

Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug

Vom Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Felix Klanner

aus Starnberg

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

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing

Tag der Einreichung: 03.03.2008

Tag der mündlichen Prüfung: 20.05.2008

Danksagung

Bei der Erstellung dieser Arbeit hatte ich große Freiräume, viele Anregungen und tolle Möglichkeiten, sowohl die Arbeit als auch mich selbst weiterzuentwickeln.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner für seine dauerhafte Unterstützung, wertvollen Anregungen, kritischen Rückfragen und die sorgfältige Durchsicht der Arbeit. Zudem danke ich für die Möglichkeit, mich als externen Doktoranden in das Team und in die Lehre des Fachgebiets Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt (FZD) integrieren zu können. Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing.

Die vorliegende Arbeit entstand bei der BMW Forschung und Technik GmbH. Hier habe ich insbesondere durch Herrn Dr. rer. nat. Helmut Spannheimer und Dr.-Ing. Dirk Ehmanns eine umfassende Unterstützung erfahren, mich persönlich und fachlich zu entwickeln. Die Arbeit wurde durch den Austausch und die unzähligen Gespräche mit Kollegen und Doktoranden bei der BMW Group sowie an der Technischen Universität Darmstadt bereichert. Mein besonderer Dank gilt hierbei Matthias Hopstock, Stephan Thoma, Antje Neve, Mark Mages, Arne Purschwitz, Daniel Niehues, Gregor Nitz, Dr.-Ing. Nico Kämpchen, Dr. rer. nat. Reiner Wertheimer und allen Abteilungskollegen für die sehr gute Zusammenarbeit. Eine Reihe von Studenten haben an der Entstehung der Arbeit mitgewirkt und ihr immer wieder neue Impulse gegeben. Für diesen vielfältigen Dialog danke ich allen.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Frau Lisa für ihre fortwährende Unterstützung, Ermutigung und die gemeinsamen Bergtouren. Dieser sichere Rückhalt ließ mich schwierige Situationen unbeschwerter angehen.

Felix Klanner

München, 28.02.2008

„Die Endlosigkeit des wissenschaftlichen Ringens sorgt unablässig dafür, dass dem forschenden Menschegeist seine beiden edelsten Antriebe erhalten bleiben und immer wieder von neuem angefacht werden: Die Begeisterung und die Ehrfurcht.“

Max Planck

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Gegenstand der Arbeit	2
1.2	Vorgehensweise	2
2	Stand der Technik	4
2.1	Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen	4
2.2	Prototypisch entwickelte Querverkehrsassistenzsysteme	5
2.2.1	Intelligenz in der Infrastruktur	6
2.2.2	Intelligenz im Fahrzeug	7
2.3	Diskussion und daraus abgeleitete zu verifizierende Hypothese	14
3	Situationsanalyse und daraus abgeleitete Systemarchitektur	16
3.1	Unfallanalyse	16
3.2	Anforderungen	19
3.2.1	Funktion	19
3.2.2	Technik	21
3.3	Systemarchitektur	22
3.4	Fazit	24
4	Positionsbestimmung	25
4.1	Anforderungen des KQA	26
4.1.1	Zulässige Abweichungen bei der Berechnung des Kollisionsrisikos	26
4.1.2	Zulässige Abweichungen bei Berechnung der Warnentfernung	37
4.2	Methodik	40
4.2.1	Satellitennavigation	40
4.2.2	Kalman-Filter zur Messdatenfusion	43
4.2.3	Umgang mit unscharfen Daten im Positionsfilter	44
4.3	Eigenschaftsanalyse	46
4.4	Diskussion	48
5	Kommunikation	51
5.1	Anforderungen des KQA	51
5.2	Technologien	52
5.2.1	Stand der Technik	52
5.2.2	Verwendete Technologie (WLAN-Standard 802.11b)	54
5.2.3	Verwendete Kommunikationslösung	58
5.2.4	Zukünftige Kommunikationslösung (ACUp)	63
5.3	Diskussion	64
6	Assistenz	65
6.1	Kollisionsrisiko	65

6.1.1	Räumliche und zeitliche Trajektorienprädiktion	65
6.1.2	Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung	69
6.2	Beurteilung der Rahmenbedingungen an der Kreuzung	71
6.3	Beurteilung des Fahrerverhaltens	72
6.3.1	Anhaltewunscherkennung	72
6.3.2	Abbiegewunscherkennung	73
6.4	Assistenzstrategie	79
6.5	Methodik zur Parameterabstimmung	82
6.6	Zusammenfassung	83
7	Evaluierung des KQA	85
7.1	Rahmenbedingungen	86
7.2	Nachweis der Wirksamkeit zur Unfallvermeidung	89
7.2.1	Anforderungen	89
7.2.2	Methodik	90
7.2.3	Ergebnisse	96
7.3	Nachweis der Grundakzeptanz der Assistenz und favorisierte Assistenzstrategie	100
7.3.1	Anforderungen	100
7.3.2	Methodik	101
7.3.3	Ergebnisse	106
7.4	Diskussion	114
8	Qualität der erzielten Ergebnisse und Ausblick auf weiterführende Arbeiten	118
8.1	Wirksamkeit des KQA zur Unfallvermeidung	118
8.2	Grundakzeptanz der Assistenz und favorisierte Assistenzstrategie	120
9	Zusammenfassung	122
10	Anhang	125
10.1	Einweisungsbogen	125
10.2	Versuchsleiterprotokoll	130
10.3	Demografischer Fragebogen	141
10.4	Fragebogen: Beurteilung Gesamtsystem	144
10.5	Altersverteilungen bei der Evaluierung des KQA	147
	Literaturverzeichnis	149
	Betreute studentische Arbeiten	153
	Eigene Veröffentlichungen	154

