * \Delta v_{Ego}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial(\Delta TTI)}{\partial d_{QV}}\right| * \Delta d_{QV}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial(\Delta TTI)}{\partial v_{QV}}\right| * \Delta v_{QV}\right)^2} \quad (5.5)$$

Durch Auflösen erhält man

$$\Delta TGI = \sqrt{\left(\left|\frac{1}{v_{Ego}}\right| * \Delta d_{Ego}\right)^2 + \left(\left|-\frac{d_{Ego}}{v_{Ego}^2}\right| * \Delta v_{Ego}\right)^2 + \left(\left|-\frac{1}{v_{QV}}\right| * \Delta d_{QV}\right)^2 + \left(\left|\frac{d_{QV}}{v_{QV}^2}\right| * \Delta v_{QV}\right)^2} \quad (5.6)$$

Abbildung 5.2 stellt den Einfluss der Ungenauigkeiten von vier exemplarisch betrachteten Systemausprägungen auf den zeitlichen Abstand bei Erreichen der Kreuzung für unterschiedliche Geschwindigkeiten dar. Die ausgewählten Systemausprägungen umfassen

1. ein FAT-System auf Basis von GPS und einem scannenden LIDAR-Sensor²⁹⁵ mit breitem horizontalem Erfassungsbereich,
2. ein FAT-System auf Basis von DGPS und einem scannenden LIDAR-Sensor mit breitem horizontalem Erfassungsbereich,
3. ein C2C-System mit Positionserfassung über GPS sowie
4. ein C2C-System mit Positionserfassung über DGPS.

Den Berechnungen liegen repräsentative Genauigkeiten der Positionserfassung von ± 10 m für GPS²⁹⁶ und ± 2 m für DGPS²⁹⁷ zugrunde. Auf eine Betrachtung der Verfügbarkeit der GPS-Daten wird an dieser Stelle verzichtet²⁹⁸. Die Spezifikationen des ausgewählten Lasersensors sowie die angenommene Leistungsfähigkeit der Kommunikationslösung finden sich in Kapitel 9.4 im Anhang.

²⁹⁵ Bei dem verwendeten Sensor handelt es sich um einen IBEO ALASCA. Dieser Sensor ist sowohl technisch, als auch preislich nicht mit derzeit im Fahrzeug eingesetzten Seriensensoren vergleichbar. Aufgrund des breiten, horizontalen Erfassungsbereichs erlaubt er jedoch im Gegensatz zu typischen Automotive-Sensoren die Erfassung von Querverkehr an Kreuzungen.

²⁹⁶ vgl. MANSFELD (2004): *Satellitenortung und Navigation – Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme* S. 174.

²⁹⁷ vgl. KLANNER (2004): *Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistenz* S. 77.

²⁹⁸ Eine Gegenüberstellung von Korrektheit und Verfügbarkeit von GNSS-Daten findet sich bspw. in WILTSCHKO (2003): *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten* S. 113-121.

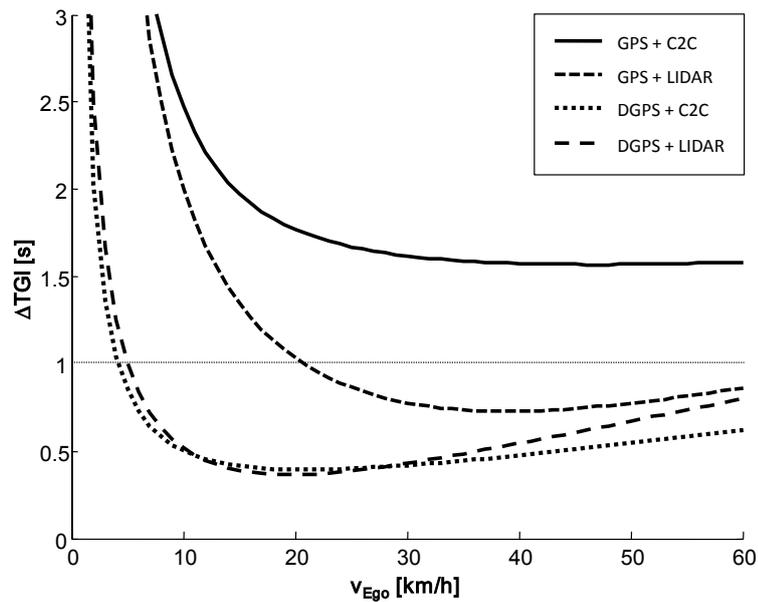


Abbildung 5.2: Einfluss von Informationsungenauigkeiten auf ΔTGI für verschiedene Systemausprägungen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs ($v_{QV} = 50$ km/h)

Es ist zu erkennen, dass ein auf GPS und fahrzeugautarker Sensorik basiertes System oberhalb einer Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs von etwa 20 km/h eine zufriedenstellende Genauigkeit bei der Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit bietet. Vielversprechend erscheinen Lösungen unter Verwendung von DGPS, die aufgrund der deutlich höheren Positionsgenauigkeit auch bei geringeren Geschwindigkeiten akzeptable Genauigkeiten des zeitlichen Abstands liefern. Dies gilt sowohl in Verbindung mit C2C-Kommunikation als auch in Kombination mit leistungsstarken Umfeldsensoren.

Reichweitenprobleme ergeben sich für die genannten Systemausprägungen nicht. Der Vorteil kommunikationsbasierter Kreuzungsassistenten liegt demnach vor allem in der Möglichkeit, unabhängig von einer vorhandenen Sichtbehinderung bereits in einer frühen Annäherungsphase Informationen über den Querverkehr zu liefern. Zudem erlaubt die Kommunikation durch Übertragung von Informationen, die FAT-Systemen üblicherweise nicht zur Verfügung stehen (bspw. Status des Fahrtrichtungsanzeigers oder Routenvorschläge des Navigationssystems²⁹⁹) eine verbesserte Prädiktion der TTI_{QV} .

Die Vermeidung von Kollisionen, die durch eine fehlerhafte oder ausbleibende Reaktion auf vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer entstehen, erscheint hingegen auch ohne Kommunikationslösungen möglich, da die Entscheidung, die Kreuzung ohne Fahrzeugstillstand zu durchfahren, üblicherweise hinter der letzten Sichtbehinderung getroffen

²⁹⁹ Die Kombination dieser Informationen ist bspw. als hinreichendes Kriterium für eine Einbiege-Erkennung vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer denkbar.

wird³⁰⁰. Bei geeigneter Anbringung des bzw. der Sensoren im Fahrzeug werden vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer somit auch von einem FAT-System rechtzeitig erfasst.

5.2 Anforderungen an HMI und Fahrzeug

Dem Human Machine Interface (HMI) kommt bei warnenden Systemen eine zentrale Bedeutung zu, da es direkt die Reaktionszeit des Fahrers beeinflusst³⁰¹. Aufgrund der insbesondere im Bereich geringer Geschwindigkeiten geringen Warnreserve ergibt sich die Anforderung, dass der Fahrer auf Warnungen möglichst schnell reagiert³⁰².

Visuelle Informations- oder Warnelemente sind so auszulegen, dass sie mit wenigen Blicken erfasst werden können und das Verhalten des Fahrers nicht negativ beeinflussen³⁰³. In diesem Zusammenhang erscheint ein HUD bspw. zur Vermeidung von LSA-Überfahrten besonders geeignet, da es den Fahrer nicht dazu nötigt, den Blick von der Verkehrssituation abzuwenden³⁰⁴.

Eine alleinige, visuelle Warnung im Frontbereich erscheint für einen Einbiege-Kreuzenassistenten jedoch ungeeignet. In Vorversuchen im statischen Fahrsimulator gaben 10 von 18 Probanden an, eine entsprechende Anzeige im HUD beim Anfahren aus dem Stillstand nicht oder erst als Reaktion auf eine akustische Warnung wahrgenommen zu haben. Ein möglicher Grund ist die Fokussierung der Aufmerksamkeit des Fahrers auf den Querverkehr.

Somit ist eine Information durch Anzeigeelemente während der Annäherung an die Kreuzung durchaus sinnvoll, sobald sich jedoch die Aufmerksamkeit des Fahrers in zunehmendem Maße auf den Querverkehr richtet, erscheint der Nutzen aufgrund der höheren Blickabwendung fraglich. In diesem Fall ist zumindest die Kombination mit einem weiteren Warnelement erforderlich. Ein vollständiger Verzicht auf eine

³⁰⁰ vgl. Kapitel 4.2.2.

³⁰¹ Die Reaktionszeit lässt sich bspw. durch haptische Warnelemente reduzieren, wenn der Fahrer die Warnung intuitiv zuordnen kann, vgl. LLOYD ET AL. (1996): *Driver-Vehicle Interface (DVI) Design Issues Of An Intersection Collision Avoidance (ICA) System*.

³⁰² Dieser Zusammenhang ist in Kapitel 4.2.2 genauer erläutert.

³⁰³ vgl. JANSSEN (2000): *Driver Distraction in the European Statement of Principles on In-Vehicle HMI: A Comment*.

³⁰⁴ vgl. LLOYD ET AL. (1996): *Driver-Vehicle Interface (DVI) Design Issues Of An Intersection Collision Avoidance (ICA) System*

entsprechende Anzeige erscheint hingegen nicht sinnvoll, da die visuelle Darstellung dem Fahrer im Falle einer nicht intuitiv schlüssigen Situation einen Hinweis auf den Grund der Warnung liefert.

Einige Unfallszenarien sind erst erkennbar, wenn der Eintritt des Fahrzeugs in die Kreuzung durch eine Warnung nicht mehr vermeidbar ist³⁰⁵. Die Erweiterung der Warn-elemente um eine autonome Teil-Bremmung erhöht in diesen Situationen das Unfallvermeidungspotential. Diese autonome Teilverzögerung stellt zusätzliche Zeit für die Reaktion des Fahrers zu Verfügung, da bereits während der Reaktionszeit des Fahrers die Geschwindigkeit des Fahrzeugs verringert wird. Alternative Möglichkeiten ergeben sich, wenn durch geeignete Warn-elemente eine Verringerung der vom Fahrer benötigten Reaktionszeit zu erwarten ist³⁰⁶. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang die Möglichkeit einer haptischen Fahrerwarnung. In der Literatur wird zur LSA-Assistenz bspw. die Warnung durch autonome Bremspulsation vorgeschlagen³⁰⁷.

Zusätzliche Anforderungen ergeben sich für die Vermeidung von Kreuzungsunfällen, die als Folge von Anfahren aus dem Stillstand entstehen. Da hier keine Zeit für eine Reaktion des Fahrers zur Verfügung steht, scheidet eine reine Warnung unabhängig von den verwendeten Warn-elementen zur Unfallvermeidung aus. Für diese Situation wird ein vollautonomer Eingriff vorgeschlagen. Dieser Eingriff unterbindet das Anfahren, indem er das Fahrzeug an der Kreuzung festhält, um einen evtl. bevorstehenden Unfall zu vermeiden. Um den Fahrer über den Grund des Systemeingriffs zu informieren, wird diese Haltefunktion mit visuellen und akustischen Warn-elementen kombiniert.

Die Umsetzung einer autonomen Verzögerung ist in aktuellen Fahrzeugen ohne zusätzlichen technischen Aufwand möglich. Zum Unterbinden des Anfahrens durch Festhalten des Fahrzeugs an der virtuellen Haltelinie eignet sich der Bremsengriff des ESP³⁰⁸. Für einen Teileingriff kann ebenfalls das Hydraulikaggregat des ESP verwendet werden³⁰⁹.

³⁰⁵ Dies gilt beim Einbiegen und Kreuzen an VA für Unfälle, die durch Fahrer-Fehler beim Beachten vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer entstehen, vgl. 4.2.2.

³⁰⁶ Bereits durch die Wahl eines geeigneten Warntons lässt sich die Reaktionszeit des Fahrers beeinflussen, vgl. CHENG ET AL. (2002): *Analysis of Driver Response to Collision Warning During Car Following* S. 231-237.

³⁰⁷ vgl. LLOYD ET AL. (1999): *Brake Pulsing as Haptic Warning for an Intersection Collision Avoidance Countermeasure* S. 34-41.

³⁰⁸ Diese Funktion wurde bspw. prototypisch für einen Linksabbiegeassistenten umgesetzt, vgl. BRANZ; ÖCHSLE (2005): *Intersection Assistance: Collision Avoidance System for Turns Across Opposing Lanes of Traffic*.

³⁰⁹ vgl. VON ZANTEN (2003): *Die Bremsanlage im Fahrerassistenzsystem* S. 276-299.

Allerdings können die bei aktuellen Seriensystemen zu erwartenden Latenzzeiten in Widerspruch zu den durch das vergleichsweise geringe Zeitbudget hohen Dynamikforderungen der Assistenzfunktionen stehen³¹⁰. Vorteile bietet in diesem Zusammenhang das sogenannte ESP-Premium, welches durch eine höhere Förderleistung des Hydraulikaggregats geringere Latenzen ermöglicht. Selbstverständlich sind autonome Verzögerungen auch mit neuartigen oder künftigen Bremssystemen wie EHB bzw. EHB-light oder EMB möglich³¹¹.

5.3 Fazit

Die theoretische Untersuchung der Auswirkungen möglicher Sensorungenauigkeiten auf die zu erwartende Systemperformance zeigt, welche hohe Anforderungen an Informationsverfügbarkeit und –Qualität die Einbiege-/Kreuzenassistenz an künftige Technologien stellt. Zusammenfassend scheint die Realisierung entsprechender Systeme unter Verwendung aktuell verfügbarer Sensoren sowie GNSS- und Kommunikationslösungen möglich, allerdings mit Einschränkungen hinsichtlich der adressierbaren Unfallszenarien. So ergibt sich, dass die Anforderungen der Kollisions- und Fahrerabsichtserkennung mit abnehmender Fahrzeuggeschwindigkeit zunehmen und insbesondere bei der Erkennung einer fehlerhaften/ausbleibenden Reaktion auf vorfahrtsberechtigten Querverkehr mit deutlichen Auswirkungen auf das Verhältnis von Erkennungsrate zu Fehlerkennungsquote zu rechnen ist.

Verglichen mit den Informationsanforderungen stellen die vorgeschlagenen Warn- und Eingriffsmaßnahmen keine wesentliche Herausforderung bei der Umsetzung im realen Fahrzeug dar. Visuelle, akustische und sogar haptische³¹² Warnelemente sind bereits in Serie im Fahrzeug verfügbar. Aktive Bremsengriffe sind über die Komponenten des inzwischen meist serienmäßig vorhandenen ESP mit Einschränkungen hinsichtlich der

³¹⁰ Bedingt durch das für radindividuelle Bremsengriffe und entsprechend geringere Fördermengen dimensionierte Hydraulikaggregat treten bei autonomen Teil- oder Vollbremsengriffen mit konventioneller ESP-Technik teils spürbare Verzögerungen auf.

³¹¹ vgl. KEBLER; WITTE (2006): *Aktive Sicherheit durch erweiterte Bremsassistenz und die erforderliche Aktuatorik*.

³¹² Das haptische Fahrpedal wird auf dem US-amerikanischen Markt in einigen leistungsstarken Fahrzeugen eingesetzt, um den Fahrer über Eingriffe der Antriebsschlupf-Regelung (ASR) zu informieren, vgl. LLOYD ET AL. (1999): *Brake Pulsing as Haptic Warning for an Intersection Collision Avoidance Countermeasure* S. 34-41.

Dynamik möglich, durch Verwendung entsprechender Weiterentwicklungen sowie neuartiger Bremssysteme entfallen diese Einschränkungen weitestgehend.

6 Validierung der Fahrer-Akzeptanz

6.1 Definition der Hypothesen

Die Analyse des Fahrerverhaltens hat gezeigt, dass kritische Situationen für die betrachteten Unfallszenarien beim Einbiegen und Kreuzen rechtzeitig erkennbar sind. Der Eintritt des Fahrzeugs in die Konfliktzone lässt sich für die überwiegende Zahl der Fälle durch geeignete Assistenzmaßnahmen vermeiden, die Quote der zu erwartenden Fehlwarnungen erscheint angemessen. Eine Aussage, inwieweit der Fahrer sich durch diese False-Positives gestört fühlt und welchen Einfluss ein autonomer Teileingriff auf die Fahrerakzeptanz hat, ist anhand dieser Betrachtungen nicht möglich³¹³.

Aus diesem Grund erfolgt eine Validierung der Fahrerakzeptanz für ein auf Basis der bisherigen Erkenntnisse prototypisch umgesetztes Kreuzungsassistenzsystem. Die Negation der Annahme, dass (mindestens) ein entsprechendes Assistenzsystem von der Mehrheit der Fahrer akzeptiert wird, führt auf die universelle Hypothese H7:

H7: Assistenzfunktionen zur Vermeidung der vorgestellten Unfallszenarien beim Einbiegen bzw. Kreuzen werden von der Mehrheit der Fahrer nicht akzeptiert.

Gelingt die Falsifizierung der Hypothese, so ist die Umsetzung eines mehrheitlich akzeptierten Assistenzsystems zur Vermeidung von Unfällen beim Einbiegen und Kreuzen nicht ausgeschlossen.

Ein weiteres Ergebnis der Fahrerverhaltensanalyse ist die Erfordernis von aktiven Bremsingriffen zur Kollisionsvermeidung im Bereich geringer Geschwindigkeiten. Diese Forderung widerspricht dem mehrheitlichen Wunsch befragter Fahrer, beim Einbiegen und Kreuzen durch ein warnendes System unterstützt zu werden³¹⁴. In Kapitel 4.2 werden zur Optimierung des Unfallvermeidungspotentials die Erweiterung der Warnung um einen Teileingriff bzw. eine Haltefunktion vorgeschlagen. Die Frage, ob die Mehrheit der Fahrer entsprechende Maßnahmen akzeptiert, führt auf die Hypothese H8:

³¹³ Wesentlich für die Akzeptanz von Systemen der aktiven Sicherheit ist, dass Systemeingriffe den Fahrer nicht stören. Dies gilt auch für begründete Maßnahmen, vgl. HOFFMAN ET AL. (2003): *Driver Preference of Collision Warning Strategy and Modality*.

³¹⁴ vgl. VOLLRATH ET AL. (2004): *INVENT Kreuzungsverhalten - Endbericht* S. 104.

H8: Systeme, die in Gefahrensituationen zusätzlich zur Fahrer-Warnung einen autonomen Teileingriff vornehmen bzw. das Anfahren des Fahrzeugs an der Kreuzung unterbinden, werden von der Mehrheit der Fahrer nicht akzeptiert.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht hinsichtlich der zeitlichen Lücke im Querverkehr, bei der Systemeingriffe vom Fahrer akzeptiert werden. Die im Rahmen der Vorversuche durchgeführte Untersuchung liefert erste Informationen über die Akzeptanz von Warnungen bei einem vorfahrtsberechtigten Fahrzeug³¹⁵. Die Ergebnisse beschränken sich jedoch auf eine während der Fahrt ausgegebene Warnung, die Akzeptanz für das Festhalten des Fahrzeugs beim Anfahren aus dem Stand wurde nicht untersucht.

Prinzipiell ist ein Systemverhalten anzustreben, das der Gefahrenwahrnehmung des Fahrers gerecht wird, eine Warnung erfolgt nur in Situationen, in denen der Fahrer die Lücke im Querverkehr üblicherweise nicht akzeptiert. Es wird davon ausgegangen, dass das Verhalten eines derart ausgelegten Systems unabhängig von der vorliegenden Zeitlücke im Querverkehr akzeptiert wird. Die Negation dieser Annahme führt auf die universelle Hypothese H9:

H9: Die Fahrerakzeptanz für das Systemverhalten eines Einbiege-/Kreuzenassistenten ist abhängig von der Zeitlücke im Querverkehr.

6.2 Vorgehen

6.2.1 Beschreibung des prototypisch umgesetzten Systems

Ein zentrales Thema in der Entwicklung von aktiven Sicherheitssystemen ist die Fragestellung, wann ein Eingriff des überwachenden Systems hilfreich oder erforderlich ist und vom Fahrer als nicht störend empfunden wird. Für Kollisionsschutzsysteme umfasst dies eine frühzeitige Identifikation und Bewertung potentiell bevorstehender Kollisionen. Der Entscheidungsprozess, ob ein Systemeingriff auszuführen ist, wird für den Fall des Einbiegens/ Kreuzens in zwei Teilaufgaben untergliedert.

Bestandteil der ersten Teilaufgabe ist die Situationsbewertung, ob bei Einfahrt oder Durchquerung der Kreuzung eine Kollision mit dem Querverkehr droht, falls keine intervenierenden Maßnahmen (selbständig durch den Fahrer oder unterstützt durch ein Assistenzsystem) eingeleitet werden. Die zweite Teilaufgabe ist die Erkennung einer in Anbetracht der bevorstehenden Gefahrensituation ungeeigneten Fahrerabsicht.

³¹⁵ vgl. Kapitel 2.2.2.2.