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ACC	Adaptive Cruise Control
ACUp	Aktiv Communication Unit
AHS	Advanced Cruise-Assist Highway Systems
AKTIV	Adaptive und kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr
ASV	Advanced Safety Vehicles
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
C2C-CC	Car to Car Communication Consortium
CAMP	Collision Avoidance Metrics Partnership
CAN	Control Area Network
Car2X	Car to Anything Communication
CCW	Cooperative Collision Warning
CICAS	Cooperative Intersection Collision Avoidance System
CJC	Collision Judgment Coefficient
CoCar	Cooperative Cars
ComCAN	Kommunikations-CAN
COMeSafety	Communications for Electronical Safety
CPDGPS	Carrier Phase Differential GPS
DGPS	Differential Global Positioning System
DSSS	Driving Safety Support System
DTC	Distance to Collision
EKS	Eigenfahrzeugkoordinatensystem
FHWA	Federal Highway Administration
FKS	Fremdfahrzeugkoordinatensystem
Fzg	Fahrzeug
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GPS	Global Positioning System
GPSCAN	GPS-CAN
HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service
HL	Haltelinie
HUD	Head-Up Display
IDS	Intersection Decision Support
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IG	Integrationsgrenze
INTERSAFE	Intersection Safety
INVENT	Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik
IVC	Inter Vehicle Communication
KQA	kommunikationsbasierter Querverkehrsassistent
MAC	Medium Access Control

MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
mph	miles per hour
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NKW	Nutzkraftwagen
NoW	Network on Wheels
PELOPS	Programmsystem zur Entwicklung längsdynamischer mikroskopischer Verkehrsprozesse in systemrelevanter Umgebung
PREVENT	Preventive and Active Safety Applications
ROC	Relative Operating Characteristic
RVC	Roadside Vehicle Communication
RvL	Rechts-vor-Links
SAFETEA-LU	Safe, Accountable, Flexible and Efficient Transportation Equity Act: A Legacy for Users
SIM-TD	Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland
TTC	Time to Collision
VA	Vorfahrtachten
VII	Vehicle Infrastructure Integration
WAAS/EGNOS	Wide Area Augmentation System/European Geostationary Navigation Overlay Service
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environment
WGS-84	World Geodetic System 1984
WLAN	Wireless Local Area Network

Formelzeichen und Indizes

Symbole	Einheit	Beschreibung
a	m	Halbachse des WGS-84-Ellipsoids
a_F	m/s ²	Verzögerung in Fahrzeuglängsrichtung durch den Fahrer
a_{max}	m/s ²	maximale Verzögerung des Fremdfahrzeugs in Längsrichtung
a_x	m/s ²	Längsbeschleunigung
$a_{x,erf}$	m/s ²	Erforderliche Verzögerung in Längsrichtung, um an der Haltelinie zum Stehen zu kommen
$a_{x,erf,o}$	m/s ²	Obere Grenze der Verzögerung in Längsrichtung, zur Bestimmung von b_{Korr}
$a_{x,erf,u}$	m/s ²	Untere Grenze der Verzögerung in Längsrichtung, zur Bestimmung von b_{Korr}
$a_{x,FA,max}$	m/s ²	Angenommene maximale Verzögerung in Längsrichtung durch den Fahrer nach einer Warnung
$a_{x,FA,mno}$	m/s ²	Angenommene maximale Verzögerung in Längsrichtung durch den Fahrer bei einer konfliktfreien Kreuzungsannäherung mit Stopp an der Haltelinie
$a_{x,FA,norm}$	m/s ²	Angenommene Normalverzögerung in Längsrichtung durch den Fahrer nach einer Warnung
$a_{x,hap}$	m/s ²	Haptische Anbremsung in Längsrichtung im Falle einer Warnung durch den KQA
$a_{x,TS}$	m/s ²	“Acceleration to Stop Line“ - notwendige Verzögerung in Längsrichtung, um noch vor der Haltelinie zum Stehen zu kommen
a_y	m/s ²	Querbeschleunigung
b	m	Halbachse des WGS-84-Ellipsoids
b	m	Fahrzeugbreite
b_{FS}	m	Breite eines Fahrstreifens
b_{Fa}	m	Breite des Fahrfächers
b_{Korr}	m	Breite des Korridors, in dem 95 % der Warnzeitpunkte durch die Versuchspersonen akzeptiert wurden
$D_E(y_E)$		Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Eigenfahrzeugs in Fahrzeugquerrichtung
$D_F(y_F)$		Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Fremdfahrzeugs in Fahrzeugquerrichtung
d_{Reiwei}	m	Reichweite der eingesetzten Kommunikationslösung
e		1. Exzentrizität
G_e	dB	Empfangsgewinn der Antenne
G_s	dB	Sendegewinn der Antenne

IG_o	m	obere Integrationsgrenze
IG_u	m	untere Integrationsgrenze
i	m	Entfernungsschritt
k		Zählparameter
L_1	MHz	Sendefrequenz der GPS-Satelliten
L_2	MHz	Sendefrequenz der GPS-Satelliten
L_b	dBm	Freiraumdämpfung
l	m	Fahrzeuglänge
M_r	m	Meridiankrümmungsradius
N_r	m	Querkrümmungsradius
n_{FS}		Anzahl der Fahrstreifen einer Fahrbahn
P		Fehlerkovarianzmatrix des korrigierten Schätzwertes
P^*		Fehlerkovarianzmatrix des prädizierten Schätzwertes
$P(A)$		Wahrscheinlichkeit des Ereignisses A
$P(B)$		Wahrscheinlichkeit des Ereignisses B
$P(A B)$		Wahrscheinlichkeit von Ereignis A unter der Bedingung, dass das Ereignis B eingetreten ist
P_e	dB	Empfangsleistung
P_{Kol}		Gesamtkollisionswahrscheinlichkeit
P_r	dB	Empfangsrauschen
P_s	dB	Sendeleistung
$P(X)$		Wahrscheinlichkeit des Ereignisses X
$P(X_i Eltern(X_i))$		Wahrscheinlichkeit von Ereignis X_i unter der Bedingung, dass das Ereignis $Eltern(X_i)$ eingetreten ist
$P(Ex_{SP})$		Kollisionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Ex_{SP}
$P(Ex_{SP\pm i})$		Kollisionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von $Ex_{SP\pm i}$
$\mathbf{p}_{Abb,0}$		Wahrscheinlichkeitsvektor des Abbiegevorhabens im Grundzustand
$\mathbf{p}_{Abb,RvL}$		Wahrscheinlichkeitsvektor des Abbiegevorhabens bei einer Rechts-vor-Links-Kreuzung
$\mathbf{p}_{Abb,VA}$		Wahrscheinlichkeitsvektor des Abbiegevorhabens bei einer Vorfahrtachten-Kreuzung
\mathbf{p}_{Sit}		Vektor der Abbiegewahrscheinlichkeit
Δp	m	maximal zulässige Positionsabweichung der Fahrzeuge bedingt durch Fehler bei der Positions- und Ausrichtungsbestimmung sowie durch die Latenzzeit der Kommunikation
R_{GPS}		Messfehlermatrix der GPS-Daten
S		Steigung der Verbindungsgeraden zwischen zwei Fahrzeugpositionen
SP		Schnittpunkt der prädizierten Trajektorien zweier Fahrzeuge
SNR		Signalrauschabstand
s_{Anh}	m	Anhalteweg des Fahrzeugs
$s_{E,H}$	m	Abstand zwischen dem Eigenfahrzeug und der Haltelinie
$s_{E,SP}$	m	Abstand zwischen dem Eigenfahrzeug und dem Schnittpunkt

		der prädizierten Trajektorien
$s_{F,SP}$	m	Abstand zwischen dem Fremdfahrzeug und dem Schnittpunkt der prädizierten Trajektorien
$s_{F,SP,+}$	m	Länge des Schenkels von $\Delta\Theta_F$ bis zur x_E -Achse in positiver x_E -Richtung ausgehend von SP
$s_{F,SP,-}$	m	Länge des Schenkels von $\Delta\Theta_F$ bis zur x_E -Achse in negativer x_E -Richtung ausgehend von SP
$s_{H,SP}$	m	Abstand zwischen der Haltelinie und dem Schnittpunkt der prädizierten Trajektorien
s_R	m	Für die Funktion des KQA erforderliche Reichweite der Kommunikation
$s_{Sitint,Start,SP}$	m	Abstand des Eigenfahrzeugs vom Schnittpunkt der Trajektorien zum Startzeitpunkt der Situationsinterpretation
$s_{t_{Luecke},SP}$	m	Strecke, die das Fremdfahrzeug in der Zeit zurücklegt, die das Eigenfahrzeug vom Startzeitpunkt der Situationsinterpretation bis zum Erreichen des kritischen Bereichs voraussichtlich benötigt, und während der angenommenen Zeitlücke t_{Luecke} zurücklegt
$s_{Vorlauf}$	m	Länge der Strecke, die das Eigenfahrzeug während der Zeit $t_{Vorlauf}$ bei konstanter Geschwindigkeit zurücklegt
$t_{Lat,zul}$	s	zulässige Latenzzeit der Kommunikation
t_{Luecke}	s	Zeitlücke, die von wartepflichtigen Fahrern beim Einbiegen/Kreuzen zu vorfahrtsberechtigten Fahrzeugen gelassen wird
t_E	s	Zeit, die das Eigenfahrzeug für die Strecke $4\Delta p$ benötigt
$t_{EKB,aus}$	s	Zeitpunkt, zu dem das Eigenfahrzeug aus dem kritischen Bereich austritt
$t_{EKB,ein}$	s	Zeitpunkt, zu dem das Eigenfahrzeug in den kritischen Bereich eintritt
t_F	s	Zeit, die das Fremdfahrzeug für die Strecke $4\Delta p$ benötigt
$t_{l/2}$	s	Zeit, die das Eigenfahrzeug bei konstanter Geschwindigkeit für die Strecke $l/2$ benötigt
t_{reak}	s	Reaktionszeit auf eine Warnung
$t_{s_{Anh}}$	s	Zeit, die das Eigenfahrzeug bei konstanter Geschwindigkeit zum Zurücklegen der Strecke s_{Anh} benötigt
$t_{s_{H,SP}}$	s	Zeit, die das Eigenfahrzeug zum Zurücklegen der Strecke $s_{H,SP}$ bei konstanter Geschwindigkeit benötigt
t_{Update}	s	Update-Rate der Kommunikation
$t_{Vorlauf}$	s	Vorlaufzeit des KQA - Zeit zwischen dem Start der Situationsinterpretation und der Ausgabe einer Warnung
u_x	m	Abstand des Ursprungs des Eigenkoordinatensystems vom Ursprung des Fremdkoordinatensystems in x -Richtung des Inertialsystems
u_y	m	Abstand des Ursprungs des Eigenkoordinatensystems vom Ursprung des Fremdkoordinatensystems in y -Richtung des Inertialsystems
v	km/h, m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{rel}	km/h, m/s	Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Fahrzeugen