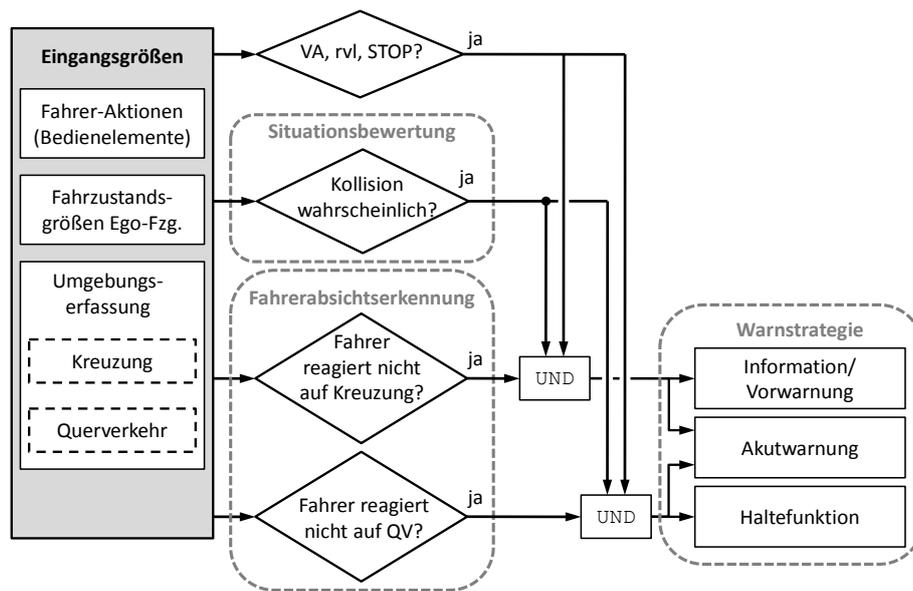


Abbildung 6.1: Aufbau des Einbiege-/Kreuzenassistenten

Wird die Notwendigkeit eines Systemeingriffs erkannt, erfolgt situationsabhängig die Aktivierung geeigneter Assistenzmaßnahmen. Abbildung 6.1 gibt einen Überblick des Systemaufbaus. In nachfolgenden Unterkapiteln werden die Algorithmen zur Situationsbewertung und Fahrerabsichtserkennung sowie die ausgewählte Warnstrategie erläutert.

6.2.1.1 Fahrerabsichtserkennung

Beschränken sich die gewählten Maßnahmen zur Unfallvermeidung auf Warnelemente und wird auf einen aktiven Bremseneingriff verzichtet, so lassen sich Kollisionen nur vermeiden, wenn eine positive Warnreserve vorliegt. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn die Erkennung von Fahrerfehlern bereits zu einem Zeitpunkt möglich ist, an dem der Fahrer einen bevorstehenden Unfall (unter Berücksichtigung der Reaktionszeit) noch durch eine Bremsung vermeiden kann. Dabei äußern sich Fahrerfehler durch die Fahrerabsicht, trotz der Gefahr einer Kollision mit vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmern in die Kreuzung einzufahren. Abbildung 6.2 fasst das Vorgehen der Fahrerabsichtserkennung zusammen.

Ausgehend von den Erkenntnissen der Fahrerverhaltensanalyse³¹⁶ verwendet die Fahrerabsichtserkennung die erforderliche Beschleunigung a_{nec} . Unterschreitet a_{nec} den in 95% der Anhaltevorgänge nicht unterschrittenen Wert $a_{nec,min} = 3,1 \text{ m/s}^2$, so erscheint die Fahrerabsicht „Anhalten“ unwahrscheinlich. Diese Bedingung wird während der

³¹⁶ vgl. Kapitel 4.2

Annäherung an die Kreuzung kontinuierlich überprüft. Somit lassen sich eventuelle Absichtsänderungen jederzeit feststellen.

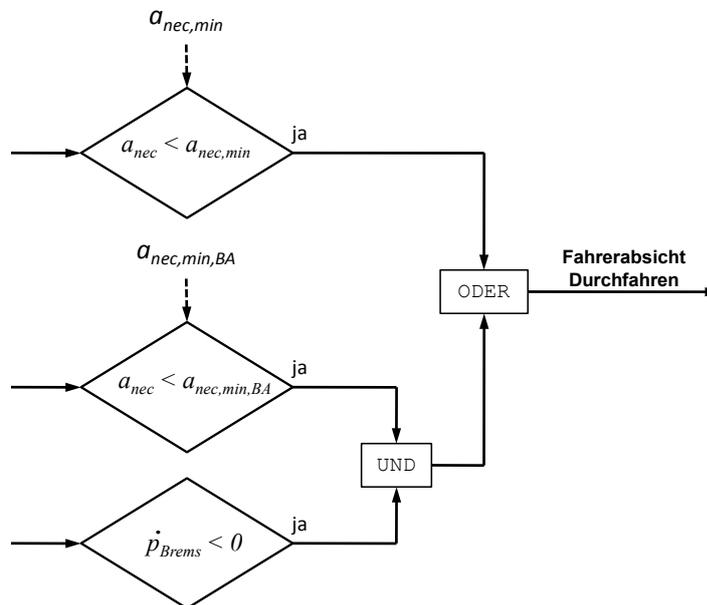


Abbildung 6.2: Aufbau der Fahrerabsichtserkennung

Als weiterer Indikator wird die Stärke der Bremspedalbetätigung genutzt. Verringert der Fahrer während der Kreuzungsannäherung den Bremsdruck³¹⁷, so ist dies eine notwendige Bedingung für die Fahrerabsicht, den Bremsvorgang abubrechen und die Kreuzung zu durchfahren. Als hinreichendes Erkennungskriterium der Fahrerabsicht „Fahren“ wird die Kombination dieser notwendigen Bedingung mit der beschriebenen Bedingung für a_{nec} verwendet. Wie Kapitel 4.2 zeigt, liegen für den Abbruch des Bremsvorgangs üblicherweise betragsmäßig geringere Werte der erforderlichen Verzögerung vor. So führt eine Anpassung des Grenzwertes $a_{nec,min}$ auf bspw. $a_{nec,min,BA} = -1,8 \text{ m/s}^2$ zu einem Anstieg der Erkennungsrate, ohne die Quote der zu erwartenden Fehlerkennungen negativ zu beeinflussen³¹⁸.

6.2.1.2 Situationsbewertung

Grundlage der Situationsbewertung ist ein Ansatz zur Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit. Dieser vergleicht prädierte Trajektorien des eigenen Fahrzeugs mit denen vorfahrtsberechtigter Fahrzeuge im Querverkehr. Für mögliche Schnittpunkte werden Ankunfts- und Aufenthaltszeit der Kollisionspartner prognostiziert und

³¹⁷ Äquivalent zur Fahrzeugverzögerung, vgl. Kapitel 4.2.

³¹⁸ Da diese Erkenntnisse zum Zeitpunkt der Systemumsetzung nicht vorlagen, erfolgte diese Anpassung für das untersuchte System nicht.

verglichen. Die Prädiktion der räumlichen, stark vereinfachten Trajektorien basiert auf charakteristischen Punkten der Kreuzungsgeometrie. Diese sind für die Manöver Kreuzen, Linkseinbiegen und Rechtseinbiegen in Abbildung 6.3 dargestellt.

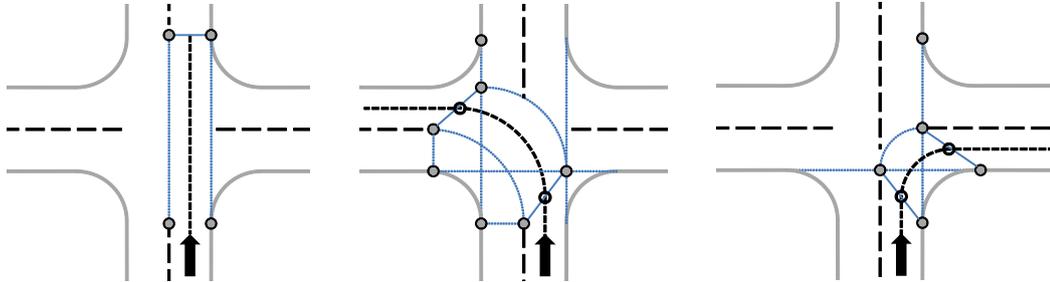


Abbildung 6.3: Räumliche Trajektorienprädiktion

Vereinfachend wird für das Manöver Kreuzen von einer geraden Kreuzungsdurchfahrt in der Mitte des eigenen Fahrstreifens ausgegangen. Für Einbiegemanöver wird anhand der dargestellten, charakteristischen Punkte jeweils eine äußere und eine innere virtuelle Begrenzung bestimmt, die prädizierte Trajektorie befindet sich in der Mitte dieser Begrenzung.

Der erste Schritt zur Fahrerverhaltensprädiktion ist die Manövererkennung, da das Manöver sowohl räumlich als auch zeitlich die Möglichkeit einer Kollision beeinflusst. Eine Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers wird als hinreichendes Kriterium für ein entsprechendes Einbiegemanöver verwendet. Andernfalls wird für das Ego-Fahrzeug bei Erkennung einer ausbleibenden Reaktion auf die Kreuzung von dem Manöver „Kreuzen“ ausgegangen. Bei Erkennung abgebrochener Bremsvorgänge oder beim Anfahren werden zusätzlich die Ausrichtung des Fahrzeugs, die Gierrate und der Lenkwinkel als Indikatoren zur Manövererkennung verwendet.

Für den Querverkehr wird von dem Manöver Kreuzen ausgegangen, wenn zum Zeitpunkt der Fahrerabsichtserkennung (Ego-Fahrzeug) kein Bremsbeginn erkennbar ist. Andernfalls wird ein bevorstehendes Einbiegemanöver angenommen, eine Unterscheidung zwischen Links- und Rechtseinbiegen erfolgt nicht. Die Manövererkennung für Querverkehr dient somit der zeitlichen Anpassung prädizierter Trajektorien.

Auf Basis der Erkenntnisse aus Vergleichen der *TTI* mit der tatsächlichen Zeitdauer bis zum Erreichen der Kreuzung wird der Geschwindigkeitsverlauf der Fahrzeuge anhand aktueller Fahrzustandsgrößen prognostiziert. Diese Prognosen berücksichtigen jeweils das Verhalten des 5%-, des 50% und des 95%-schnellsten Fahrers. Aus diesen Geschwindigkeitsverläufen werden wiederum die Zeiten bestimmt, zu denen die Fahrzeuge den Konfliktbereich durchfahren. Als Ergebnis liegen somit für jeden potentiellen Kollisionspunkt sechs prognostizierte Zeiten vor, drei für jeden Kollisionspartner.

Anhand dieser Zeiten erfolgt die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit mittels des in Abbildung 6.4 vereinfacht dargestellten Ansatzes.

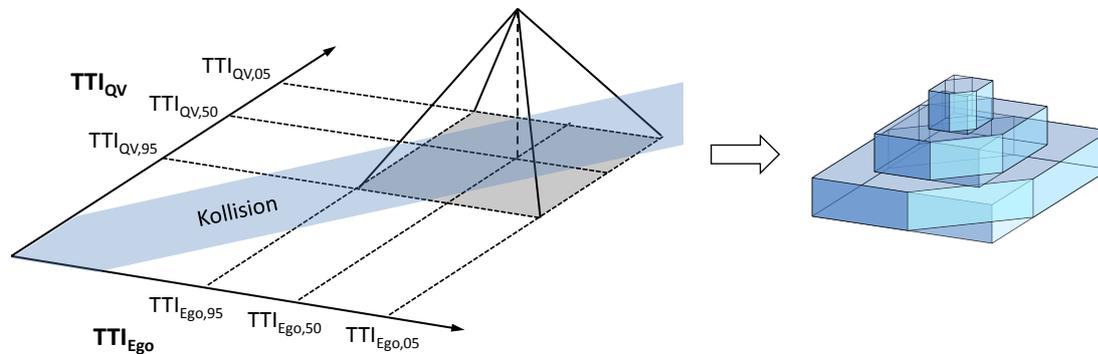


Abbildung 6.4: Ansatz zur Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit

Aufgetragen auf die Koordinatenachsen sind die entsprechenden TTI -Werte für das eigene Fahrzeug und einen potentiellen Kollisionspartner im Querverkehr. Durch das jeweils 5. und 95. Perzentil wird ein Rechteck aufgespannt. Eine Kollision entsteht, wenn beide Fahrzeuge die Kreuzung gleichzeitig durchfahren. Diese Bedingung ist in der dargestellten Abstraktion für sämtliche Punkte entlang der Winkelhalbierenden der Koordinatenachsen erfüllt ($TTI_{Ego} = TTI_{QV}$). Aufgrund der Abmessungen beider Fahrzeuge erweitert sich diese zeitliche Kollisionszone auf den dargestellten Bereich endlicher Ausdehnung. Eine Kollision ist möglich, wenn eine Schnittmenge des durch TTI_{05} und TTI_{95} aufgespannten Rechtecks mit der zeitlichen Kollisionszone vorliegt.

Ein erstes Maß für die Kollisionswahrscheinlichkeit liefert das Verhältnis dieser Schnittmenge zur Fläche des aufgespannten Rechtecks. Dieses Verfahren berücksichtigt jedoch nicht die unterschiedliche Wahrscheinlichkeit der entsprechenden TTI -Werte³¹⁹. Aus diesem Grund wird, wie dargestellt, eine dritte Dimension eingeführt. Das vorgestellte Rechteck dient als Grundfläche für eine Pyramide, deren Spitze am Schnittpunkt der Mediane von TTI_{Ego} und TTI_{QV} liegt. Die Verteilung der TTI beider Fahrzeuge wird somit jeweils durch eine Dreiecksverteilung approximiert. Die Kollisionswahrscheinlichkeit ergibt sich in diesem Fall als Verhältnis aus dem Teilvolumen der Pyramide, das innerhalb der Kollisionszone liegt, und dem Gesamtvolumen der Pyramide. Somit werden Überschneidungen in der Nähe der jeweiligen Mediane stärker berücksichtigt, als Überschneidungen nahe den Eckpunkten der Pyramide. Die Berechnung erfolgt, wie dargestellt, durch numerische Näherung anhand von Scheiben.

³¹⁹ Für die TTI liegt in den in Kapitel 4.3 untersuchten Situationen keine Normalverteilung vor (überprüft mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test). Allerdings zeigt sich, dass Werte in der Nähe des Medians mit höherer Häufigkeit auftreten, als Werte im Bereich des 5. bzw. 95. Perzentils.

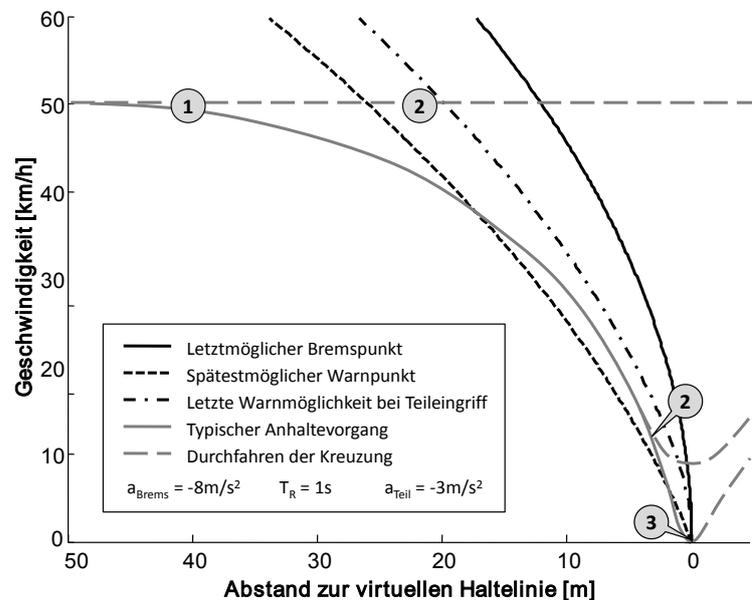
6.2.1.3 Gewählte Warn- und Eingriffsstrategie

Wie bereits dargestellt, sind der Verwendung einer Fahrerwarnung als alleinige Interventionsmaßnahme durch die erwartete Akzeptanz des Fahrers Grenzen gesetzt. Dies wirkt sich insbesondere im Bereich geringer Geschwindigkeiten einschränkend auf die zur Verfügung stehende Warnstrategie aus, da hier der tatsächliche Bremsweg einen immer kleineren Anteil des Anhaltewegs einnimmt.

Der mögliche Einsatzbereich eines warnenden Kreuzungsassistenzsystems lässt sich durch Verwendung einer autonom aktivierten Anbremsung mit konstanter Verzögerung auf Szenarien geringer Geschwindigkeiten ausweiten. Unter Verwendung eines Teileingriffs mit konstanter Verzögerung a_{Teil} während der Reaktionszeit des Fahrers t_R ergibt sich der Anhalteweg³²⁰ s_A in Abhängigkeit von der Ursprungsgeschwindigkeit v_0 zu:

$$s_{A,Teil} = \frac{1}{2} \left[(v_0 + (a_{Teil} * t_R))^2 * \left(\frac{1}{a_{Teil}} - \frac{1}{a_{Brems}} \right) - \frac{v_0^2}{a_{Teil}} \right] \quad (6.1)$$

Zur Unterstützung des Fahrers beim Einbiegen-/Kreuzen werden im Falle einer bevorstehenden Kollision situationsadaptiv unterschiedliche Informations- und Warnstufen aktiviert, die den Fahrer aktiv in der vorliegenden Gefahrensituation unterstützen. Grundlage für die vorgestellte Warnstrategie ist die Untersuchung des Fahrerverhaltens in Kapitel 4.



³²⁰ Für den Anhalteweg bei reiner Warnung gilt: $s_{A,Warn} = -\frac{v^2}{2a_{Brems}} + t_R * v$

Abbildung 6.5: Qualitative Darstellung der Fahrerabsichtserkennung für unterschiedliche Fehlerszenarien während der Kreuzungsannäherung.

1. Bleibt eine erste Fahrerreaktion auf die Kreuzung bzw. Vorfahrtsregelung aus, so kann dies meist in einer frühen Phase der Annäherung an die Kreuzung erkannt werden, vgl. Abbildung 6.5 ①. Somit steht vergleichsweise viel Zeit für eine Fahrerreaktion zur Verfügung. In dieser Situation wird dem Fahrer im HUD ein visueller Hinweis als informierende Vorwarnung auf die bevorstehende Situation gegeben.
2. Bleibt eine Reaktion des Fahrers auf die Vorwarnung aus oder wird die Gefahrensituation bspw. bei geringerer Ursprungsgeschwindigkeit oder aufgrund veränderter Rahmenbedingungen erst später erkannt, so wird eine Akutwarnung ausgegeben, vgl. Abbildung 6.5 ②. Veränderte Rahmenbedingungen liegen bspw. vor, wenn der Fahrer zunächst einen Bremsvorgang einleitet, diesen jedoch aufgrund von Fehleinschätzung oder Übersehen vorfahrtsberechtigter Fahrzeuge abbricht, um in die Kreuzung einzufahren. Die Akutwarnung besteht aus einem visuellen Hinweis im HUD, einer akustischen Warnung und der beschriebenen, autonomen Teilbremsung.
3. Fährt das direkt an der Kreuzung stehende Fahrzeug aus dem Stillstand an (Abbildung 6.5 ③), so kann ein Einfahren in die Kreuzung durch eine Warnung nicht vermieden werden, da keine Zeit für eine Fahrerreaktion zur Verfügung steht. Für diesen Fall wird das Fahrzeug bei Fahrpedalbetätigung durch die sogenannte Haltefunktion am Anfahren gehindert, um eine Kollision mit dem Querverkehr zu vermeiden.

In Vorversuchen im statischen Fahrsimulator zeigte sich die Erwartung der Probanden, dass nach korrekter Reaktion auf die Vorwarnung keine Akutwarnung mehr erforderlich ist. Die Aktivierung der Vorwarnung wird daher an die zusätzliche Bedingung geknüpft, dass eine Fahrerreaktion auf die Vorwarnung noch vor dem spätestmöglichen Auslösezeitpunkt der Akutwarnung zu erwarten ist³²¹. Abbildung 6.6 fasst die vorgestellte Warn- und Eingriffsstrategie zusammen.

Für Unfälle mit dem Querverkehr besteht prinzipiell die Möglichkeit der räumlichen und der zeitlichen Kollisionsvermeidung. Ein Zusammenstoß mit dem Querverkehr kann bspw. durch eine gezielte Variation der Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs vermieden werden, da die Kollisionspartner den Schnittpunkt ihrer Trajektorien durch diesen Eingriff zu unterschiedlichen Zeiten durchfahren. Derartige Maßnahmen zur zeitlichen Kollisionsvermeidung stellten jedoch erhebliche Zusatzanforderungen an

³²¹ Ausgehend von einer angenommenen Reaktionszeit von 1s, vgl. Kapitel 4.1.7.