v_x	km/h, m/s	Fahrzeuglängsgeschwindigkeit
$v_{x,E}; v_E$	km/h, m/s	Geschwindigkeit des Eigenfahrzeugs in Fahrzeuglängsrichtung
$v_{x,E,0}$	km/h, m/s	Ausgangsgeschwindigkeit des Eigenfahrzeugs in Fahrzeuglängsrichtung
$v_{x,F}; v_F$	km/h, m/s	Geschwindigkeit des Fremdfahrzeugs in Fahrzeuglängsrichtung
$v_{x,F,0}$	km/h, m/s	Ausgangsgeschwindigkeit des Fremdfahrzeugs in Fahrzeuglängsrichtung
$v_{x,min}$	km/h, m/s	Mindestgeschwindigkeit in Fahrzeuglängsrichtung
x_A		Kartesische Koordinate des Fahrzeugs A
x_B		Kartesische Koordinate des Fahrzeugs B
x_E		Koordinatenachse des Eigenkoordinatensystems
x_F		Koordinatenachse des Fremdkoordinatensystems
x_I		Koordinatenachse des Inertialsystems
x_P		Kartesische Koordinate der Fahrzeugposition
$E\mathcal{X}_E$		prädierte Koordinate für das Eigenfahrzeug im Eigenkoordinatensystem
$E\mathcal{X}_{EKB,aus}$		prädierte Koordinate des Austrittspunkts des Eigenfahrzeugs aus dem kritischen Bereich im Eigenkoordinatensystem
$E\mathcal{X}_{EKB,ein}$		prädierte Koordinate des Eintrittspunkts des Eigenfahrzeugs in den kritischen Bereich im Eigenkoordinatensystem
$E\mathcal{X}_{F,0}$		Kartesische Koordinate des Ursprungs des Fremdkoordinatensystems, dargestellt im Eigenkoordinatensystem
$E\mathcal{X}_{F,EKB,aus}$		prädierte Koordinate des Fremdfahrzeugs zum Austrittszeitpunkt des Eigenfahrzeugs aus dem kritischen Bereich im Eigenkoordinatensystem
$E\mathcal{X}_{F,EKB,ein}$		prädierte Koordinate des Fremdfahrzeugs zum Eintrittszeitpunkt des Eigenfahrzeugs in den kritischen Bereich im Eigenkoordinatensystem
$E\mathcal{X}_{SP}$		Koordinate des Schnittpunkts der Trajektorien im Eigenkoordinatensystem
$F\mathcal{X}_F$		prädierte Koordinate für das Fremdfahrzeug im Fremdkoordinatensystem
$F\mathcal{X}_{F,EKB,aus}$		prädierte Koordinate des Fremdfahrzeugs zum Austrittszeitpunkt des Eigenfahrzeugs aus dem kritischen Bereich im Fremdkoordinatensystem
$F\mathcal{X}_{F,EKB,ein}$		prädierte Koordinate des Fremdfahrzeugs zum Eintrittszeitpunkt des Eigenfahrzeugs in den kritischen Bereich im Fremdkoordinatensystem
$I\mathcal{X}_{E,0}$		kartesische Koordinate des Ursprungs des Eigenkoordinatensystems im Inertialsystem
$I\mathcal{X}_{F,0}$		kartesische Koordinate des Ursprungs des Fremdkoordinatensystems im Inertialsystem

Δx_E	m	Positionsfehler des Eigenfahrzeugs in Fahrzeuglängsrichtung
$\Delta x_{E,H,zul}$	m	zulässiger Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs in Bezug auf den Abstand zur Haltelinie
$\Delta x_{E,res}$	m	Resultierender Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs
Δx_F	m	Positionsfehler der Fremdfahrzeugs in Fahrzeuglängsrichtung
$\Delta x_{F,Lat}$	m	Längsrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs durch die Latenzzeit der Kommunikation
$\Delta x_{F,res}$	m	Resultierender Längsrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs
$\Delta x_{\Delta x_F,E}$	m	Beitrag des Längsrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs zum resultierenden Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs
$\Delta x_{\Delta x_{F,Lat},E}$	m	Beitrag von $\Delta x_{F,Lat}$ zum Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs
$\Delta x_{\Delta y_F,E}$	m	Beitrag des Querrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs zum resultierenden Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs
$\Delta x_{\Delta x_E,F}$	m	Beitrag des Längsrichtungsfehlers des Eigenfahrzeugs zum resultierenden Längsrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs
$\Delta x_{\Delta y_E,F}$	m	Beitrag des Querrichtungsfehlers des Eigenfahrzeugs zum resultierenden Längsrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs
$\Delta x_{\Delta \theta_E,F}$	m	Beitrag des Ausrichtungsfehlers des Eigenfahrzeugs zum resultierenden Längsrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs
$\Delta x_{\Delta \theta_F,E}$	m	Beitrag des Ausrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs zum resultierenden Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs
$\Delta x_{\Delta \theta_F,E,+}$	m	Beitrag des Ausrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs zum resultierenden Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs bei $\alpha \neq 90^\circ$ in positiver x_E -Richtung
$\Delta x_{\Delta \theta_F,E,-}$	m	Beitrag des Ausrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs zum resultierenden Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs bei $\alpha \neq 90^\circ$ in negativer x_E -Richtung
y_A		Kartesische Koordinate des Fahrzeugs A
y_B		Kartesische Koordinate des Fahrzeugs B
y_E		Koordinatenachse des Eigenkoordinatensystems
y_F		Koordinatenachse des Fremdkoordinatensystems
$\underline{y}_{Fahrdynamik}$		Messvektor Fahrdynamikdaten
\underline{y}_{GPS}		Messvektor GPS-Daten
y_I		Koordinatenachse des Inertialsystems
y_P		Kartesische Koordinate der Fahrzeugposition
$E y_E$		prädierte Koordinate für das Eigenfahrzeug im Eigenkoordinatensystem
$E y_{EKB,aus}$		prädierte Koordinate des Austrittspunkts des Eigenfahrzeugs aus dem kritischen Bereich im Eigenkoordinatensystem
$E y_{EKB,ein}$		prädierte Koordinate des Eintrittspunkts des Eigenfahrzeugs in den kritischen Bereich im Eigenkoordinatensystem
$E y_{F,0}$		Kartesische Koordinate des Ursprungs des Fremdkoordinatensystems dargestellt im Eigenkoordinatensystem

$EY_{F,EKB,aus}$		prädizierte Koordinate des Fremdfahrzeugs zum Austrittszeitpunkt des Eigenfahrzeugs aus dem kritischen Bereich im Eigenkoordinatensystem
$EY_{F,EKB,ein}$		prädizierte Koordinate des Fremdfahrzeugs zum Eintrittszeitpunkt des Eigenfahrzeugs in den kritischen Bereich im Eigenkoordinatensystem
EY_{SP}		Koordinate des Schnittpunkts der Trajektorien im Eigenkoordinatensystem
FY_F		prädizierte Koordinate für das Fremdfahrzeug im Fremdkoordinatensystem
$FY_{F,EKB,aus}$		prädizierte Koordinate des Fremdfahrzeugs zum Austrittszeitpunkt des Eigenfahrzeugs aus dem kritischen Bereich im Fremdkoordinatensystem
$FY_{F,EKB,ein}$		prädizierte Koordinate des Fremdfahrzeugs zum Eintrittszeitpunkt des Eigenfahrzeugs in den kritischen Bereich im Fremdkoordinatensystem
$IY_{E,0}$		kartesische Koordinate des Ursprungs des Eigenkoordinatensystems im Inertialsystem
$IY_{F,0}$		kartesische Koordinate des Ursprungs des Fremdkoordinatensystems im Inertialsystem
Δy_E	m	Positionsfehler des Eigenfahrzeugs in Fzg-Querrichtung
Δy_F	m	Positionsfehler des Fremdfahrzeugs in Fzg-Querrichtung

griechische Einheit **Beschreibung**
Symbole

α	$^\circ, \text{rad}$	Schnittwinkel der Fahrbahnen
β_E	$^\circ, \text{rad}$	Schwimmwinkel des Eigenfahrzeugs
χ	$^\circ, \text{rad}$	Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse des in der Mitte der Kreisplatte stehenden Fahrzeugs und der Fahrzeugquerachse des umkreisenden Fahrzeugs
$\Delta\Phi$	$^\circ, \text{rad}$	Winkel zwischen den Fahrtrichtungen der Fahrzeuge
φ	$^\circ, \text{rad}$	Breitengrad
φ_0	$^\circ, \text{rad}$	Breitengrad des Ursprungs eines Koordinatensystems
$\varphi_{EP,FE}$	$^\circ, \text{rad}$	Drehwinkel
φ_P	$^\circ, \text{rad}$	Breitengrad der Position einer Fahrzeugs
κ	$1/\text{m}$	befahrene Krümmung
κ_E	$1/\text{m}$	aktuell vom Eigenfahrzeug vorgelegte Krümmung
κ_F	$1/\text{m}$	aktuell vom Fremdfahrzeug vorgelegte Krümmung
λ	m	Wellenlänge
λ	$^\circ, \text{rad}$	Längengrad
λ_0	$^\circ, \text{rad}$	Längengrad des Ursprungs eines Koordinatensystems
λ_P	$^\circ, \text{rad}$	Längengrad der Position eines Fahrzeugs
Θ	$^\circ, \text{rad}$	Winkel gegenüber Nord
Θ_E	$^\circ, \text{rad}$	Winkel gegenüber Nord des Eigenfahrzeugs
Θ_F	$^\circ, \text{rad}$	Winkel gegenüber Nord des Fremdfahrzeugs