Umgebungserkennung und Situationsbewertung, um die Entstehung neuer Gefahrensituationen auszuschließen. Für die gesamte Systemauslegung des vorgestellten Kreuzungsassistenten werden daher sämtliche Eingriffe deaktiviert, sobald ein Eintritt in die Kollisionszone (Einfahrt in die Kreuzung) nicht mehr vermeidbar ist. Das System ist somit ausschließlich auf die räumliche Vermeidung bevorstehender Kollisionen ausgerichtet.

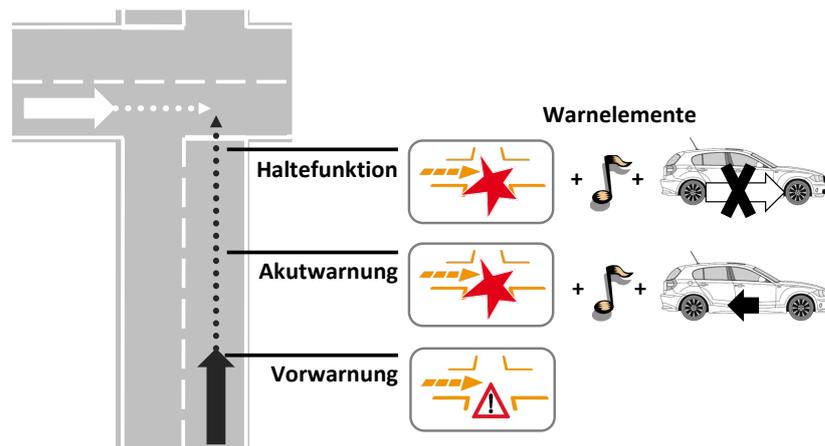


Abbildung 6.6: Die verwendete Warn- und Eingriffsstrategie

6.2.2 Untersuchungswerkzeug

Um die Top-Down abgeleiteten Assistenzfunktionen unabhängig von der erforderlichen Sensorik zu validieren, eignet sich die Verwendung von Simulationsmethoden. Die Verwendung von Rapid-Prototyping-Entwicklungstools ermöglicht die Umsetzung eines fahr- und erlebbaren Kreuzungsassistenten. Versuche im Fahrsimulator erlauben die gefahrlose Untersuchung ansonsten sicherheitskritischer Verkehrssituationen unter reproduzierbaren Bedingungen. Für Funktionstests und Vorversuche zur Systemparametrisierung wird der statische Fahrsimulator der BMW Group verwendet. Die Untersuchung der Fahrerakzeptanz für die vorgestellten Assistenzfunktionen erfolgt in Probandenversuchen im dynamischen Fahrsimulator der BMW Group (Abbildung 6.7)³²².

Die Umgebung des Simulatorfahrzeugs wird über eine statische Datenbasis vorgegeben. Die Datenbasis entspricht einer Karte des Versuchsparcours, sie enthält u.a. Informationen über den Straßenverlauf und über statische Objekte wie Verkehrsschilder oder Gebäude. Zur Untersuchung des Einbiege-/Kreuzenassistenten wird eine vereinfachte Datenbasis mit einer hohen Kreuzungsdichte verwendet, vgl. Abbildung 6.8. Ortslage

³²² Weitere Details zum verwendeten Fahrsimulator finden sich in Kapitel 9.5.1 im Anhang.

und Geometrie der Kreuzungen spiegeln die Ergebnisse der Unfalldatenanalyse wieder, gleiches gilt für die Umgebungsbedingungen während der Versuche³²³.



Abbildung 6.7: Der verwendete dynamische Fahr Simulator der BMW-Group³²⁴

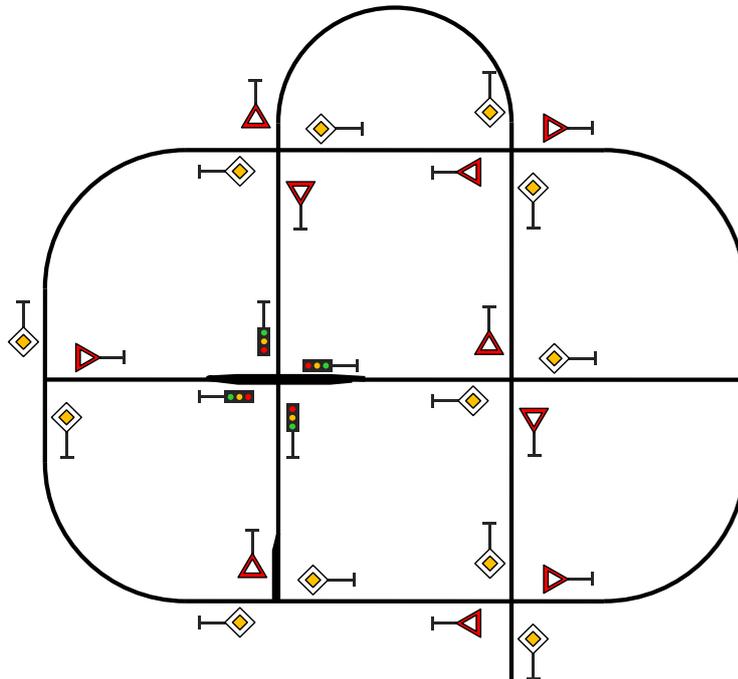


Abbildung 6.8: Die Datenbasis der Simulatorversuche – Gebäude o.ä. sind nicht dargestellt.

³²³ Der Parcours repräsentiert Stadtverkehr (zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h) mit größtenteils rechtwinkligen, X-förmigen Kreuzungen mit einem Fahrstreifen je Fahrtrichtung. Die Versuche finden bei Tageslicht und ohne Niederschlag statt.

³²⁴ N.N. (2007): *BMW Innovationstag Fahrerassistenzsysteme*.

Der Abstand zwischen zwei Kreuzungen beträgt mindestens 500 m. Der Proband hat somit vor jeder Kreuzungsannäherung die Möglichkeit, auf eine Geschwindigkeit entsprechend der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu beschleunigen. Einflüsse vorheriger Kreuzungsmanöver auf den nachfolgenden Annäherungsvorgang werden auf diese Weise minimiert.

6.2.3 Versuchsdesign

6.2.3.1 Vorversuche

Ziel der Vorversuche im statischen Fahrsimulator ist einerseits die Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung verwendeter Warnschwellen und andererseits die Kontrolle der Systemfunktionalität für die Hauptversuche. Die Vorversuche setzen sich aus einer Übungsfahrt, einer Normalfahrt und zwei Testfahrten zusammen.

Während der Übungsfahrt erhalten die Probanden die Gelegenheit, Brems- und Einbiegevorgänge im Simulator zu trainieren. Geübt wird insbesondere das Anhalten an einer definierten Stillstandsposition, da erste Tests gezeigt haben, dass diese Aufgabe dem Fahrer im statischen Fahrsimulator vergleichsweise schwer fällt, möglicherweise aufgrund des fehlenden kinästhetischen Feedbacks.

Aufgabe des Fahrers während der Normalfahrt ist es, einen vorgegebenen Parcours mit sieben VA-Situationen und einer RvL-Situation möglichst natürlich zu durchfahren. Neben „normalen“ Kreuzungssituationen umfasst der Parcours der Normalfahrt zwei Szenarien, in denen durch untypisches Verhalten des Querverkehrs Fahrerfehler provoziert werden.

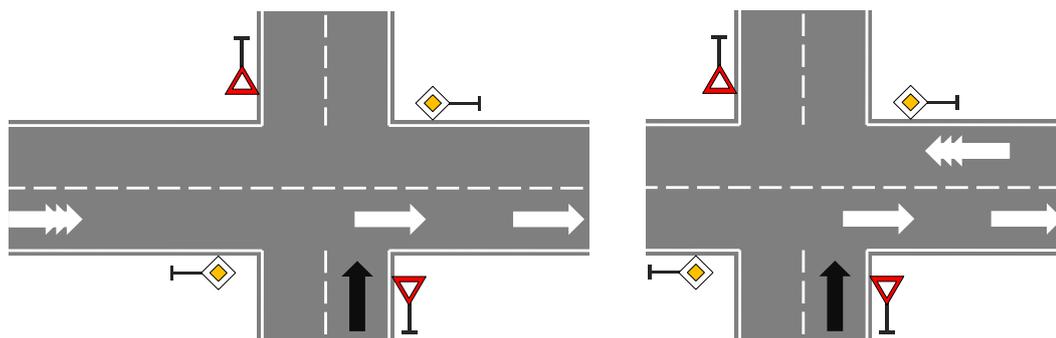


Abbildung 6.9: Generieren kritischer Kreuzungssituationen während der Prüffahrt

Dies geschieht jeweils durch starkes Beschleunigen eines vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmers. Die Situationen sind in Abbildung 6.9 schematisch dargestellt. Zunächst passiert eine Kolonne vorfahrtsberechtigter Fahrzeuge die Kreuzung. Nach dem letzten Kolonnenfahrzeug entsteht eine Lücke. Das Kollisionsfahrzeug, dargestellt

durch den Mehrfach-Pfeil, beschleunigt unerwartet stark und schließt diese Lücke (Abbildung 6.9 links) bzw. wird (durch Kollisionsfahrzeuge verdeckt) in der Gegenrichtung aufgesetzt und fährt in die Kreuzung ein (Abbildung 6.9 rechts). Ziele der Normalfahrt sind die Untersuchung eventueller Fehlwarnungen und die Analyse des Systemverhaltens in potentiell kritischen Situationen.

Zusätzlich umfassen die Vorversuche zwei Testfahrten. Die Fahrer erhalten in der ersten Testfahrt die Anweisung, Kollisionen mit dem Querverkehr nachzustellen, um Timing und Zuverlässigkeit der Systemmaßnahmen zu überprüfen. In der zweiten Testfahrt ist es Aufgabe der Fahrer, gezielt Fehlfunktionen (False Positives wie False Negatives) zu provozieren, um die Systemgrenzen aufzuzeigen.

Alle Fahrten nutzen denselben Versuchsparcours, dieser wird im Rahmen der Normalfahrten zweimal, im Rahmen der Testfahrten jeweils einmal durchfahren. Während aller Versuche werden die Fahrzustandsdaten des Simulatorfahrzeugs und simulierter Kollisionspartner aufgezeichnet. Eine Befragung des Fahrers im Anschluss an jede Kreuzungssituation erfasst, ob das Systemverhalten als angemessen empfunden wird. Die Versuchsdauer beträgt je Proband etwa 1,5 Stunden. Das Probandenkollektiv setzt sich aus 18 männlichen Mitarbeitern der BMW Group aus den Bereichen HMI, Fahrerassistenzsysteme und Fahrsimulation zusammen.

6.2.3.2 Hauptversuche

Die Planung und Durchführung der Hauptversuche erfolgte im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes PReVENT durch das Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW)³²⁵. Die Versuche unterteilen sich in die vier Phasen Übungsfahrt, Trainingsfahrt, Bewertungsfahrt und Prüffahrt.

Ziel der Übungsfahrt ist die Gewöhnung des Fahrers an den dynamischen Fahrsimulator. Es werden Brems- und Beschleunigungsvorgänge, Einbiegemanöver und das Einschätzen von Lücken im Querverkehr trainiert.

Die Trainingsfahrt dient dem Kennenlernen des Assistenzsystems. Dem Fahrer werden die Systemfunktionen Vorwarnung, Akutwarnung und Haltefunktion getrennt vorgestellt und demonstriert. Im Anschluss an die Trainingsfahrt erfolgt eine Befragung des Fahrers, ob die Funktionen des Kreuzungsassistenten verstanden wurden und ob sie dem Fahrer sinnvoll erscheinen.

³²⁵ Versuchsablauf und Ergebnisse sind in dem entsprechenden Abschlussbericht dokumentiert, vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PReVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten*.

Ziel der Bewertungsfahrt ist die Aussage, bei welchen zeitlichen Lücken im Querverkehr Systemeingriffe als angemessen bewertet werden. Entsprechend erfolgt eine systematische Variation der Lückengröße im vorfahrtsberechtigten Querverkehr. Der Fahrer erhält die Anweisung, die Kreuzung zu durchfahren und eine eventuelle Systemreaktion zu bewerten. Es wird geprüft, ob der Fahrer Systemeingriffe bei unterschiedlichen Lückengrößen als angemessen beurteilt. Aufgrund der expliziten Anweisung, auch zu klein erscheinende Lücken zu nutzen, liegt kein natürliches Fahrverhalten vor. Jedoch ergibt sich hierdurch eine hohe Zahl ausgelöster Systemreaktionen für die anschließende Bewertung.

Funktion der Prüffahrt ist die Beurteilung des Assistenzsystems bei natürlichem Fahrverhalten. Die Instruktionen beschreiben lediglich die Fahrtroute, alle übrigen Entscheidungen werden vom Fahrer getroffen. Versuchsparcours und Ablauf sind identisch mit der Normalfahrt der Vorversuche. Entsprechend werden an zwei Kreuzungen durch gezielt aufgesetzten Querverkehr kritische Situationen generiert³²⁶.

Im Anschluss an jede Versuchsphase erfolgt die Beurteilung einzelner Systemfunktionen sowie des Gesamtsystems anhand von Fragebögen. Die Gesamtdauer des Versuchsprogramms beträgt je Proband ca. 3 Stunden und wurde von 13 Probanden im Alter von 27 und 58 Jahren absolviert. Um ein möglichst repräsentatives Probandenkollektiv zu erhalten, wurden neben dem Alter die Parameter Geschlecht und Fahrerfahrung variiert. Im Gegensatz zu den Vorversuchen verfügen die Probanden der Hauptversuche zudem über keinen speziellen Bezug zur Fahrzeugtechnik³²⁷.

6.3 Ergebnisse

Abbildung 6.10 fasst die subjektive Systembewertung der Vorversuchs-Normalfahrten zusammen. Es zeigt sich, dass das Systemverhalten in 85% der Kreuzungssituationen als angemessen empfunden wird. Kritisiert wurde das Systemverhalten in 15% der Kreuzungssituationen. Etwa 40% der Kritik entfallen auf die Vorwarnung, die nach Ansicht der Probanden zu früh ausgelöst wird. Die Ergebnisse der Testfahrten zeigen ein ähnliches Bild³²⁸.

³²⁶ vgl. Kapitel 6.2.3.1, Abbildung 6.9.

³²⁷ Weitere Details zur Versuchsmethodik finden sich in GRADENEGGER ET AL. (2006): *PReVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 8-20.

³²⁸ vgl. Kapitel 9.5.2 im Anhang.

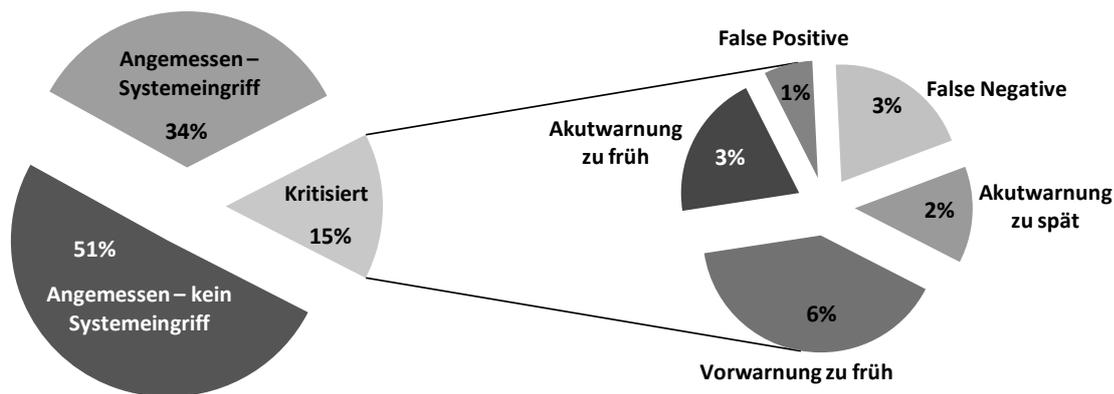


Abbildung 6.10: Beurteilung des Systemverhaltens für Normalfahrt in 288 VA- bzw. RvL-Situationen

Die Resonanz auf das umgesetzte Kreuzungsassistenzsystem fällt auch in den Hauptversuchen positiv aus. Die überwiegende Mehrheit der Probanden beurteilt die im Rahmen der Trainingsfahrten vorgestellten Maßnahmen als hilfreich oder sehr hilfreich³²⁹. Besonders positiv wird die Haltefunktion bewertet, 11 von 13 Probanden empfinden sie als sehr hilfreich.

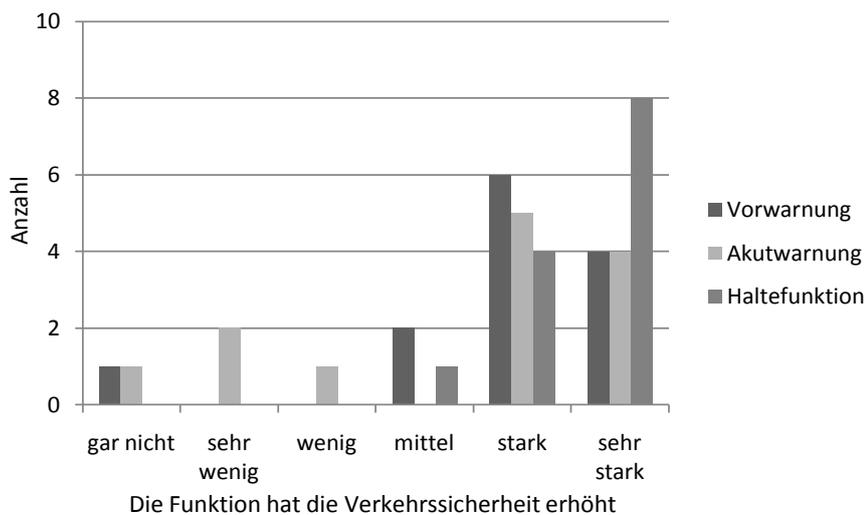


Abbildung 6.11: Bewertung der Systemfunktionen – Verkehrssicherheit³³⁰

Die Akzeptanzbefragung nach Abschluss aller Versuchsfahrten bestätigt dieses positive Bild. Die Mehrzahl der Fahrer bewertet Vorwarnung, Akutwarnung und Haltefunktion

³²⁹ Vorwarnung: 10 von 13; Akutwarnung: 8 von 13; Haltefunktion: 12 von 13; Verwendet wird jeweils eine sechsstufige Skala von „gefährlich“ über „sehr störend“, „störend“, „mittel“ und „hilfreich“ bis „sehr hilfreich“, vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PREVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 38.

³³⁰ vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PREVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 44-46.

als verständlich und vorhersagbar. In entsprechenden Maßnahmen sehen die Probanden mehrheitlich eine Erhöhung der Verkehrssicherheit, vgl. Abbildung 6.11. Dabei fühlt sich die Mehrzahl der Probanden durch die einzelnen Assistenzmaßnahmen nicht/sehr wenig beansprucht und abgelenkt, wie in Abbildung 6.12 dargestellt.

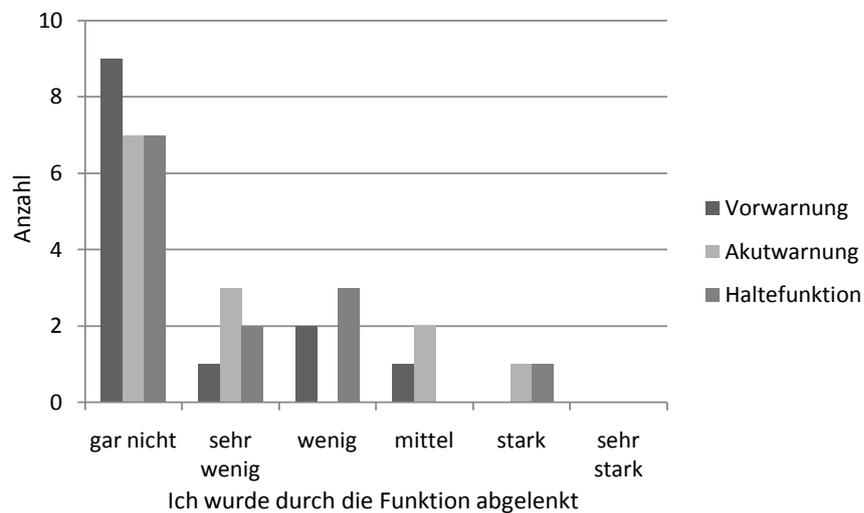


Abbildung 6.12: Bewertung der Systemfunktionen – Ablenkung der Probanden³³¹

Entsprechend geben die meisten Probanden an, die Systemfunktionen Vorwarnung, Akutwarnung und Haltefunktion im realen Verkehr nutzen zu wollen, vgl. Abbildung 6.13.

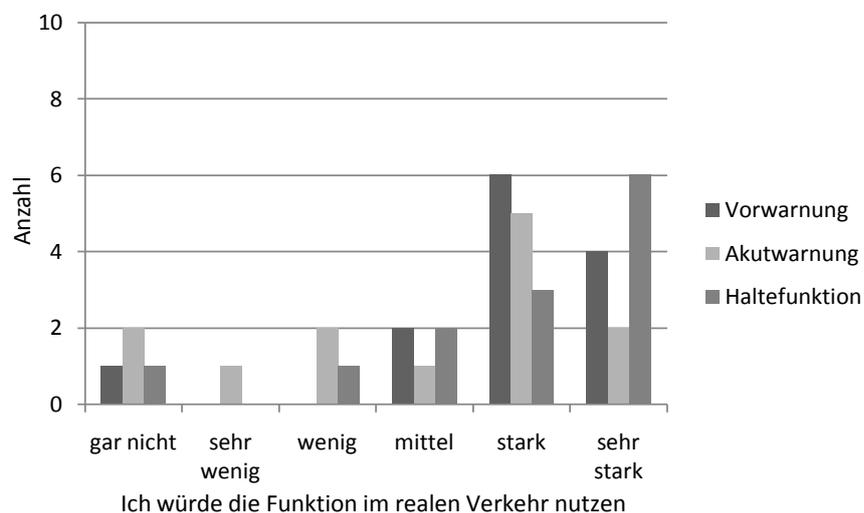


Abbildung 6.13: Bewertung der Systemfunktionen – Verwendung im realen Verkehr³³²

³³¹ vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PReVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 44-46.

Analog fällt auch die subjektive Bewertung des Gesamtsystems positiv aus, vgl. Abbildung 6.14. Die Probanden empfinden die Fahrt mit aktiviertem Einbiege-/Kreuzenassistenten mehrheitlich als komfortabel und geben an, dem System vertrauen zu können. Entsprechend wünschen sich die Meisten ein derartiges System für das eigene Fahrzeug³³³.

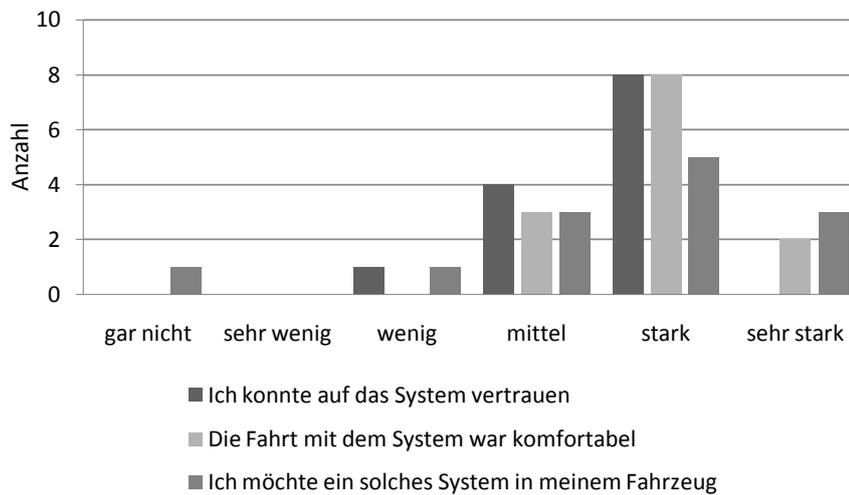


Abbildung 6.14: Bewertung des Gesamtsystems³³⁴

Zusammenfassend wird der untersuchte Einbiege- und Kreuzenassistent von den Probanden überwiegend akzeptiert, Hypothese H8 ist somit falsifiziert. Zudem findet sich eine mehrheitliche Akzeptanz der Probanden für die vorgestellten Systemfunktionen Vorwarnung, Akutwarnung mit autonomem Teileingriff und Haltefunktion mit autonomem Festhalten des Fahrzeugs. Folglich ist Hypothese H7 ebenfalls falsifiziert.

Die Ergebnisse der Untersuchung zur Akzeptanz des Systemverhaltens bei unterschiedlichen zeitlichen Lücken im Querverkehr sind in den Abbildungen 6.14 und 6.15 für die Situationen „Anfahren aus dem Stand“ und „Kreuzen ohne vorherigen Fahrzeugstillstand“ dargestellt. Abgebildet sind die Quote erfolgreicher Systemeingriffe, die Häufigkeit, mit der die entsprechende Zeitlücke als geeignet zum Durchfahren der Kreuzung

³³² vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PREVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 44-46.

³³³ Eine detaillierte Übersicht aller Ergebnisse der Befragung befindet sich in Kapitel 9.5.3 im Anhang.

³³⁴ vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PREVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 47.

angegeben wird und der Anteil der Situationen, in denen das Systemverhalten den Probanden subjektiv als angemessen erscheint³³⁵.

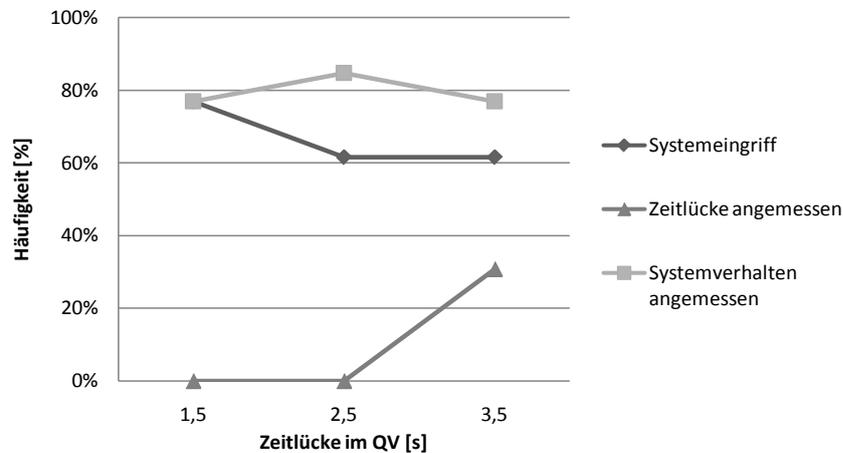


Abbildung 6.15: Bewertung des Systemverhaltens bei unterschiedlichen Zeitlücken im Querverkehr, Kreuzen ohne vorherigen Fahrzeugstillstand (Systemeingriff = Akutwarnung)

Es zeigt sich, dass selbst der größte untersuchte, zeitliche Abstand im Querverkehr den meisten Probanden als ungeeignet erscheint. Für die betrachteten, als zu klein empfundenen Lücken zwischen 1,5 s und 3,5 s ergibt sich eine weitgehende Akzeptanz der Akutwarnung. Eine Aussage über die Gültigkeit von Hypothese H9 erscheint auf Basis der untersuchten zeitlichen Lücken nicht möglich, hier wäre die Betrachtung größerer Zeitlücken von Interesse.

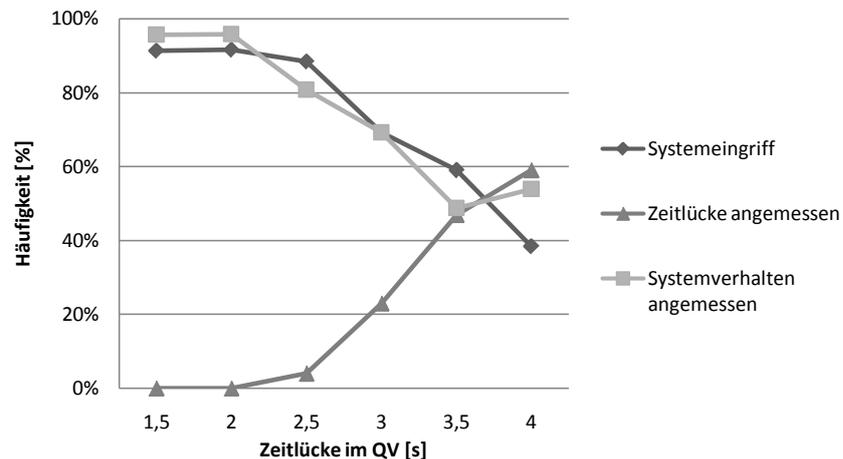


Abbildung 6.16: Bewertung des Systemverhaltens bei unterschiedlichen Zeitlücken im Querverkehr, Anfahren aus dem Stillstand (Systemeingriff = Haltefunktion)

³³⁵ Die subjektive Bewertung der Zeitlücke und des Systemverhaltens wird anhand der Fragen „Wären Sie im Normalfall bei dieser Lücke losgefahren?“ bzw. „War das Verhalten des Systems angemessen?“ erfasst, vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PReVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrs-assistenten* S. 42.

Analog ergibt sich für das Anfahren aus dem Stillstand, dass die größte untersuchte Zeitlücke im Querverkehr von 4 s nur in etwa 60% der simulierten Szenarien als geeignet beurteilt wird. Entsprechend erscheint auch hier eine zusätzliche Untersuchung mit größeren Zeitlücken sinnvoll. Für die untersuchten Zeitlücken zeigt sich, dass mit zunehmender Länge die Akzeptanz für die vorliegende Zeitlücke zunimmt, während die Quote der Systemeingriffe abnimmt. Ein entsprechender Verlauf des Systemverhaltens ist durchaus anzustreben, da Systemeingriffe idealerweise nur bei atypischem Fahrerverhalten aktiviert werden.

Allerdings sinkt mit zunehmender Zeitlücke zunächst auch die Quote der Situationen, in denen das Systemverhalten als angemessen bewertet wird, auf knapp unter 50%. Ab einer Zeitlücke im Querverkehr von 4 s scheint diese Quote wieder zu steigen, eine zuverlässige Aussage ist auf Basis der untersuchten Zeitlücken jedoch nicht möglich. Die Untersuchungen zeigen eine Abhängigkeit der Akzeptanz für Eingriffe des Kreuzungsassistenten von der Größe der Zeitlücken im Querverkehr.

Zusammenfassend erlauben die Ergebnisse der Bewertungsfahrt keine Aussage über die Gültigkeit von Hypothese H9, da die im Versuch angebotenen Zeitlücken im Querverkehr zu klein waren. Je nach Manöver bewerten lediglich 30% (Kreuzen ohne Halt) bzw. 60% (Anfahren) der Probanden die größte untersuchte Lücke als geeignet³³⁶.

Zudem ist ein Einfluss der Simulationsumgebung auf die Bewertung der Zeitlücken durch die Probanden nicht auszuschließen. So klagten mehrere Versuchspersonen während des Versuchs über Schwierigkeiten bei der Bewertung der Abstände zwischen vorfahrtsberechtigten Fahrzeugen.

Während der Prüffahrten ereigneten sich trotz der provozierten Unfallszenarien nur wenige kritische Situationen. Als Ergebnis zeigt sich eine subjektive Erkennungsrate von 38% (in 6 von 16 subjektiv als kritisch empfundenen Situationen erfolgte ein Systemeingriff) bei einer subjektiven Fehlerkennungsquote von 8% (in 5 von 61 subjektiv als unkritisch eingestuften Situationen erfolgte ein Eingriff)³³⁷. Für die subjektive Erkennungsrate ist zu berücksichtigen, dass nur für eine der 10 als kritisch empfundenen Situationen ohne Systemeingriff tatsächlich eine Kollision mit dem Querverkehr vorliegt. Aufgrund der geringen Anzahl erforderlicher Systemeingriffe erscheint eine Aus-

³³⁶ Die Wahl der Zeitlücken erfolgte anhand von Erkenntnissen aus der Literatur und aus Versuchen des WIVW zum Fahrerverhalten an Kreuzungen, vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PREVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 27.

³³⁷ vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PREVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 43.

sage über das zu erwartende Unfallvermeidungspotential anhand der Prüffahrten nicht möglich.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Vorversuche wird die Vorwarnung von der Mehrzahl der Probanden im Hauptversuch als zu spät empfunden. Mögliche Gründe für diese Abweichung liefert eine Auswertung der Fahrzustandsgrößen des Simulatorfahrzeugs für die im Rahmen der Vorversuche durchgeführten Haltevorgänge. Es zeigt sich, dass $a_{nec,min}$ in den Vorversuchen betragsmäßig größere Werte annimmt als in den Fahrerhaltensuntersuchungen. Der Median $a_{nec,min,50}$ sinkt auf $-2,6 \text{ m/s}^2$, das 95. Perzentil $a_{nec,min,95}$ liegt bei -4.2 m/s^2 . Dies deutet darauf hin, dass während der Vorversuche ein eher sportliches Fahrerverhalten vorliegt, die Fahrer akzeptieren bei Anhaltevorgängen eine höhere erforderliche Verzögerung³³⁸. Mögliche Gründe sind die spezifische Zusammensetzung des Probandenkollektivs³³⁹ und die fehlende kinästhetische Rückmeldung im statischen Fahrsimulator.

Eine Befragung im Anschluss an die Trainingsfahrt der Hauptversuche liefert zudem Informationen, inwieweit die einzelnen Warnelemente bei Akutwarnung und Haltefunktion vom Fahrer wahrgenommen werden, vgl. Abbildung 6.17.

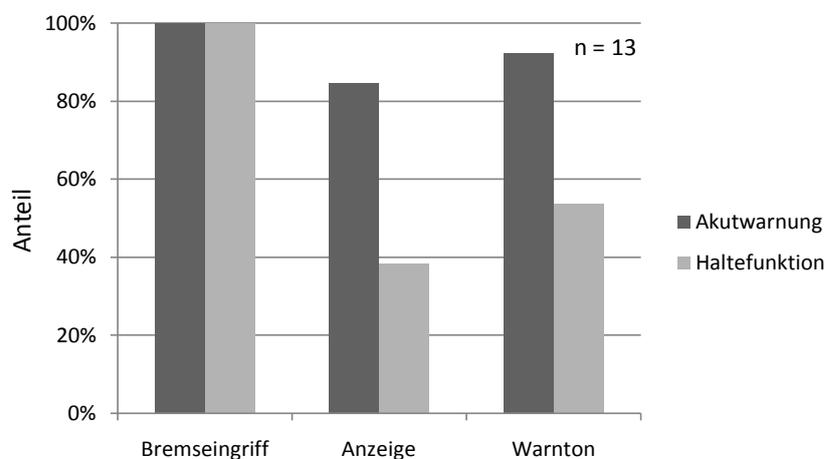


Abbildung 6.17: Genannte Bestandteile der Akutwarnung bzw. der Haltefunktion

Es fällt auf, dass der Bremsengriff sowohl bei Akutwarnung als auch bei der Haltefunktion jeweils von allen Probanden wahrgenommen wird³⁴⁰. Außerdem zeigt sich, dass die

³³⁸ Die im Rahmen der Fahrerhaltensanalyse bestimmten Werte sind betragsmäßig geringer, vgl. Kapitel 4.2: $a_{nec,min,50} = 2,0 \text{ m/s}^2$, $a_{nec,min,95} = 3,1 \text{ m/s}^2$.

³³⁹ Es handelt sich um ausschließlich männliche Fahrer mittleren Alters, vgl. Kapitel 6.2.3.1.

³⁴⁰ Der hohe Anteil registrierter Teileingriffe während der Fahrt wird möglicherweise durch das simulierte Ansprechverhalten und die Bewegungsdarstellung im dynamischen Fahrsimulator beeinflusst.

übrigen Warnelemente (Anzeige im HUD, Warnton) bei Akutwarnung von nahezu allen Probanden wahrgenommen werden, während die entsprechenden Anteile für die Haltefunktion deutlich zurückgehen. Dies bestätigt die Vermutung, dass Anzeigeelementen im Frontbereich bei geringem Abstand zur Kreuzung eine verringerte Aufmerksamkeit des Fahrers zukommt und entsprechende Maßnahmen daher um zusätzliche Warn-elemente zu erweitern sind³⁴¹. Eine mögliche Ursache ist die zunehmende Fokussierung der Aufmerksamkeit des Fahrers in Richtung des Querverkehrs. Gründe für den geringeren Anteil wahrgenommener Warntöne für die Haltefunktion verglichen mit der Akutwarnung sind hingegen nicht bekannt.

6.4 Fazit

Die subjektive Bewertung des umgesetzten Einbiege-/Kreuzenassistenten fällt sowohl für das Gesamtsystem als auch für die jeweiligen Assistenzmaßnahmen positiv aus. Systemeingriffe werden zu etwa 80% als angemessen beurteilt. Die überwiegende Mehrzahl der Probanden empfindet die einzelnen Eingriffsstufen jeweils als hilfreich oder als sehr hilfreich³⁴² und gibt an, ein entsprechendes Kreuzungsassistenzsystem im eigenen Fahrzeug nutzen zu wollen³⁴³. Entsprechend akzeptieren die Probanden mehrheitlich das Systemverhalten sowie die untersuchte Warn- bzw. Eingriffsstrategie.

Der in den Hauptversuchen als zu spät empfundene Auslösezeitpunkt der Vorwarnung zeigt Optimierungspotential bei dem entsprechenden Aktivierungskriterium auf. Dennoch ergibt sich für die Vorwarnung eine mehrheitliche Akzeptanz im Probandenkollektiv.

Von besonderer Bedeutung ist die Akzeptanz für die Verwendung eines Teil- oder Voll-eingriffs als unfallvermeidende Maßnahme, da sich das Unfallvermeidungspotential bei Verzicht auf aktive Bremsingriffe deutlich reduziert³⁴⁴. Der Bremsingriff als Element

Interessant wäre in diesem Zusammenhang der Vergleich resultierender Verzögerungsgradienten im Realfahrzeug und im Simulator.

³⁴¹ vgl. Kapitel 5.2.

³⁴² Gemessen auf einer sechsstufigen Skala von gefährlich über sehr störend, störend, mittel und hilfreich bis sehr hilfreich.

³⁴³ Insgesamt wird der Wunsch „Ich möchte ein solches System in meinem Fahrzeug“, bezogen auf das Gesamtsystem mit allen umgesetzten Warn- und Eingriffsstufen, auf einer sechsstufigen Skala von gar nicht bis sehr stark von 8 der 13 Probanden mit stark bzw. sehr stark angegeben.

³⁴⁴ vgl. Kapitel 4.2.

der Akutwarnung und Haltefunktion wird von allen Probanden wahrgenommen. Dennoch scheint dies keinen negativen Einfluss auf die mehrheitlich günstige Bewertung dieser Systemfunktionen zu haben. Demnach ergeben sich durch die Verwendung einer autonomen Teilbremsung als ergänzendes Warnelement während der Kreuzungsannäherung keine Probleme hinsichtlich der Fahrerakzeptanz.

Die subjektive Bewertung der Haltefunktion fällt besonders positiv aus. Allerdings zeigt sich, dass in der derzeitigen Systemausprägung keine zuverlässige Unterscheidung zwischen Anfahren und Herantasten an die Kreuzung vorliegt. Diese Einschränkung führte an Kreuzungen mit stark eingeschränkter Sicht zu vereinzelt False Positives. Entsprechende Kommentare der Probanden bestätigen diese Beobachtung der Versuchsleiter. Somit ergibt sich weiterer Untersuchungs- und Optimierungsbedarf hinsichtlich der Anfahrerkenntnis an VA-Kreuzungen.

Eine Bewertung des Systemverhaltens in Abhängigkeit von Zeitlücken im Querverkehr erscheint anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht möglich, da die untersuchten Zeitlücken zu klein sind. Entsprechende Untersuchungen bei größeren Zeitlücken können Informationen über die Zusammenhänge zwischen der vom Fahrer akzeptierten Zeitlücke und dem als angemessen empfundenen Systemverhalten liefern, wobei diese Aussagen zunächst auf die Simulationsumgebung beschränkt bleiben.

7 Diskussion und Ausblick

Eine der Hauptunfallursachen, insbesondere im innerstädtischen Straßenverkehr, ist das Fehlverhalten von Verkehrsteilnehmern an Kreuzungen und Einmündungen. Die vorliegende Arbeit leitet aus grundsätzlichen Forderungen an Fahrerassistenzsysteme, aus einer Analyse des Unfallgeschehens und aus Fahrerverhaltensuntersuchungen die Anforderungen an einen Einbiege- und Kreuzenassistenten ab und liefert konzeptionelle Ansätze zur Systemumsetzung.

Die aufgeführten Ergebnisse zum Fahrerverhalten beruhen einerseits auf Probandenversuchen mit hochgenauer Messtechnik zur präzisen Erfassung des Fahrerverhaltens, andererseits auf Daten einer Verkehrsbeobachtung mit Hilfe zweier Radar-Messstationen. Durch die Kombination dieser Datenquellen werden die Auswirkungen der spezifischen Nachteile von Probandenversuchen (bspw. reaktive Messeffekte) bzw. Verkehrsbeobachtungen (geringere Informationszahl und -genauigkeit) auf die Versuchsergebnisse minimiert. Für die untersuchten Verkehrsszenarien ergibt sich somit eine hohe Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Inwieweit sich die Ergebnisse auf andere Szenarien übertragen lassen (bspw. auf Landstraßenknotenpunkte) ist nicht bekannt und setzt weitere Untersuchungen voraus.

Die Analyse des Fahrerverhaltens im Stadtverkehr zeigt, dass durch den ausschließlichen Einsatz reiner Warnelemente ein Teil der typischen Unfallszenarien beim Einbiegen und Kreuzen an VA nicht vermeidbar ist, da die Gefahrensituation erst als solche erkennbar ist, nachdem der spätestmögliche Warnzeitpunkt überschritten wurde. Besonders kritisch sind Situationen, in denen der Fahrer einen begonnenen Bremsvorgang abbricht und in die Kreuzung einfährt, da diese Absicht erst nach dem letztmöglichen Warnzeitpunkt absehbar ist.