$\Delta\Theta_E$	$^\circ, \text{rad}$	Ausrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs
$\Delta\Theta_F$	$^\circ, \text{rad}$	Ausrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs
σ	$\text{m}, ^\circ$	Standardabweichung
$\dot{\psi}$	$^\circ/\text{s}, 1/\text{s}$	Gierrate

Kurzfassung

Die Unfallstatistik weist den Kreuzungsbereich als einen wesentlichen Unfallschwerpunkt aus. Dies legt nahe, den Fahrer in kritischen Kreuzungssituationen durch Assistenzmaßnahmen zu unterstützen. Bisher hierfür prototypisch entwickelte Assistenzsysteme beschränken sich auf die Demonstration synthetischer Kreuzungsszenarien ohne eine Auseinandersetzung mit unscharfen Realdaten, die in der Praxis insbesondere durch Messfehler bei der Positionsbestimmung auftreten. Die Erprobung erfolgte in der Regel in einer Simulationsumgebung. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, auf der Basis der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation einen Querverkehrsassistenten (KQA) zu entwickeln, auf Funktionalität zu überprüfen und im Rahmen von praktischen Fahrversuchen zu erproben. Dabei ist der wissenschaftliche Nachweis zu erbringen, dass er tatsächlich ein Unfallvermeidungspotential in realen kritischen Kreuzungssituationen besitzt und dass eine Akzeptanz der Assistenz auch bei unscharfen Daten gegeben ist.

Das entwickelte Grundkonzept basiert auf den drei Teilsystemen Positionsbestimmung, Kommunikation und Assistenz. Für die Positionsbestimmung erfolgt eine Fusion von DGPS mit Fahrdynamikdaten in einem Kalman-Filter mit vorgelagerter Plausibilisierung der Eingangsdaten. Für die Kommunikation steht aktuell der WLAN-Standard IEEE802.11b (2.4GHz) zur Verfügung. Bei Sichtkontakt werden die gestellten Anforderungen an die Mindestreichweite zu fast 100 % erfüllt. Besteht hingegen eine Sichtverdeckung aus stark dämpfenden Hindernissen, z.B. Häusern, so liegt die maximale Reichweite weit unter den Anforderungen. Die entwickelte Architektur des Assistenzsystems gliedert sich in Algorithmen zur Bestimmung der Kreuzungsgeometrie und Vorfahrtssituation, zur Beurteilung des Fahrerverhaltens sowie zur Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung.

Die Funktionalität des entwickelten KQA wird im Rahmen von Simulationen und Fahrversuchen überprüft. Dabei zeigt sich, dass beim Einsatz von digitalen Karten mit hochgenauen Haltelinienpositionen eine Gesamtpositionsabweichung von ± 3 m auftritt. Ist die Haltelinie mit einer Abweichung von ± 2 m bekannt, dann tritt für 87 % der Fälle eine Datenunschärfe von ± 4 m und für 98 % eine Datenunschärfe von ± 5 m auf. Zum Nachweis der Wirksamkeit des KQA zur Unfallvermeidung wird eine objektive Testmethode mit bewusst abgelenkten Versuchspersonen entwickelt. Es zeigt sich, dass ohne KQA 92 % der Fahrer potenziell einen Kreuzungsunfall verursacht hätten. Mit KQA waren es nur 25 %. Damit ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $< 0,1$ %, also hochsignifikant, nachgewiesen, dass mit dem KQA in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario mehr Kollisionen erfolgreich verhindert werden als ohne. Zum Nachweis der Akzeptanz der Assistenz wird der Warnzeitpunkt zufällig variiert und damit die reale Positionsunschärfe nachgebildet. Die Auswertung der Versuche ergibt einen Korridor, in dem 95 % der Warnzeitpunkte von den Versuchspersonen akzeptiert werden. Damit kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % davon ausgegangen werden, dass mindestens 89 % aller gewarnten Fahrer eine visuell-haptische-Warnung mit Rampe und 90 % eine visuell-auditiv-haptische Warnung im jeweiligen Korridor akzeptieren. Dabei erweist sich die visuell-auditiv-haptische Warnung als die klar favorisierte Assistenzstrategie.

Mit dieser Arbeit ist es erstmalig gelungen, einen für den realen Fahrbetrieb tauglichen KQA zu entwickeln und mit Hilfe von Probandenversuchen in einer repräsentativen kritischen Kreuzungssituation das große Unfallvermeidungspotenzial sowie die Akzeptanz der Assistenz auch bei unscharfen Daten nachzuweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählte KQA Architektur ein viel versprechendes Konzept für die Erhöhung der Kreuzungssicherheit darstellt. Durch die Integration mit anderen möglichen Kreuzungsassistenzsystemen lässt sich damit ein ganzheitliches System zur umfassenden Erhöhung der Kreuzungssicherheit schaffen.

1 Einleitung

Die Untersuchung des Unfallgeschehens weist insbesondere Kreuzungen als einen wesentlichen Unfallschwerpunkt aus. So ereigneten sich 2006 in Deutschland 36% bzw. in den USA 31% aller Unfälle mit Personenschaden an Kreuzungen (siehe Abb. 1.1). 63% davon waren in Deutschland Unfälle mit querendem Verkehr. Demnach ist der Kreuzungsunfall in beiden Ländern ein sehr häufiger Unfall mit Personenschaden.