Aus der Unfalldatenanalyse folgt, dass sich an Vorfahrt-Achten-Kreuzungen etwa die Hälfte aller Unfälle in einem Geschwindigkeitsbereich ereignet, in dem Warnungen üblicherweise nicht mehr erfolgreich sind³⁴⁵. Da dieser Geschwindigkeitsbereich sowie die in der verwendeten Unfalldatenbank angegebene Ursprungsgeschwindigkeit nur näherungsweise bekannt sind, ist diese Zuordnung der Unfalldaten nicht exakt. Sie zeigt jedoch, dass die durch reine Warnelemente nicht adressierbaren Unfallszenarien einen durchaus relevanten Teil des Unfallgeschehens darstellen. Für diese Situationen wird

³⁴⁵ Mit abnehmender Fahrgeschwindigkeit verringert sich das für eine Fahrerreaktion verfügbare Zeitbudget, wodurch die Möglichkeiten eingeschränkt werden, eine Kollision mit Hilfe konventioneller Warnfunktionen zu vermeiden. Zum Vorgehen vgl. Kapitel 4.2.3

anhand des Fahrerverhaltens eine Steigerung des Unfallvermeidungspotentials durch die Erweiterung der Warnstrategie um einen aktiven Teilbremseingriff nachgewiesen. Entsprechende Gefahrensituationen sind bei Erweiterung der Warnung um eine Teilbremsung überwiegend rechtzeitig erkenn- und somit vermeidbar.

Alle bisherigen Ergebnisse beruhen auf einer angenommenen Reaktionszeit des Fahrers von 1 s. Eine Untersuchung zum Einfluss dieser angenommenen Reaktionszeit zeigt, dass die Aussagen robust gegenüber einer Variation der angenommenen Reaktionszeit im Bereich von 0,8 s bis 1,2 s sind. Somit lässt sich die Wirksamkeit einer Warnung auch durch Warnelemente, die eine Verringerung der Reaktionszeit auf 0,8 s zur Folge haben, nicht in dem Maße verbessern, wie es mit Hilfe des vorgestellten Teilbremseingriffs möglich ist.

Diese neuen Erkenntnisse zeigen, dass für die Einbiege-/Kreuzenassistenten an Vorfahrt-Achten-Kreuzungen andere Bedingungen gelten als an STOP-Schild- oder LSA-geregelten Kreuzungen. Da ein Haltegebot nur in Abhängigkeit von eventuell vorfahrtberechtigten Verkehrsteilnehmern im Querverkehr besteht, ergeben sich im Vergleich zu STOP-Schild- oder LSA-Assistenten zusätzlich zur sensorischen Herausforderung auch neue Anforderungen an geeignete Assistenzmaßnahmen. Überträgt man bestehende Ansätze zur STOP-Schild- oder LSA-Assistenz direkt auf VA-Situationen, lassen sich zwar Unfälle durch ungebremste Kreuzungseinfahrten vermeiden, nicht jedoch Kollisionen, die als Folge eines abgebrochenen Bremsvorgangs entstehen und auf Fehler bei der Beobachtung und Interpretation vorfahrtberechtigter Verkehrsteilnehmer zurückzuführen sind. Die vorliegende Arbeit liefert wesentliche Erkenntnisse zur Fahrerabsichts- und Gefahrenerkennung in diesen Situationen und leitet Anforderungen an geeignete Maßnahmen zur Unfallvermeidung ab.

Die vorgestellte, mehrstufige Warnstrategie, bestehend aus einer informierenden Vorwarnung, einer Akutwarnung und einer Haltefunktion, genügt diesen Anforderungen. Probandenversuche im Fahrsimulator weisen nach, dass entsprechende Funktionen vom Fahrer angenommen werden. Dies äußert sich in einer hohen Akzeptanz, sowohl für die einzelnen Systemfunktionen als auch für ein prototypisch umgesetztes Gesamtsystem zur Einbiege- und Kreuzenassistenten. Hiermit ist belegt, dass die aktive Vermeidung von Unfällen mit dem Querverkehr grundsätzlich möglich ist und entsprechende Warn- und Eingriffsstrategien vom Fahrer akzeptiert werden. Bedarf an weiterführenden Untersuchungen besteht hinsichtlich des Auslösezeitpunkts der informierenden Vorwarnung und der Erkennung des Anfahrens.

Die im Rahmen der Simulatorversuche durchgeführte, detaillierte Untersuchung der Zeitlücken im Querverkehr, bei denen Systemeingriffe vom Fahrer erwartet, akzeptiert oder als störend empfunden werden, zeigt, dass das Verhalten des prototypisch umge-

setzten Systems für Zeitlücken, die von den Probanden uneinheitlich bewertet werden³⁴⁶, ebenfalls unterschiedlich empfunden wird. Allerdings basieren diese Ergebnisse auf Untersuchungen mit verhältnismäßig kurzen Zeitlücken. Es wird daher im Rahmen der weiteren Entwicklung empfohlen, diesen Zusammenhang auch bei größeren Zeitlücken zu überprüfen.

Als weiterer, möglicher Grund für die uneinheitliche Bewertung der Systemfunktionalität ist anzuführen, dass durch die häufigen (und erfolgreichen) Assistenzeingriffe während der Versuchsdurchführung bei einem Teil der Probanden die Erwartungshaltung zu beobachten war, das System möge alle Unfälle beim Einbiegen und Kreuzen vermeiden (und somit bei vom Fahrer als zu klein eingeschätzten Zeitlücken im Querverkehr pauschal warnen). Dieser Erwartungshaltung wird das vorgestellte System nicht gerecht, vielmehr liegt der Schwerpunkt bei der Systemauslegung auf der Vermeidung störender False Positives³⁴⁷ unter Berücksichtigung einer möglichst hohen, aber keinesfalls hundertprozentigen Erkennungsrate kritischer Situationen.

In diesem Zusammenhang ist nicht auszuschließen, dass eine abweichende Wahrnehmung des Systems (trotz genauer Systembeschreibung bei Versuchsbeginn) auch die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung beeinflusst hat. Ein entsprechender Einfluss wird bei der Beurteilung des Gesamtsystems durch die Probanden gesehen, da die verwendeten Fragen teils die implizite Abschätzung des Systemnutzens durch den Probanden voraussetzen³⁴⁸. Die Untersuchung der umgesetzten Warnstrategie und der zugehörigen Maßnahmen erscheint in diesem Zusammenhang unproblematisch.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Akzeptanzstudie sind zudem mögliche Auswirkungen der Versuchsumgebung auf die Ergebnisse zu berücksichtigen. Hierzu zählen einerseits die Eigenschaften der verwendeten Fahrsimulatoren, andererseits die Methodik der Versuchsdurchführung und der Probandenbefragung. So kommt den Ergebnissen der Vorversuche aufgrund der nicht repräsentativen Zusammensetzung des Probandenkollektivs und der fehlenden kinästhetischen Rückmeldung im statischen Fahrsimulator eine geringere Bedeutung zu, als den Ergebnissen der Hauptversuche. Die Zuverlässigkeit der Hauptversuchsergebnisse ist hingegen durch die geringe Probandenzahl eingeschränkt.

³⁴⁶ Für diese Zeitlücken gibt etwa die Hälfte der Probanden an, die Kreuzung bei dieser Lückengröße durchfahren zu wollen, die andere Hälfte der Probanden stuft die Lücke als zu klein ein.

³⁴⁷ Der Begriff False Positive bezeichnet im Bereich der aktiven Sicherheit einen nicht erforderlicher Systemeingriff.

³⁴⁸ Betroffen sind Bewertungskriterien wie „Ich möchte ein solches System in meinem Fahrzeug“.

Im Rahmen der Fahrerhaltensanalyse wird aus der Streuung des Fahrerhaltens die theoretisch erreichbare Genauigkeit³⁴⁹ der Kollisionserkennung bestimmt. Diese genügt den aus der Gefahrenwahrnehmung des Fahrers sowie aus entsprechenden Vorversuchen abgeleiteten Anforderungen, wenn das Manöver des vorfahrtsberechtigten Kollisionspartners bekannt ist. Es zeigt sich, dass Einbiegemanöver für vorfahrtsberechtigten Querverkehr mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden können, wenn zum letztmöglichen Warnzeitpunkt (Ego-Fahrzeug) kein Bremsingriff für den potentiellen Kollisionspartner erkennbar ist³⁵⁰. Unter Verwendung idealer Eingangsdaten ist somit eine Aussage über die Kollisionswahrscheinlichkeit mit hinreichender Genauigkeit möglich.

Die abgeleiteten Sensoranforderungen weisen analytisch die Realisierbarkeit eines Einbiege-/Kreuzenassistenten nach, zeigen jedoch auch die, verglichen mit der Leistung aktuell im Fahrzeug verfügbarer Seriensensoren, hohen Ansprüche eines Kreuzungsassistenten an die Umgebungserfassung auf. Abhängig von spezifischen Sensorungenauigkeiten wird eine Anpassung von Warnkriterien und Kennwerten erforderlich, falls ein Anstieg der zu erwartenden Fehlerkennungsquote vermieden werden soll. Als Folge ist jedoch mit einem Rückgang des Unfallvermeidungspotentials zu rechnen. Da die Versuche zur Fahrerakzeptanz im Fahrsimulator unter Verwendung „idealer“ Daten erfolgten, ist nicht bekannt, inwieweit die Akzeptanz für das Gesamtsystem durch die Eigenschaften unterschiedlicher Sensor- oder Kommunikationstechnologien beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang werden zusätzliche Probandenversuche, entweder im Fahrsimulator mit simulierten Sensoren oder im Realfahrzeug, empfohlen.

Zur Untersuchung des Einflusses von Kreuzungsparametern auf die Genauigkeit der Situationsbewertung erfolgt als Bestandteil der Fahrerhaltensanalyse eine Variation der Kreuzungsparameter "Sichtbehinderung" und "Vorfahrtsregelung" sowie des Fahrmanövers. Hierbei ergeben sich signifikante Unterschiede des Fahrerhaltens an Kreuzungen in Abhängigkeit von dem Grad der Sichtbehinderung. Diese betreffen insbesondere den Kreuzungsabstand, bei dem ein während der Kreuzungsannäherung eingeleiteter Bremsvorgang vom Fahrer abgebrochen wird, um die Kreuzung ohne anzuhalten zu durchfahren. Die Unterscheidung der Vorfahrtsregelung weist an STOP-Schild-geregelten Kreuzungen tendenziell höhere Werte der erforderlichen Verzögerung

³⁴⁹ Abweichungen ergeben sich lediglich aus dem Fahrerhalten, evtl. Ungenauigkeiten eingesetzter Sensoren sind nicht berücksichtigt.

³⁵⁰ Die Ergebnisse der Verkehrsbeobachtung zeigen, dass vorfahrtsberechtigte Verkehrsteilnehmer die Geschwindigkeit reduzieren, wenn an der Kreuzung ein Einbiegemanöver bevorsteht.

runge³⁵¹ auf als für „Vorfahrt Achten“. Zwischen den Manövern Rechtseinbiegen, Linkseinbiegen und Kreuzen lassen sich für wartepflichtige Fahrzeuge nicht-signifikante Tendenzen feststellen. Eine Verbesserung der Zuverlässigkeit der Gefahrenerkennung erscheint somit durch Berücksichtigung dieser Unterschiede durch ein angepasstes Fahrerhaltensmodell möglich. Eine Quantifizierung des Potentials liegt nicht vor.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass sich der Einfluss eines Kreuzungsparameters im Realverkehr nur schwer isolieren lässt. Die Auswahl geeigneter Kreuzungen anhand einer Kriterienliste minimiert zusätzliche Einflussfaktoren, auszuschließen sind entsprechende Störeinflüsse jedoch nicht. Die Ausnahme sind Erkenntnisse zum Einfluss des Fahrmanövers auf das Fahrerverhalten, die auf Daten der Verkehrsbeobachtung und somit auf Paarvergleichen an identischen Kreuzungen beruhen. Gleiches gilt für die Verkehrsbeobachtung an einer exemplarischen Kreuzung mit künstlicher Variation der Sichtbehinderung. Für künftige Untersuchungen wird die Variation zusätzlicher Parameter wie Ortslage, Fahrstreifenbreite oder Verkehrsdichte vorgeschlagen, ebenso die Berücksichtigung der Vorfahrtsregelung „Rechts vor Links“.

Ausblickend erscheint es sinnvoll, ein System zur Einbiege-/Kreuzenassistentz mit anderen kreuzungsspezifischen Assistenzfunktionen wie Linksabbiege- und Ampelassistentz sowie Fußgängererkennung zu kombinieren. So lassen sich einerseits Synergieeffekte hinsichtlich der technologischen Voraussetzungen nutzen, andererseits wird der Fahrer in Kreuzungssituationen durch ein einheitliches HMI unterstützt. Als Ergebnis des Projektes PReVENT sind erste Schritte in diese Richtung erkennbar³⁵².

³⁵¹ Die erforderliche Verzögerung a_{nec} gibt an, mit welcher konstanten Beschleunigung der Fahrer das Fahrzeug verzögern müsste, um am Kreuzungseintritt zum Stehen zu kommen. Sie ergibt sich in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit v und dem Kreuzungsabstand d zu: $a_{nec} = -v^2/2d$

³⁵² vgl. HOPSTOCK; KLANNER (2007): *Intersection Safety – Just a Vision?* S. 67-80.

8 Zusammenfassung

Der Entwicklung aktiver Sicherheitssysteme kommt in der Fahrzeugtechnik eine immer höhere Bedeutung zu. Obwohl ein Großteil der Unfallzahlen auf Kreuzungen im innerstädtischen Bereich entfällt, existiert derzeit kein Seriensystem zur Kollisionsvermeidung an Kreuzungen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem abgeleitet, das den Fahrer in besonders unfallträchtigen Verkehrssituationen beim Einbiegen und Kreuzen unterstützt. Ziel dieses Einbiege-/Kreuzenassistenten ist die Vermeidung von Vorfahrtsmissachtungen, die zu einer Kollision mit vorfahrtsberechtigtem Querverkehr führen. Die Entwicklung eines entsprechenden, aktiven Sicherheitssystems wird dokumentiert.

Ausgangspunkt der Untersuchung ist eine Unfalldatenanalyse zur Identifikation schwerpunktmäßiger Unfallszenarien. Für diese Szenarien erfolgt eine Untersuchung des Fahrerverhaltens durch Probandenversuche und eine Verkehrsbeobachtung. Als Ergebnis der Fahrerverhaltensanalyse ergeben sich neue Erkenntnisse über die zu erwartende Wirksamkeit unterschiedlicher Assistenzmaßnahmen und zur Erkennbarkeit von Gefahrensituationen für verschiedene Unfallszenarien beim Einbiegen und Kreuzen. Diese umfassen den Nachweis, dass die Vermeidung eines relevanten Anteils der Unfälle beim Einbiegen oder Kreuzen autonom eingreifende oder zumindest teileingreifende Maßnahmen erforderlich macht.

Eine mehrstufige Warn- und Eingriffsstrategie, die diesen Erkenntnissen Rechnung trägt, wird diskutiert. Probandenversuche im dynamischen Fahrsimulator weisen die Fahrerakzeptanz sowohl für einzelne Maßnahmen der vorgestellten Warn- und Eingriffsstrategie als auch für das prototypisch umgesetzte Gesamtsystem nach.

Ausgehend von den für diese Assistenzfunktionen notwendigen Informationen wird ein Ausblick auf die zur Umsetzung im Fahrzeug erforderliche Sensorausrüstung gegeben. Die analytische Betrachtung zeigt, dass die Informationsanforderungen des Einbiege-/Kreuzenassistenten mittels aktueller GNSS-, Sensor- und Kommunikationstechnologien theoretisch beherrschbar sind. Die derzeitigen Kosten entsprechender Sensoren und die praktisch nicht vorhandene Ausrüstung von Fahrzeugen mit Kommunikationstechnologien lässt die Einführung entsprechender Systeme in Serie für die kommenden Jahre dennoch fraglich erscheinen.

Abschließend wird weiteres Forschungspotential auf dem Weg zur aktiven Unfallvermeidung durch Kreuzungsassistenz aufgezeigt und diskutiert.

Wesentliche Erkenntnis der Arbeit ist, dass die Vermeidung von Unfällen, die durch Fahrerfehler bei der Wahrnehmung oder Bewertung des Querverkehrs verursacht werden, nur zu einem geringen Teil durch warnende Maßnahmen möglich ist. Die Untersuchung autonom eingreifender Maßnahmen zeigt, dass sich entsprechende Unfallszenarien durch die Erweiterung der Warnung um einen aktiven Teilbremseingriff mehrheitlich vermeiden lassen.

Die in Probandenversuchen nachgewiesene Akzeptanz des Teilbremseingriffs als Bestandteil der Warnstrategie eines Querverkehrsassistenten führt zu dem Fazit, dass die Steigerung des Unfallvermeidungspotentials durch autonome Teileingriffe für das Einbiegen und Kreuzen ohne negative Auswirkungen auf die Fahrerakzeptanz möglich ist.

9 Anhang

9.1 Vorliegende Fahrer Verhaltensdaten

Für erste Untersuchungen des Fahrer Verhaltens wird auf bereits vorliegende Messdaten einer entsprechenden Fremdstudie zurückgegriffen. Die Positionsbestimmung in Kreuzungen mit Einbiegemanöver erfolgte im Rahmen dieser Versuche über den Lenkbeginn. Für ohne Richtungswechsel durchfahrene Kreuzungen wurde die Position über den zurückgelegten Weg seit/vor dem letzten/nächsten Einbiegen bestimmt, wobei der Weg durch Integration der Raddrehzahlen bestimmt wurde³⁵³.

Da hierzu teilweise Wegstücke von mehreren hundert Metern verwendet wurden, führen Ungenauigkeiten der Raddrehzahlsensoren zu teils erheblichen Positionsabweichungen, die eine zusätzliche Datenaufbereitung erforderlich machen. Die tatsächliche Genauigkeit der aufbereiteten Daten ist dennoch nicht bekannt.

9.2 Probandenversuche zum Fahrer Verhalten

9.2.1 Positionsbestimmung über Lichtschranken

Zur präzisen Bestimmung der Fahrzeugposition wird an jeder Kreuzung ein Reflektor, eingesetzt, der beim Durchfahren der Kreuzung von zwei fahrzeugfesten Lichtschranken detektiert wird. Die Strahlen der Lichtschranken am Fahrzeug sind um den Winkel α gegeneinander verdreht, so dass eine Bestimmung der Fahrzeugposition im kreuzungsfesten Koordinatensystem möglich ist, wie in Abbildung 9.1 dargestellt.

³⁵³ vgl. VOLLRATH ET AL. (2004): *INVENT Kreuzungsverhalten - Endbericht* S. A23f.

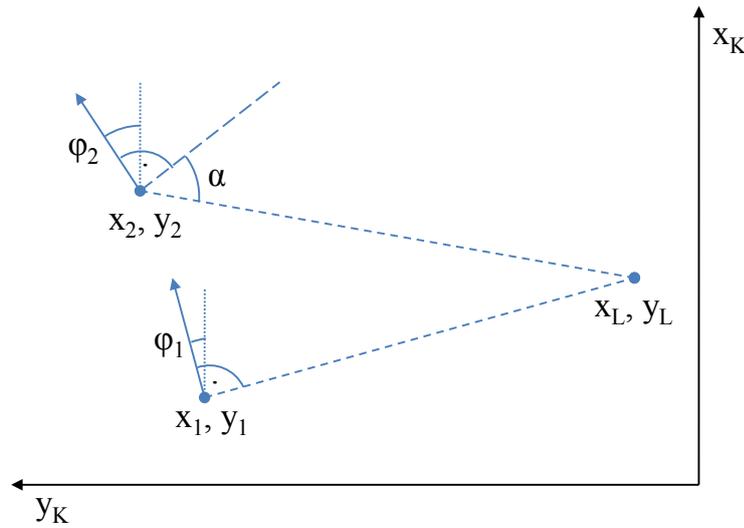


Abbildung 9.1: Bestimmung der Fahrzeugposition mit Hilfe der Lichtschrankenbaken

Die Position der Lichtschranke in einem kreuzungsfesten Koordinatensystem ist gegeben durch x_L, y_L . Die Position und Ausrichtung des Fahrzeugs bei Detektion der Bake über die erste Lichtschranke beschreiben x_1, y_1 und der Gierwinkel φ_1 . Die Detektion durch die zweite Lichtschranke wird durch x_2, y_2 und φ_2 definiert. Aus den geometrischen Beziehungen ergibt sich:

$$\tan(\varphi_1) = \frac{(x_L - x_1)}{(y_1 - y_L)} \quad (9.1)$$

$$\tan(\varphi_2 - \alpha) = \frac{(x_L - x_2)}{(y_2 - y_L)} \quad (9.2)$$

Die Größen x_2 und y_2 lassen sich auch in Abhängigkeit von x_1, y_1 darstellen:

$$x_2 = x_1 + \Delta x \quad (9.3)$$

$$y_2 = y_1 + \Delta y \quad (9.4)$$

Somit ergibt sich für den Punkt der ersten Lichtschrankendetektion:

$$x_1 = x_L - \tan(\varphi_1) * \left(\frac{\Delta x + \Delta y * \tan(\varphi_2 - \alpha)}{\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2 - \alpha)} \right) \quad (9.5)$$

$$y_1 = y_L + \frac{\Delta x + \Delta y * \tan(\varphi_2 - \alpha)}{\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2 - \alpha)} \quad (9.6)$$

Die Gierwinkel zum Zeitpunkt der Lichtschrankendetektion φ_1 und φ_2 liefert die Inertialplattform. Die Abstände der Lichtschranken Δx und Δy entsprechen der Summe des zwischen den Detektionspunkten zurückgelegten Weges und werden durch Integration der Correvitgeschwindigkeit bestimmt.