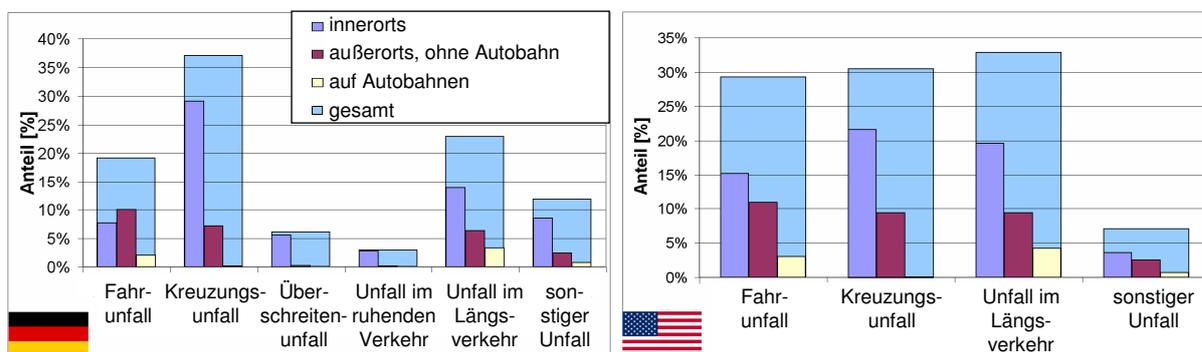


Abbildung 1.1: Unfallzahlen 2006 in Deutschland und den USA^{1, 2}

Bei der Annäherung an eine Kreuzung wirken viele Informationen auf den Fahrer ein. Auf Grundlage dieser Informationen fällt der Fahrer des wartepflichtigen Fahrzeugs die Entscheidung einer Kreuzungsdurchfahrt. Zu einer kritischen Situation, d.h. einer Situation mit hoher Kollisionsgefahr, kommt es, wenn der Fahrer nicht mehr in der Lage ist, diese Informationen richtig aufzunehmen und einzuordnen. Um dies zu vermeiden, besteht die Möglichkeit, den Fahrer durch ein vorausschauendes Querverkehrsassistenzsystem sowohl bei der Situationsinterpretation als auch bei der Vermeidung potentieller Kollisionen zu unterstützen.

Die Erkennung von potentiellen Kollisionen erfolgt in bereits prototypisch entwickelten Querverkehrsassistenzsystemen auf Basis der Positionen und Bewegungszustände der Fahrzeuge im Kreuzungsbereich, z.B. bei SENGUPTA ET AL.³. Ein Ansatz zur Erfassung dieser Informationen besteht in der Nutzung von am Fahrzeug angebrachten Umfeldersensoren, wie Radar, Lidar oder Video. Diese werden im Folgenden als fahrzeugautarke Sensoren bezeichnet. Gerade in der frühen Phase der Kreuzungsannäherung reicht diese Form der Informationsbeschaffung auf Grund zu geringer Reichweiten und Erfassungsreichweite häufig nicht aus. Eine Erweiterung zur Detektion anderer Verkehrsteilnehmer stellt der Datenaustausch mittels Kommunikationssystemen zwischen Fahrzeugen untereinander bzw. mit der Infrastruktur dar. Ein besonderer Vorteil dieser Technologie

¹Statistisches Bundesamt (2007): Strukturdaten, <http://www.destatis.de>.

²NHTSA (2007): General Estimates System-Datenbank, <http://www.nhtsa.gov>.

³Sengupta et al. (2006): Cooperative collision warning systems: Concept definition and experimental implementation.

gegenüber fahrzeugautarken Umfeldfassungssensoren besteht in der Möglichkeit, direkt gemessene Daten (z.B. Gierrate) zu übermitteln und Strecken von mehreren hundert Metern zu überbrücken.

Ein Problem besteht aber darin, dass bisher keine kommerziell verfügbare Kommunikationslösung für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (Fzg-Fzg-Kommunikation) existiert. Seit mehreren Jahren setzt sich jedoch in Europa das Car-to-Car-Communication-Consortium (C2C-CC) damit auseinander, einen entsprechenden Kommunikationsstandard zu spezifizieren. Die Anforderungen von Sicherheitssystemen, wie einem kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten (KQA), stellen eine wichtige Grundlage für diese Spezifikation dar.

1.1 Gegenstand der Arbeit

Bestandteile der über das Kommunikationssystem zu übertragenden Informationen sind die Positions- und Bewegungsdaten der Fahrzeuge sowie ein globaler Zeitstempel. Diese Daten dienen als Grundlage für die Querverkehrsassistenz. Durch Fehlerquellen bei der Positionsbestimmung, in der Kommunikation und auf Grund des instationären Fahrerhaltens bei der Kreuzungsannäherung sind diese Daten mit zeitlich veränderlichen Unschärfen behaftet. Diese Datenunschärfen bedeuten für das System eine Unsicherheit über die tatsächlichen Fahrzeugpositionen. In der Literatur sind kommunikationsbasierte Querverkehrsassistenzsysteme bisher nur als Prototypen und zwar entweder in Form von Simulationsmodellen oder von Fahrzeugapplikationen beschrieben, z.B. bei MAGES⁴ oder SENGUPTA ET AL.⁵. Der Nachweis der Wirksamkeit in Hinblick auf Unfallvermeidung in realen kritischen Kreuzungssituationen und der Akzeptanz seitens des Fahrers ist noch nicht erbracht worden. Ebenso erfolgte bisher noch keine Untersuchung des Einflusses unscharfer Daten auf Wirksamkeit und Akzeptanz.