9.2.2 Probandenkollektiv

Um möglichst repräsentative Versuchsergebnisse zu erhalten, wurden die Fahrversuche zur Fahrerverhaltensanalyse mit Probanden aller Altersgruppen durchgeführt. Angestrebt war eine Gleichverteilung hinsichtlich Geschlecht und Alter. Abbildung 9.2 zeigt die Altersverteilung des Probandenkollektivs.

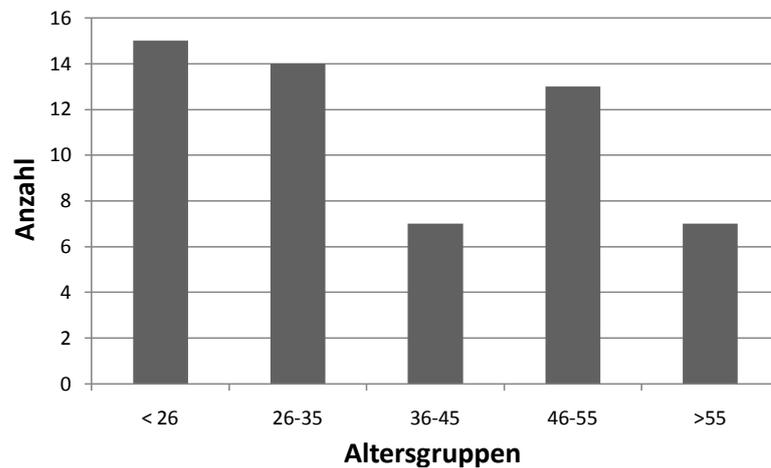


Abbildung 9.2: Altersverteilung des Probandenkollektivs der Fahrerverhaltensanalyse

Die geringere Anzahl von Probanden im Alter von 36-45 Jahren ist auf vermehrte Absagen von Probanden dieser Altersgruppe und die kurzfristige Verfügbarkeit jüngerer Probanden als Ersatzfahrer zurückzuführen. Für Probanden der Altersgruppe ab 56 Jahren gestaltete sich die Akquise schwieriger, was zu einer geringeren Probandenzahl für diese Altersgruppe führt.

9.3 Messstationen zur Verkehrsbeobachtung

9.3.1 Aufbau

Die Verkehrsbeobachtung erfolgt über zwei eigens aufgebaute Messstationen³⁵⁴. Abbildung 9.2 rechts zeigt eine Verkehrsbeobachtungsstation. Eine Mülltonne dient als Gehäuse und schützt die Messtechnik vor äußeren Einflüssen. Zusätzlich ermöglicht sie die unauffällige Platzierung der Messstation im Verkehrsbild. Zur Erfassung der Zustandsgrößen von Verkehrsteilnehmern (Geschwindigkeit, Abstand und horizontaler Versatz) verwenden beide Stationen Radarsensoren, wie sie derzeit in Serie für ACC-Systeme (Adaptive Cruise Control) der zweiten Generation eingesetzt werden

³⁵⁴ Der Aufbau dieser Messstationen erfolgte im Rahmen eines Advanced Design Projects (ADP) am Fachgebiet Fahrzeugtechnik, vgl. HEINZ ET AL. (2007): *Entwicklung einer mobilen Radarmessstation*.

(Abbildung 9.3 links). Diese Sensoren stellen die genannten Zustandsdaten für bis zu 32 Objekte zur Verfügung³⁵⁵.



Abbildung 9.3: der zur Beobachtung des Verkehrs eingesetzte Radarsensor (links)³⁵⁶ und eine der Verkehrsbeobachtungsstationen (rechts)

9.3.2 Ausrichtung und Koordinatentransformation

Da die Koordinatensysteme der Messstationen nicht mit dem der Kreuzung übereinstimmen, werden diese wie folgt allgemein transformiert:

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{xk} \\ d_{yk} \end{pmatrix} \quad (9.7)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_k \\ \dot{y}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{pmatrix} \quad (9.8)$$

Dabei seien (x_k, y_k) die Koordinaten der Kreuzung, (x_s, y_s) die Koordinaten des Sensors, d_{xk} bzw. d_{yk} die Verschiebung in x_k - bzw. y_k -Richtung und α der Winkel zwischen x_k - und x_s -Achse. Abbildung 9.4 veranschaulicht die Zusammenhänge.

³⁵⁵ Die Messung der Objektgeschwindigkeit beruht auf dem Dopplereffekt, während der Abstand erfasster Objekte aus der Laufzeit bestimmt wird.

³⁵⁶ N.N. (2007): *Bosch GmbH: Online Presseportal*.

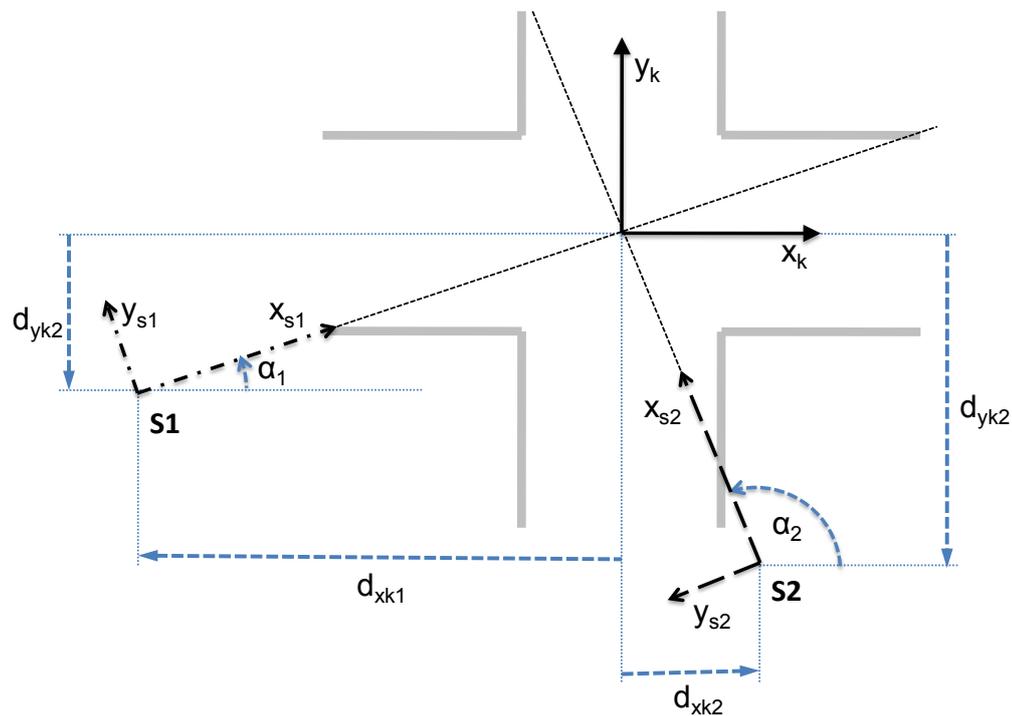


Abbildung 9.4: Ausrichtung der Koordinatensysteme in der Kreuzung

Zu beachten ist, dass jede Messstation nur für eine Richtung im Kreuzungskoordinatensystem „zuständig“ ist. So werden der Abstand und die Geschwindigkeit von Fahrzeugen entlang der x_k -Richtung nur von Messstation 1 und die Werte von Fahrzeugen in y_k -Richtung analog nur von Messstation 2 bestimmt. Somit ergibt sich für Fahrzeuge in x_k -Richtung:

$$\begin{pmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{s1} & -y_{s1} \\ \dot{x}_{s1} & -\dot{y}_{s1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \\ \sin \alpha_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{xk1} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9.9)$$

Für Fahrzeuge in y_k -Richtung gilt:

$$\begin{pmatrix} y_k \\ \dot{y}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{s2} & y_{s2} \\ \dot{x}_{s2} & \dot{y}_{s2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin \alpha_2 \\ \cos \alpha_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{yk2} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9.10)$$

Vereinfachend wird der Ausrichtungswinkel der Messstationen bei der Geschwindigkeitsmessung nicht berücksichtigt. Es ergibt sich somit für Geradeausfahrt eines Objektes ein systematischer Fehler der gemessenen Geschwindigkeit von

$$\Delta v = v_{\text{Objekt}} * (1 - \cos(\alpha_{\text{Station}})) \quad (9.11).$$

Für den üblichen Bereich des Ausrichtungswinkels α (zwischen 3° und 7°) ergibt sich ein relativer Fehler von maximal 0,7%. Dies entspricht für den vorfahrtsberechtigten Querverkehr einer vernachlässigbaren Geschwindigkeitsabweichung von 0,35 km/h.

9.3.3 Genauigkeit

Um Messungen unbemerkt von Verkehrsteilnehmern durchzuführen, und eine Beeinflussung des Verkehrsgeschehens auszuschließen, befinden sich die Radarsensoren verdeckt im Inneren der Messstationen. Die Messung erfolgt somit durch das Gehäusematerial. Um Abstands- und Geschwindigkeitsgenauigkeit der fertigen Messstationen zu überprüfen, werden statische und dynamische Versuche durchgeführt. Im Rahmen der statischen Versuche erfolgt ein Vergleich des gemessenen Abstands definierter Objekte mit dem tatsächlichen (mit Hilfe eines Laser-Distometers mit einer Genauigkeit im mm-Bereich bestimmten) Objektabstand. Es ergibt sich eine maximale Abstandsabweichung von 1m und eine Standardabweichung von $\pm 0,5$ m.

Bei den dynamischen Versuchen handelt es sich um Vergleichsfahrten, die mit einem Versuchsträger mit hochgenauer Geschwindigkeitssensorik (Datron Correvit) durchgeführt werden. Die Positionsbestimmung des Versuchsträgers relativ zu den Messstationen erfolgt über Lichtschranken. Durchgeführt werden Versuchsfahrten bei konstanter Geschwindigkeit und Anhalte-/Anfahrvorgänge.

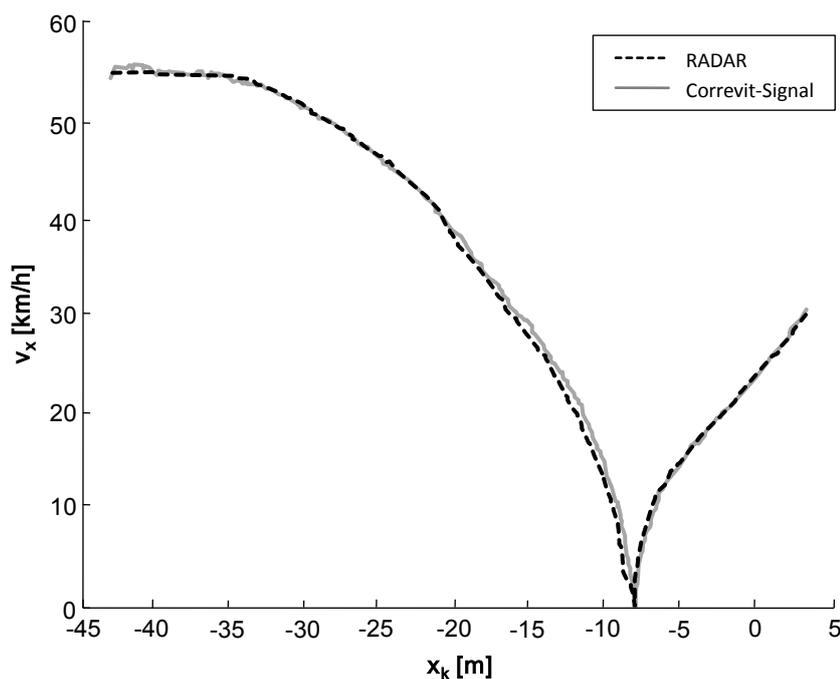


Abbildung 9.5: Dynamische Vergleichsfahrt zur Genauigkeitsbestimmung der Messstationen

Die Auswertung der Fahrten zeigt für alle Messungen eine Abweichung der Geschwindigkeit < 2 km/h. Abbildung 9.5 stellt exemplarisch den Verlauf der Geschwindigkeit während eines vom Vergleichsfahrzeug simulierten Anhaltevorgangs dar.

9.4 Ausgewählte Sensor- bzw. Kommunikationstechnologie

Um die Auswirkungen der Informationsungenauigkeiten realer Sensoren auf die Verlässlichkeit der Situationsbewertung zu bestimmen, erfolgt in Kapitel 5.1 eine analytische Fehlerbetrachtung für unterschiedliche Systemkonfigurationen. Die exemplarisch untersuchten Systemausprägungen basieren einerseits auf einem fahrzeugautarken LIDAR-Sensor zur Umgebungserfassung, andererseits auf Technologien zur C2C-Kommunikation. Die Spezifikationen des verwendeten LIDAR-Sensors sind in Tabelle 9.1 aufgeführt.

Tabelle 9.1: Spezifikationen des LIDAR-Sensors³⁵⁷

Beschreibung	Wert
Genauigkeit	± 0.1 m
Reichweite max.	200 m
Mindestabstand	ca. 0.3 m
Objekt Tracking	bis zu 200 m
Horizontaler Sichtbereich	max. 240°
Horizontale Winkelauflösung	0.1° oder 0.25° oder 0.5° oder 1.0°
Vertikaler Sichtbereich	ca. 3.2°
Vertikale Winkelauflösung	ca. 0.8°
Abstandsauflösung	0.04 m
Scannfrequenz	12.5 Hz oder 25.0 Hz

Da keine Angaben zur Genauigkeit des Geschwindigkeitssignals des IBEO-Lasersensors zur Verfügung stehen, wird die Genauigkeit der Geschwindigkeit anhand der Fehlerfortpflanzung der Abstandsgenauigkeit angenähert. Der Zusammenhang zur Bestimmung der Relativgeschwindigkeit lautet:

$$v_{rel} = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (9.12)$$

Die Formel für lineare Fehlerfortpflanzung ergibt sich zu:

$$\Delta v_{rel} = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial v_{rel}}{\partial d}\right| * \Delta d\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial v_{rel}}{\partial t}\right| * \Delta t\right)^2} \quad (9.13)$$

Unter der Annahme, dass Δt exakt bekannt ist, vereinfacht sich die Formel zu:

³⁵⁷ Bei dem ausgewählten Sensor handelt es sich um einen IBEO ALASCA, vgl. N.N. (2007): *IBEO Product Overview*.

$$\Delta v_{rel} = \left(\left| \frac{1}{\Delta t} \right| * \Delta(\Delta d) \right) \quad (9.14)$$

Zusätzlich ergibt sich eine Ungenauigkeit des Kreuzungsabstandes durch Winkel- und Abstandsungenauigkeiten des Laser-Sensors. Für $d_{y,QV}$ = Abstand des Querverkehrs zur Kreuzung, $d_{R,QV}$ = Abstand zum Ego-Fahrzeug, β = Winkel zum Querverkehr gilt:

$$d_{y,QV} = d_{R,QV} * \sin \beta \quad (9.15)$$

Die Fehlerbetrachtung liefert:

$$\Delta d_{y,QV} = \sqrt{\left(\left| \frac{1}{\sin \beta} \right| * \Delta d_{R,QV} \right)^2 + \left(\left| -\frac{\cos \beta * d_{R,QV}}{(\sin \beta)^2} \right| * \Delta \beta \right)^2} \quad (9.16)$$

Da Technologien zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sich aktuell in der Entwicklung befinden, stehen für derartige Systeme derzeit keine finalen Spezifikationen zur Verfügung. Tabelle 9.2 führt entsprechende Anforderungen an geeignete Kommunikationslösungen auf. Das Vorgehen bei der Berechnung der jeweils zu erwartenden Gesamtungenauigkeit ist in Kapitel 5.1 erläutert.

Tabelle 9.2: Spezifikationen der angenommenen Kommunikationslösung³⁵⁸

Beschreibung	Wert
Reichweite max.	351 m
Latenzzeit max	0.1 s

9.5 Validierung der Fahrerakzeptanz

9.5.1 Eingesetzte Fahrsimulatoren

Die Umsetzung eines prototypischen Einbiege-/Kreuzenassistenten erfolgt im Fahrsimulator. Die Verwendung der Simulation erlaubt Funktionstests in einer frühen Phase der Systementwicklung und gestattet Probandenversuche in ansonsten sicherheitskritischen Situationen ohne eine Gefährdung der Versuchsteilnehmer.

Zur Systemauslegung wird der statische Fahrsimulator der BMW-Group verwendet. Dieser verfügt über ein vollständiges Mock-up mit sämtlichen Bedienelementen. Die visuelle Darstellung erfolgt über eine 270° Projektion der Front- und Seitenansicht.

Abbildung 9.6 zeigt die Außenansicht des für Probandenversuche verwendeten dynamischen Fahrsimulators. Der dynamische Fahrsimulator der BMW-Group verfügt

³⁵⁸ vgl. KLANNER ET AL. (2006): *ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenten* S. 989-1012.

über einen 360°-Projektionsdom³⁵⁹, der auf einer sogenannten Steward-Plattform ruht. Diese erlaubt rotatorische sowie translatorische Bewegungen in alle Raumrichtungen³⁶⁰. Die Fahrzeugkabine ist auswechselbar, für die Versuche wird die Kabine eines 3er BMW Touring (E91) verwendet (vgl. Kapitel 6.2.2, Abbildung 6.7).



Abbildung 9.6: Der verwendete dynamische Fahrsimulator der BMW- Group³⁶¹

Beide Simulatoren erlauben die Ausgabe akustischer oder visueller Warnungen. Da das Mock-up zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung kein HUD zur Verfügung stellt, werden entsprechende Anzeigen als virtuelles HUD in die Projektion der Frontsicht eingeblendet (Abbildung 9.7).



³⁵⁹ Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung war die visuelle Darstellung auf eine 180°-Frontansicht und die Simulation der Spiegelansichten beschränkt.

³⁶⁰ Eine detaillierte Beschreibung des Bewegungssystems findet sich bspw. in HUESMANN ET AL. (2003): *Der neue dynamische Fahrsimulator der BMW Fahrzeugforschung*.

³⁶¹ N.N. (2007): *BMW Innovationstag Fahrerassistenzsysteme*.

Abbildung 9.7: virtuelles HUD im Fahrsimulator

Eingriffe in die Fahrzeugdynamik, bspw. zur Simulation einer Teilbremsung, sind ebenfalls für beide Simulatoren möglich. Eine haptische bzw. kinästhetische Rückmeldung über derartige Eingriffe erfolgt allerdings nur im dynamischen Simulator.

9.5.2 Ergebnisse der Vorversuche

Im Rahmen der Vorversuche werden neben der Normalfahrt zwei Testfahrten durchgeführt. Aufgabe der Probanden bei der ersten Testfahrt ist es, möglichst viele kritische Verkehrssituationen und damit eine große Anzahl untersuchbarer Systemeingriffe zu erzeugen. Abbildung 9.8 zeigt das Ergebnis der Befragung der Probanden.

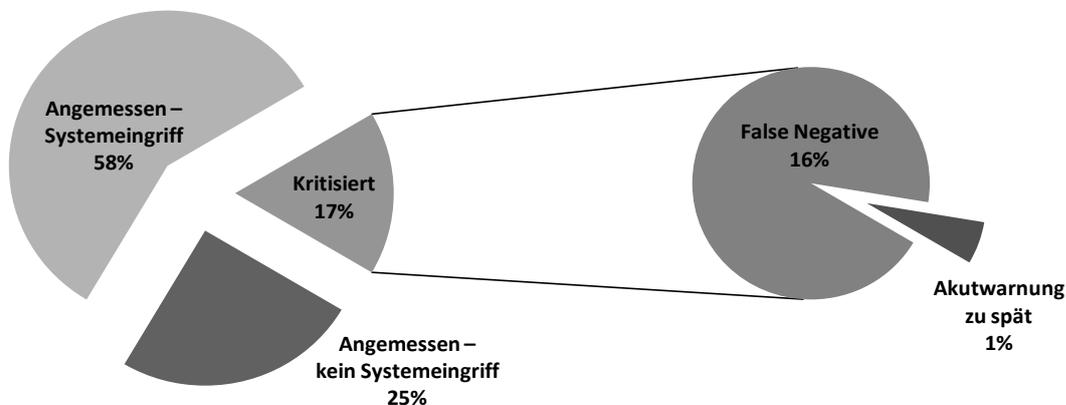


Abbildung 9.8: Ergebnis der Vorversuche – Subjektive Urteile aus Testfahrten für kritische Situationen

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Normalfahrt steigt erwartungsgemäß die Quote angemessener Systemeingriffe an. Zudem fällt auf, dass auch die Zahl der False Negatives ansteigt. Die Ursache hierfür liegt im Fahrerverhalten beim Erzeugen kritischer Situationen, das wegen der unrealistischen Aufgabe nicht auf realen Verkehr übertragbar ist. Eine Untersuchung der Fahrzustandsgrößen zeigt, dass in diesen Situationen unmittelbar vor Eintritt in die Kreuzung Beschleunigungen bzw. Verzögerungen auftreten, die nicht innerhalb des typischen 5%...95% Fahrerverhaltens liegen. Somit ist zum spätestmöglichen Warn-/Eingriffszeitpunkt keine hinreichende Kollisionswahrscheinlichkeit gegeben.

Aufgabe der Probanden bei der zweiten Testfahrt ist es, fehlerhaftes Systemverhalten (False Positives und False Negatives) zu provozieren und die Systemgrenzen auszutesen. Das Ergebnis dieser Versuchsreihe ist in Abbildung 9.9 dargestellt.

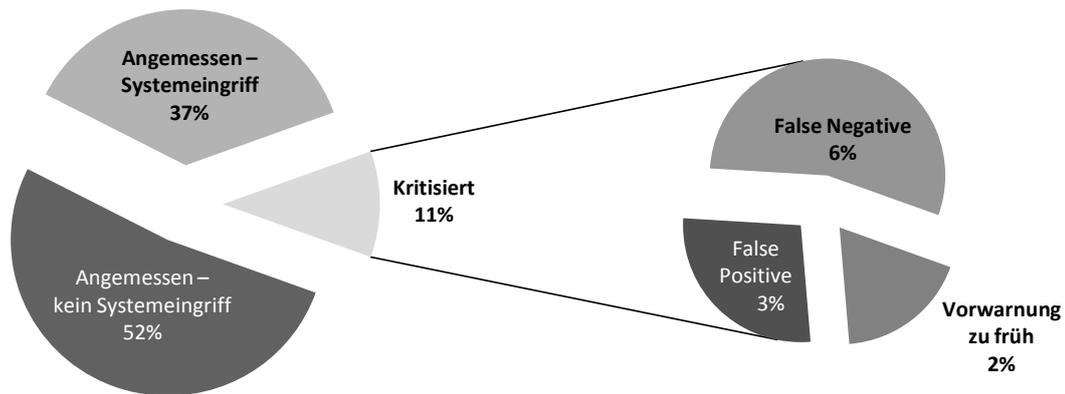


Abbildung 9.9: Ergebnis der Vorversuche – Subjektive Urteile aus Testfahrten für kritische Situationen

9.5.3 Ergebnisse der Hauptversuche

Im Rahmen der Hauptversuche erfolgt jeweils im Anschluss an die Versuchsfahrten eine Befragung der Probanden mit Hilfe von Fragebögen³⁶². Ziel dieser Befragung ist es, die Akzeptanz für die Systemfunktionen Vorwarnung, Akutwarnung mit Teileingriff und Haltefunktion sowie für das Gesamtsystem zu erfassen. Die Ergebnisse dieser Befragung sind in den Abbildungen 9.10 bis 9.13 dargestellt³⁶³.

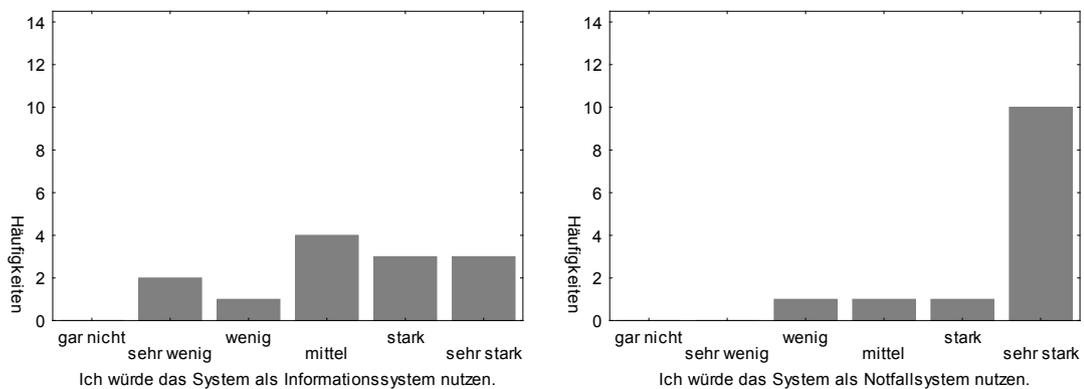


Abbildung 9.10: Subjektive Aussage zum Verwendungszweck des Einbiege-/Kreuzenassistenten

³⁶² Die Durchführung der Hauptversuche wie auch die Befragung erfolgen im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes PREVENT durch das WIVW. Die Fragebögen zur Systembewertung finden sich in GRADENEGGER ET AL. (2006): *PREVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 103ff.

³⁶³ vgl. GRADENEGGER ET AL. (2006): *PREVENT, AIDE: Untersuchung des Querverkehrsassistenten* S. 43-49.

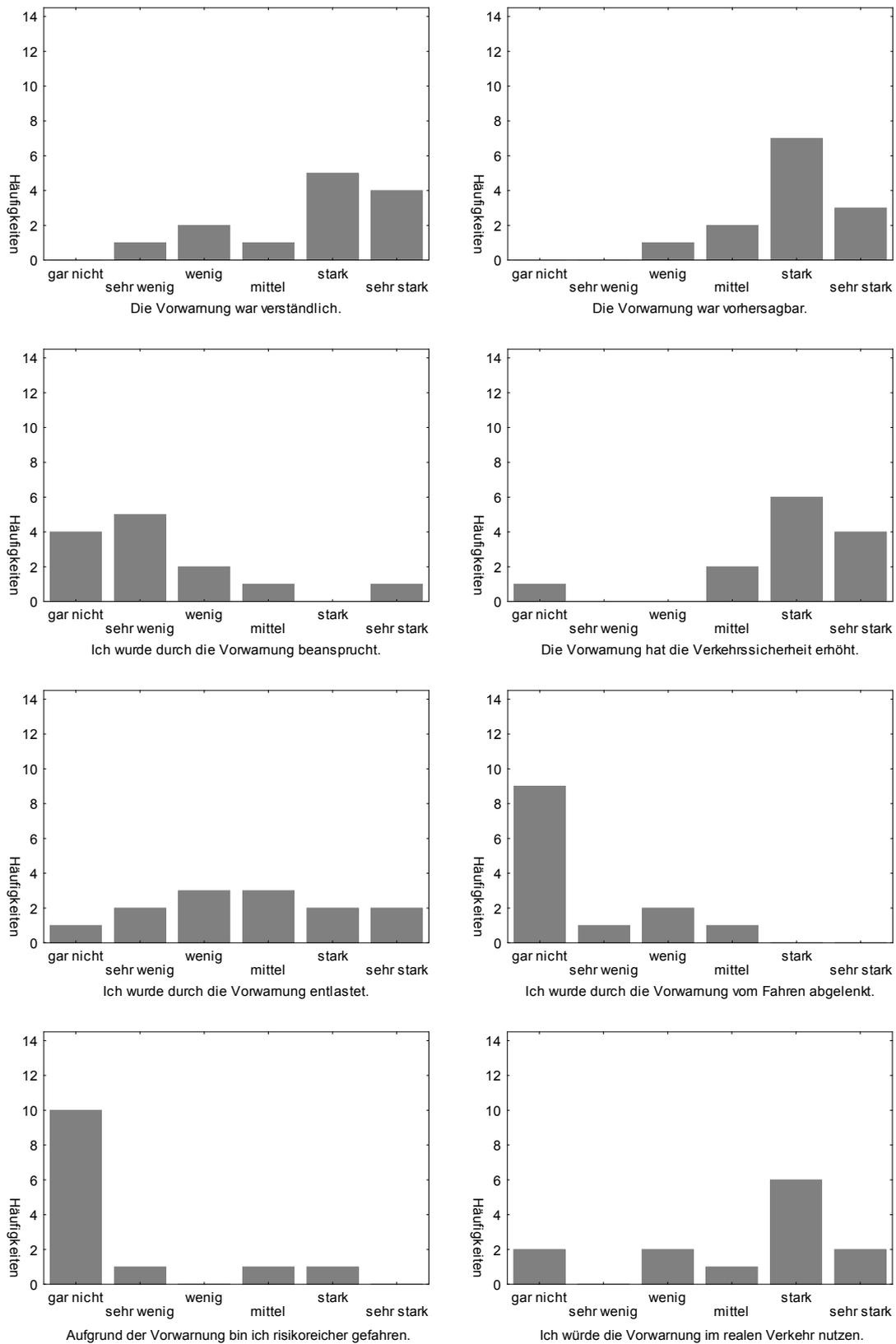


Abbildung 9.11: Subjektive Bewertung der Vorwarnung

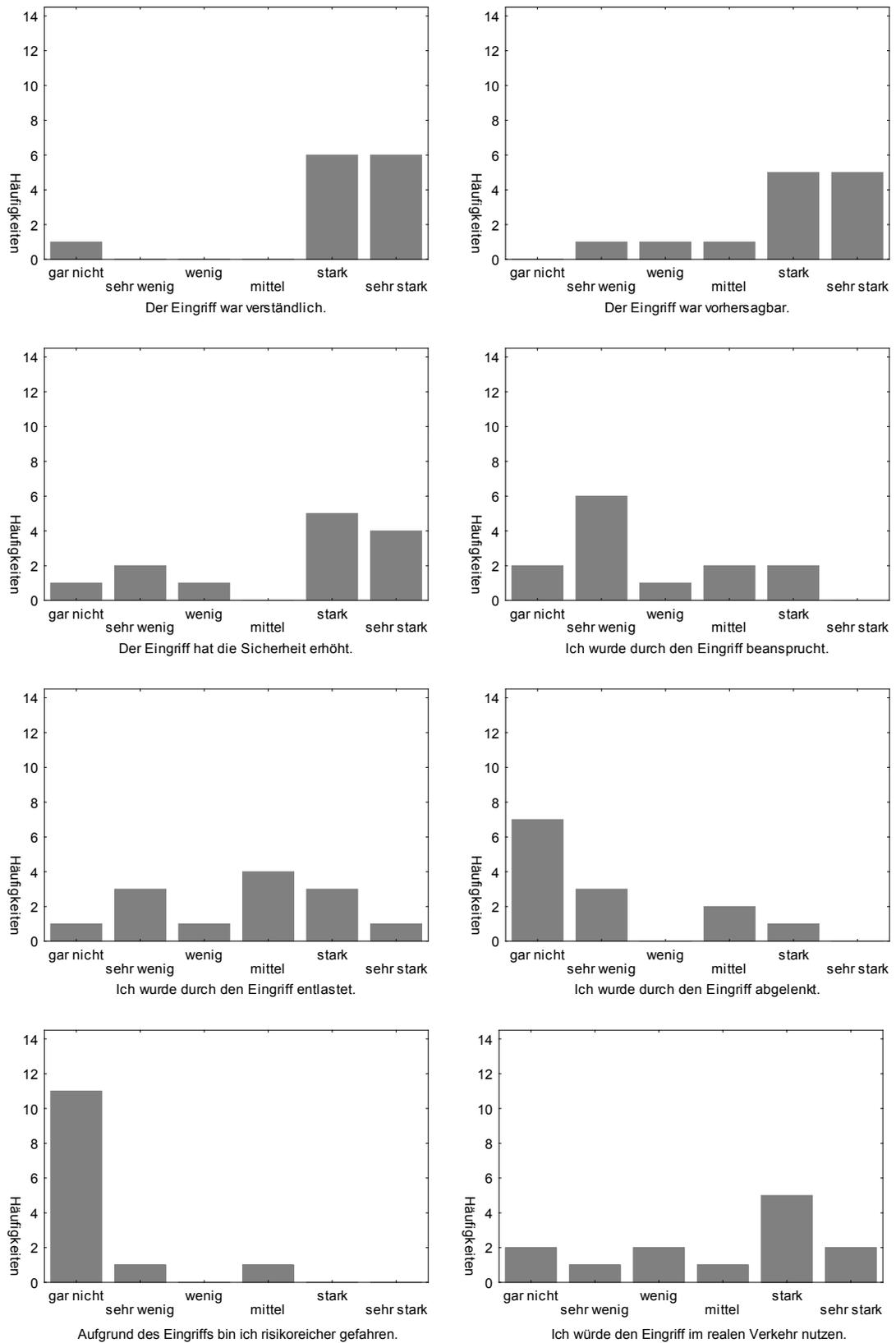


Abbildung 9.12: Subjektive Bewertung der Akutwarnung

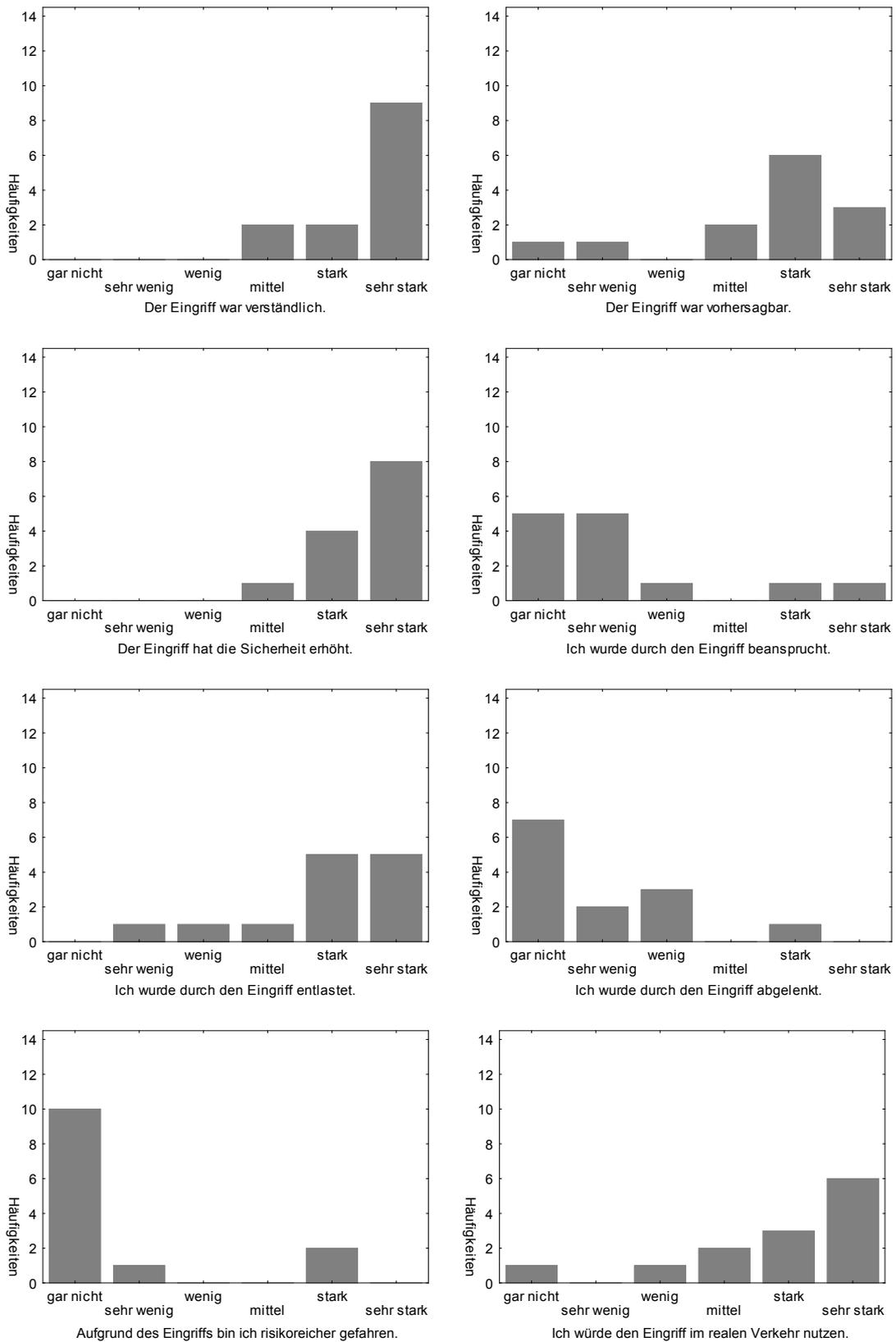


Abbildung 9.13: Subjektive Bewertung der Haltefunktion

10 Quellen

- ALBRECHT, F.:** Die rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Implementierung von Fahrerassistenzsystemen zur Geschwindigkeitsbeeinflussung. DAR 2005. 2005, S. 186-198
- BADSTÜBNER, J.; WENZ, K.:** Grenzenlose Sicherheit. In: Automobil Industrie (2006) Nr. 5, S. 34-40
- BENMIMOUN, A.; CHEN, J.; NEUNZIG, D. et al.:** Specification and Assessment of Different Intersection Assistance Concepts Based on IVC (Inter-Vehicle-Communication) and RVC (Roadside-Vehicle-Communication). In: 12th World Congress on ITS. San Francisco, 2005
- BENMIMOUN, A.; CHEN, J.; SUZUKI, T.:** Analyse eines Kreuzungsassistenten in der Verkehrsflusssimulation und im Fahrsimulator. In: 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. Aachen, 2006, S. 967-988
- BENMIMOUN, A.; SUZUKI, T.:** Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation für die Kreuzungsassistenz. In: Kooperationsforum Fahrerassistenzsysteme. Aschaffenburg, 2006
- BERNDT, H.; WENDER, S.; DIETMAYER, K. C. J.:** Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul, Turkey, 2007
- BISHOP, R.:** Intelligent vehicle technology and trends. Boston, Artech House [u.a.], 2005.
- BORTZ, J.:** Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Heidelberg, Springer Medizin Verlag, 2005.
- BRANZ, W.; ÖCHSLE, F.:** Intersection Assistance: Collision Avoidance System for Turns Across Opposing Lanes of Traffic. In: 5th European Congress on ITS. Hannover, 2005
- BURCKHARDT, M.:** Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen. Fahrzeugtechnische Schriftreihe. TÜV Rheinland, 1985
- CAIRD, J.; CHISHOLM, S.; LOCKHART, J.:** The Effect of In-Vehicle Advanced Signs on Older and Younger Drivers' Intersection Performance. In: 12th World Congress on ITS. San Francisco, 2005
- CHAN, C.; MARCO, D.; MISENER, J.:** Threat Assessment of Traffic Moving Toward A Controlled Intersection. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Parma, 2004, S. 931-936
- CHENG, B.; HASHIMOTO, M.; SUETOMI, T.:** Analysis of Driver Response to Collision Warning During Car Following. In: JSAE Review 23 (2002) Nr. 2, S. 231-237
- CHOVAN, J.; TIJERINA, L.; EVERSON, J. et al.:** Examination of Intersection, Left Turn Across Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures. National Highway Traffic Safety Administration, 1994

- DAGLI, I.; BROST, M.; BREUEL, G.:** Action Recognition And Prediction For Driver Assistance Systems Using Dynamic Belief Networks. Agent Technologies, Infrastructures, Tools, and Applications for E-Services. Berlin, Springer [u.a.], 2002, S. 179-194
- DINGUS, T.; MCGEHEE, D.; MANAKKAL, N. et al.:** Human Factors Field Evaluation of Automotive Headway Maintenance/Collision Warning Devices. In: Human Factors, Special Section 39 (1997) Nr. 2, S. 216-229
- DIZIKES, P.; HONSEL, G.:** Multi-Hopping mit dem Gegenverkehr. In: Technology Review 5 (2006) S. 10-12
- DONGES, E.:** Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem. In: Verkehrsunfall- und Fahrzeugtechnik (1993) Nr. 9, S. 241-280
- EBBESEN, E.; HANEY, M.:** Flirting with Death: Variables Affecting Risk Taking at Intersections. In: Journal of Applied Social Psychology 3 (1973) Nr. 4, S. 303-324
- EHMANN, D.; HOPSTOCK, M.; SPANNHEIMER, H.:** ConnectedDrive: Advanced Assistance Systems for Intersection Safety. In: 12th World Congress on IST, San Francisco, 2005
- FASTENMEIER, W.:** Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem. Autofahrer und Verkehrssituation – Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme. TÜV Rheinland, Köln, 1995, S. 27-78
- FERLIS, R. A.:** Analysis of an Infrastructure Collision Avoidance Concept for Straight Crossing Path Crashes at Signalized Intersections. Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, 2001
- FERLIS, R. A.:** Infrastructure Support for the IVI. In: 4th International Task Force on Vehicle-Highway Automation. 2000
- FERLIS, R. A.:** Internetseite - Infrastructure Intersection Collision Avoidance. (URL: <http://safety.fhwa.dot.gov/index.htm> - 6. März 2002)
- FRANKE, U.; GEHRIG, S.; LINDNER, F.:** Kamerabasierte Kreuzungsassistenz - Camera-Based Intersection Assistance. In: 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik. Aachen, 2004, S. 803-820
- FRANKE, U.; RABE, C.; GEHRING, S.:** Kollisionsvermeidung durch raum-zeitliche Bildanalyse. In: Information Technology 49 (2007) Nr. 1, S. 25-32
- FRYE, C.:** International Cooperation to Prevent Collisions at Intersections. In: Public Roads, Magazine of the Federal Highway Administration 65 (2001) Nr. 1, S. 41-46
- FÜRSTENBERG, K.; HOPSTOCK, M.; OBOJSKI, A. et al.:** INTERSAFE - Deliverable 40.75: Final Report. 2007, S. 79
- GAVRILA, D.:** Traffic Sign Recognition Revisited. In: 21st DAGM Symposium für Mustererkennung. Springer Verlag, Bonn, 1999, S. 86-93

- GEISER, G.; NIRSCHL, G.:** Realisierung und Bewertung eines warnenden maschinellen Kopiloten für die Unterstützung bei der Längsführung eines Kraftfahrzeugs. Mensch-Maschine-Systeme und Neue Informationstechnologien. Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1994, S. 367-380
- GEISER, G.; NIRSCHL, G.:** Towards a System Architecture of Driver's Warning Assistant. In: PARKES, A.; FRANZEN, S. (Hrsg.): Driving Future Vehicles. Taylor & Francis, London, 1994, S. 251-263
- GEORGI, A.; BRUNNER, H.; SCHEUNERT, D.:** GIDAS – German In-Depth Accident Study. In: FISITA 2004. Barcelona, 2004
- GLENCROSS, D. J.; ANDERSON, G. A.:** Operator Response Factors in the Location and Control of Foot Pedals. In: Ergonomics (1976) Nr. 19, S. 399-408
- GRADENEGGER, B.; SCHUMACHER, M.; SCHEUCHENPFLUG, R.; KRÜGER, H.:** PReVENT, AIDE: Untersuchung des Linksabbiegeassistenten, des Querverkehrsassistenten, des Ampelassistenten und des potentiellen Nutzens eines Workload-Management-Systems. Würzburg, 2006
- GRUBB, M.:** Driver Behavior At Intersections: An Analysis Of Accident Related Variables. In: 30th Annual Meeting, Human Factors Society. Daytona, 1986, S. 251-255
- GRÜNDL, M.:** Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Regensburg, 2005
- HEINZ, C.; HORN, T.; JAKOB, M. et al.:** Entwicklung einer mobilen Radarmessstation. Darmstadt, 2007
- HOFFMANN, J.; WINNER, H.:** EVITA – Das Untersuchungswerkzeug für Gefahrensituationen. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Garching, 2008
- HOFFMAN, J.; LEE, J.; HAYES, E.:** Driver Preference of Collision Warning Strategy and Modality. In: 2nd International Driving Symposium on Human Factors in Driving Assessment, Training, and Vehicle Design. Utah, 2003
- HOPPE, M.; ZOBEL, R.; SCHLAG, B.:** Identifikation von Einflussgrößen auf Verkehrsunfälle als Grundlage für die Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von Kreuzungsunfällen. In: Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI, Braunschweig, 2007, S. 121-137
- HOPSTOCK, M.; KLANNER, F.:** Intersection Safety – Just a Vision? In: Car Safety. Berlin, 2007, S. 67-80
- HOYOS, C.; FASTENMEIER, W.; GSTALTER, H.:** Forderungen an verhaltensorientierte Verkehrssicherheitsarbeit. In: FASTENMEIER, Wolfgang (Hrsg.): Autofahrer und Verkehrssituation. TÜV Rheinland, Köln, 1995, S. 11-26
- HUESMANN, A.; WISSELMANN, D.; FREYMAN, R.:** Der neue dynamische Fahr-simulator der BMW Fahrzeugforschung. VDI-Berichte 1745. 2003
- JANSSEN, W.; NILSSON, L.:** An Experimental Evaluation of In-Vehicle Collision Avoidance Systems. Linköping, Reprint. Aufl. Swedish Road and Traffic Research Inst. (VTI), 1992.

- JANSSEN, W.:** Internetseite - Driver Distraction in the European Statement of Principles on In-Vehicle HMI: A Comment. (URL: <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-13/driver-distraction/Papers.htm>)
- JANSSEN, W.:** The Impact of Collision Avoidance Systems on Driver Behaviour and Traffic Safety: Preliminaries to Studies within the GIDS Projects. Traffic Research Center, 1989
- JOCOY, E. H.; KNIGHT, J. R.; LENEY, T. F. et al.:** System and Method for Avoiding Accidents in Intersections. Offenlegungsschrift US 6,624,782 B2, 2003
- JOCOY, E.; PIRSON, H.:** Threat Detection System for Intersection Collision Avoidance - Real-Time System Performance. In: SAE-Paper 1999-01-0816 (1999) S. 87-97
- JOHANSSON, G.; RUMAR, K.:** Drivers' Brake Reaction Times. In: Human Factors 13 (1971) Nr. 1, S. 23-27
- KÄPPLER, W.; BERNOTOT, R.:** Das Wirksystem Fahrer - Fahrzeug - Umwelt. In: ROMPE, Klaus (Hrsg.): Verkehrssicherheit und Wirksystem Fahrer - Fahrzeug - Umwelt. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1985, S. 13-44
- KATAOKA, M.; HASHIMOTO, Y.; KUMAGAI, Y.; YOSHII, T.:** Analysis of Driver's Behavior at Yellow Signal in Intersection. In: 12th World Congress on ITS. San Francisco, 2005
- KAYSI, I.; ALAM, G.:** Driver Behavior And Traffic Stream Interactions At Unsignalized Intersections. In: Journal of transportation engineering 126 (2000) Nr. 6, S. 498-505
- KESKINEN, E.; OTA, H.; KATILA, A.:** Older Drivers Fail In Intersections: Speed Discrepancies Between Older And Younger Male Drivers. In: Accident Analysis & Prevention 30 (1998) Nr. 3, S. 323-330
- KEBLER, C.; WITTE, B.:** Aktive Sicherheit durch erweiterte Bremsassistentz und die erforderliche Aktuatorik. In: brake.tech. München, 2006
- KLANNER, F.; EHMANN, D.; WINNER, H.:** ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistentz. In: 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. Aachen, 2006, S. 989-1012
- KLANNER, F.:** Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistentz. München, 2004
- KOPISCHKE, S.:** Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden. Mainz, Aachen, 2000
- KOSCH, T.; EHMANN, D.:** Entwicklung von Kreuzungsassistentzsystemen und Funktionalitätserweiterungen durch den Einsatz von Kommunikationstechnologien. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistentzsysteme. 2006
- LAGES, U.:** Laser Sensor Technologies for Preventive Safety Functions. In: ATA EL. Parma, 2004
- LASSARRE, S.; LEJEUNE, P.; DECRET, J.:** Gap Acceptance And Risk Analysis At Unsignalized Intersections. Intersections without traffic signals II : Proceedings of an International Workshop, 18-19 July, 1991 in Bochum. Springer, Berlin, 1991, S. 258-269

-
- LEBLANC, D.; KIEFER, R.; DEERING, R. et al.:** Forward Collision Warning: Preliminary Requirements For Crash Alert Timing. In: SAE-Paper, Nr. 2001-01-0462; Intelligent Vehicle Initiative (IVI) (2001) S. 1-9
- LEE, K.; PENG, H.:** Evaluation Of Automotive Forward Collision Warning And Collision Avoidance Algorithms. Vehicle System Dynamics. Taylor und Francis, Basingstoke, Hants, 2005, S. 735-751
- LEHN, J.; WEGMANN, H.:** Einführung in die Statistik. Teubner [u.a.], 4. Aufl., Stuttgart, 2004.
- LINDNER, F.; KRESSEL, U.; KAELBERER, S.:** Robust Recognition of Traffic Signals. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Parma, 2004, S. 49-53
- LLOYD, M.; WITHEROW, K.; PIEROWICZ, J. et al.:** Using Driver Primary Control Input to Determine the Timing of Alerts and Warnings. In: Advances in Intelligent Transportation System Design (1997) S. 63-67
- LLOYD, M.; BITTNER, A.; PIEROWICZ, J.:** Driver-Vehicle Interface (DVI) Design Issues Of An Intersection Collision Avoidance (ICA) System. In: 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems. Orlando, 1996
- LLOYD, M.; WILSON, G.; NOWAK, C.; BITTNER, A.:** Brake Pulsing as Haptic Warning for an Intersection Collision Avoidance Countermeasure. In: Transportation Research Record 1694 (1999) S. 34-41
- MAGES, M.; WINNER, H.; HOPSTOCK, M.:** Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistentz. In: Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI, Braunschweig, 2007, S. 61-73
- MALATERRE, G.; PEYTAVIN, J. F.; JAUMIER, F.; KLEINMANN, A.:** L'Estimation des Manoeuvres réalisables en situation d'urgence au volant d'une automobile. Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, Arcueil-Cedes, 1987
- MANSFELD, W.:** Satellitenortung und Navigation – Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationsysteme. Vieweg, 2. Aufl., Wiesbaden, 2004.
- MARETZKE, J.; JACOB, U.:** Distance Warning and Control as a Means of Increasing Road Safety and Ease of Operation. In: *SAE 925214* (1992) S. 105-114
- MATHIAS, P.:** The Intelligent Cooperative Intersection as Part of Urban Traffic Control Systems. In: 12th World Congress on ITS. San Francisco, 2005
- MCKNIGHT, A. J.; ADAMS, B. B.:** Driver education task analysis: Volume 1 - Task descriptions. Washington D.C., 1970
- MEEWES, V.:** Unfalltypen-Katalog. Köln, 1984
- MEITINGER, K.; EHMANN, D.; HEIBING, B.:** Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen. In: 21. Internationale VDI/VW Gemeinschaftstagung. VDI-Verlag, Wolfsburg, 2004, S. 145-158
- MEITINGER, K.; HEIBING, B.; EHMANN, D.:** Linksabbiegeassistentz. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme. München, 2006
- MEYER, O.; DIDIER, M.; LANDAU, K.:** Driver Behavior During Left Turn - a Field and a Simulator Experiment. Annual Spring Conference of the GfA, Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Ergonomia-Verl, Stuttgart, 2003, S. 63-67

- MILLER, R.; HUANG, Q.:** An Adaptive Peer-to-Peer Collision Warning System. In: IEEE Vehicular Technology Conference. Birmingham, 2002
- MÜCKE, S.; BREUER, J.:** Bewertung von Sicherheitssystemen in Fahrversuchen. In: BRUDER, R. und Winner, H. (Hrsg.): Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug. Ergonomia, Darmstadt, 2007, S. 119-129
- N.N.:** Collision Avoidance. In: Thatcham Research News 3 (2008) Nr. 2,
- N.N.:** Internetseite - AIDE. (URL: <http://www.aide-eu.org> - 26.10.2007)
- N.N.:** Internetseite - Bits und Bytes retten Menschenleben - Notbremsassistenten im Test. (URL: <http://www.ad-hoc-news.de/aktuelle-nachrichten/15560924> - 20.02.2008)
- N.N.:** Internetseite - BMW Innovationstag Fahrerassistenzsysteme. (URL: http://www.7-forum.com/news/2006/fahrerassistenzsysteme/usability_lab.php - 19.10.2007)
- N.N.:** Internetseite - Bosch GmbH: Online Presseportal. (URL: www.bosch.de - 12.09.2007)
- N.N.:** Internetseite - DARPA Grand Challenge. (URL: <http://www.darpa.mil/grandchallenge> - 17.10.2007)
- N.N.:** Internetseite - Google Maps. (URL: <http://www.googlemaps.com> - 08.12.2007)
- N.N.:** Internetseite - GST. (URL: <http://www.gstforum.org> - 07.11.2007)
- N.N.:** Internetseite - IBEO Product Overview. (URL: <http://www.ibeo-as.com/english/products.asp> - 12.08.2007)
- N.N.:** Internetseite - INVENT. (URL: <http://www.invent-online.de> - 12.07.2005)
- N.N.:** Internetseite - PReVENT. (URL: <http://www.prevent-ip.org> - 03.09.2007)
- N.N.:** Pressemitteilung - Toyota Advances Brake Assist with Navigation Link. (2008)
- OSAWA, S.:** Cooperative Vehicle/Highway Systems in Japan. In: ATA EL. Parma, 2004
- OTTE, D.; NEHMZOW, J.:** Codierungs-Katalog zur Dokumentation von Verkehrsunfällen. 2002
- PIEROWICZ, J. A.; PIRSON, H. A.; YUHNKE, D.:** Method and Apparatus for Determination and Warning of Potential Violation of Intersection Traffic Control Devices. Offenlegungsschrift US 6,516,273 B1, 2003
- PIEROWICZ, J.; JOCOY, E.; LLOYD, M. et al.:** Internetseite - Intersection Collision Avoidance Using IVHS Countermeasures - Executive Summary. (URL: http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-12/IntersectionCollisionAvoidance_ITS.html - 24.01.2006)
- POLUS, A.:** Gap acceptance characteristics at unsignalised urban intersections. In: tec (Traffic Engineering and Control) 24 (1983) Nr. 5,
- RAGLAND, D.; ARROYO, S.; CHAN, C.:** Using Field Observation Video for the Analysis of Driver Behaviors in Left-Turn Maneuvers against Oncoming Vehicles. In: 12th World Congress on ITS. San Francisco, 2005

- RATH, H.; KNECHTGES, J.:** Effective Active Safety to reduce Road Accidents. In: SAE Paper (1995) S. 35-42
- REICHART, G.:** Sichere Elektronik im Kraftfahrzeug. In: Automatisierungstechnik (1998) Nr. 2, S. 78–83
- REUL, M.; NIEMZ, T.; WINNER, H. et al.:** Bremswegverkürzung durch eine ABS-unabhängige Verstelldämpferregelung. In: Haus der der Technik. Essen, 2007
- RÖSSLER, B.; OBOJSKI, M. A.; SCHMIDT, R.:** Comprehensive Approach for Increasing Intersection Safety by Risk Assessment HMI. In: 12th World Congress on ITS. San Francisco, 2005
- RÖSSLE, S.; KRÜGER, W.; GEGENBACH, V.:** Real-Time Vision-Based Intersection Detection For A Driver's Warning Assistant. In: IEEE Intelligent Vehicle Symposium. Tokyo, 1993, S. 340-344
- ROHRMÜLLER, F.:** Prädiktion des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Trajektorien bei der Kreuzungsassistenz. München, 2007
- SARRIS, V.; REIB, S.:** Kurzer Leitfaden der Experimentalpsychologie. München, Pearson, 2005.
- SAUERBREY, J.:** MAN Abbiegeassistent: Ein System zur Unfallvermeidung beim Rechtsabbiegen von Lkw. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme. München, 2004
- SCHMID, V.:** Voraus schauen - voraus fahren: Die neuen Assistenzsysteme Bremsassistent BAS PLUS und PRE-SAFE(r) Bremse von Daimler Chrysler. In: brake.tech. München, 2006, S. 1-8
- SEECK, A.; GASSER, T.:** Klassifizierung und Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Einführung moderner FAS. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme. München, 2006
- SHEFFL, Y.; MAHMASSANI, H.:** A Model Of Driver Behavior At High Speed Signalized Intersections. In: Transportation Science 15 (1981) Nr. 1, S. 50-61
- SHLADOVER, S.:** Effects of Traffic Density on Communication Requirements for Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems (CICAS). In: 12th World Congress on ITS. San Francisco, 2005
- SÖMEN, H. D.:** Risikoerleben. In: ROMPE, Klaus (Hrsg.): Verkehrssicherheit und Wirkungssystem Fahrer - Fahrzeug - Umwelt. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1985, S. 89-112
- Statistisches Bundesamt:** Verkehr - Verkehrsunfälle 2006, Fachserie 8 Reihe 7, Verkehr. Wiesbaden, 2007
- TAKIGUCHI, A.; KUBOTA, K.; NOGUCHI, N. et al.:** Collision in Right/Left Turn Prevention System. Offenlegungsschrift US 6,459,991 B1, 2002
- TAMURA, M.; TAKAHASHI, S.; YASUHARA, S. et al.:** Development Of Intersection Safety Support Systems Using Vehicle-To-Vehicle Communication. In: 12th World Congress on ITS. San Francisco, 2005
- THORPE, C.; AUFRERE, R.; CARLSON, J. et al.:** Safe Robot Driving. In: 4th International Conference on Machine Automation. Tampere, 2002, S. 147-156

- TIJERINA, L.; CHOVAN, J.; PIEROWICZ, J.; HENDRICKS, D.:** Examination of Signalized Intersection, Straight Crossing Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures. National Highway Traffic Safety Administration, 1994
- TROUTBECK, R.:** Average Delay At An Unsignalized Intersection With Two Major Streams Each Having A Dichotomized Headway Distribution. In: Transportation Science 20 (1986) Nr. 4, S. 272-286
- TROUTBECK, R.:** Current And Future Australian Practices For The Design Of Unsignalized Intersections. Intersections without traffic signals, proceedings of an internat. workshop 16 - 18 March, 1988 in Bochum. Springer, Berlin, 1988, S. 1-19
- UCHIDA, N.; FUJITA, K.; KATAYAMA, T.:** Detection Of Vehicle Crossing Path At Intersection. In: Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan 30 (1999) Nr. 1,
- UCHIDA, N.; FUJITA, K.; KATAYAMA, T.:** Detection of Vehicles on the Other Crossing Path at an Intersection: Visual Search Performance of Elderly Drivers. In: JSAE Review 20 (1999) Nr. 3, S. 381-386
- VAN DER HORST, R.; WILMINK, A.:** Drivers' Decision-Making At Signalised Intersections: An Optimisation Of The Yellow Timing. London, Printerhall Ltd, 1986.
- VAN DER HORST, R.:** Video Analysis Of Road User Behaviour At Intersections. Near Miss Reporting as a Safety Tool, Chapter 9. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991, S. 93-109
- VOLLRATH, M.; BRIEST, S.; SCHIEBL, C. et al.:** Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit. Bergisch Gladbach, Wirtschaftsverlag, 2006.
- VOLLRATH, M.; BRÜNGER-KOCH, M.; SCHIEBL, C.; WAIBEL, F.:** INVENT Kreuzungsverhalten - Endbericht. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Braunschweig, 2004
- VOLLRATH, M.:** Mobil im Alter - und die Sicherheit? In: Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI, Braunschweig, 2007, S. 139-150
- VON ZANTEN, A.:** Die Bremsanlage im Fahrerassistenzsystem. In: BREUER, Bert; BILL, Karheinz (Hrsg.): Bremsenhandbuch. Vieweg, Wiesbaden, 2003, S. 276-299
- WAGNER, F.:** An Evaluation Of Fundamental Driver Decisions And Reactions At An Intersection. In: Highway Research Record, Transportation Research Board 118 (1966) S. 68-84
- WENDER, S.; WEISS, T.; FÜRSTENBERG, K.; DIETMAYER KLAUS,:** Object Classification exploiting High Level Maps of Intersections. In: Advanced Microsystems for Automotive Applications. Berlin, 2006
- WILTSCHKO, T.:** Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. VDI-Verlag, Schwäbisch Gmünd, 2003
- WINNER, H.:** Vorlesungsskript Kraftfahrzeuge II. TU Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Darmstadt, 2006

- WORTMAN, R.; MATTHIAS, J.:** Evaluation Of Driver Behavior At Signalized Intersections. Highway information systems, visibility, and pedestrian safety. National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C, 1983, S. 10-20
- YANG, Z.; KOBAYASHI, T.; KATAYAMA, T.:** Development of an Intersection Collision Warning System Using DGPS. In: SAE-Paper 2000-01-1301 SAE Spec. Publ. SP-1538 (2000) S. 123-127
- YAN, X.; RADWAN, E.; KLEE, H.; GUO, D.:** Driver Behavior During Yellow Change Interval. In: DSC North America. Orlando, 2005
- YOSHIKAWA, T.; HORIBATA, N.:** Indicating Apparatus from Preventing Vehicles from Colliding With Each Other as They Pass. Offenlegungsschrift US 5,448,219, 1995
- ZABYSHNY, A.; RAGLAND, D.:** False Alarms and Human-Machine Warning Systems. U.C. Berkeley Traffic Safety Center, 2003
- ZAHN, P.; EHMANN, D.; MEITINGER, K.:** Hinweis – Warnung – Abgebremst! Neue Kreuzungs-Kopiloten – mehr aktive Sicherheit? In: 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2004. Aachen, 2004, S. 769-788