Gegenstand dieser Arbeit ist es, einen fahrzeugtauglichen KQA zu entwickeln, auf Funktionalität zu überprüfen und damit im Rahmen von Praxisversuchen den wissenschaftlichen Nachweis zu erbringen, ob damit tatsächlich ein Unfallvermeidungspotenzial in realen kritischen Kreuzungssituationen und eine Grundakzeptanz der Assistenz seitens des Autofahrers gegeben ist. Dabei ist auch die Unschärfe der Daten zu berücksichtigen.

1.2 Vorgehensweise

In einem ersten Schritt wird der Stand der Technik zur Querverkehrsassistenz dargestellt und aufbauend darauf das Ziel der vorliegenden Arbeit formuliert. Aus der wissenschaftlichen Zielsetzung wird die zu verifizierende Hypothese abgeleitet (Kap. 2). Im Rahmen der Situationsanalyse werden die Ergebnisse der Analysen von Einzelunfällen dargestellt. Auf Grundlage der wissenschaftlichen Zielsetzung und der Unfallanalyse erfolgt die Definition der Anforderungen an den KQA (Kap. 3).

Eine wichtige Grundlage für den KQA ist es die Positions- und Fahrdynamikdaten mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Methoden werden aufgezeigt, die Unschärfe die-

⁴ Mages (2007): PReVENT Turn Into/Cross Driving Assistance.

⁵ Sengupta et al. (2006): Cooperative collision warning systems: Concept definition and experimental implementation.

ser Daten zu erkennen und zu verringern. Grundlage für die Definition der Anforderungen an die Positionsbestimmung ist das Fahrerverhalten im Kreuzungsbereich. Zur Übertragung der Daten wird ein prototypisch entwickeltes Kommunikationssystem eingesetzt. Die Anforderungen an dieses Kommunikationssystem und zukünftige Varianten werden aus Applikationssicht definiert. Das entwickelte System zur Ermittlung der Positions- und Fahrdynamikdaten sowie das Kommunikationssystem werden hinsichtlich ihrer Eigenschaften analysiert. Die Analyseergebnisse stellen die Grundlage für eine Abschätzung dar, unter welchen Bedingungen der KQA einsetzbar ist (Kap. 4, Kap. 5).

Das **Kernstück dieser Arbeit** bildet die Entwicklung des eigentlichen Assistenzsystems, die prototypische Umsetzung des KQA in zwei Versuchsfahrzeugen sowie die Evaluierung des KQA in realen kritischen Beispielsituationen. Bei der Evaluierung geht es um den Nachweis der Wirksamkeit zur Unfallvermeidung und der Grundakzeptanz der Assistenzfunktion. Die entwickelten Assistenzstrategien berücksichtigen dabei das geringe Zeitbudget und das durch die unscharfen Positionsdaten verschärfte Warndilemma. Insgesamt werden drei entwickelte Assistenzstrategien analysiert. Die für die Evaluierung des KQA in unfallkritischen Kreuzungssituationen entwickelten Methoden werden vorgestellt. Die Evaluierung erfolgt im Rahmen von Probandenversuchen im realen Fahrzeug (Kap. 6, Kap. 7).

Eine Darstellung der Qualität der erzielten Ergebnisse, ein Ausblick auf weiterführende Entwicklungsschwerpunkte sowie eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse bilden den Abschluss der Arbeit (Kap. 8, Kap. 9).

2 Stand der Technik

Die Untersuchung des Standes der Technik liefert die Grundlagen für die Entwicklung des KQA. Hierbei wird zunächst auf die grundsätzlichen Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen eingegangen. Als Ergebnis einer durchgeführten Literaturstudie erfolgt anschließend eine Beschreibung und Kurzanalyse der wichtigsten bereits prototypisch entwickelten Querverkehrsassistenzsystemen. Basierend auf diesen Ergebnissen wird die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen erläutert sowie die vorliegende Arbeit zum Stand der Technik abgegrenzt.

2.1 Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen

Die Analyse des Unfallgeschehens und der Unfallursachen liefert die Basisanforderungen für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Deren Leistungsfähigkeit hängt u.a. von der eingesetzten Sensorik ab, da diese in hohem Maße die Zuverlässigkeit der Situationsinterpretation beeinflusst. Für die Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems bieten sich zwei Vorgehensweisen an: Top-Down und Bottom-Up (siehe Abb. 2.1).

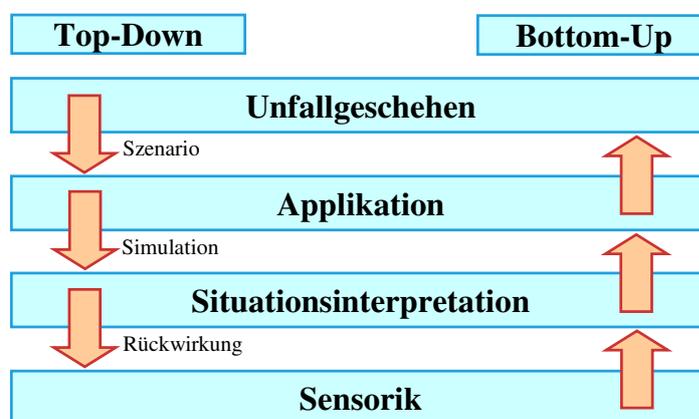


Abbildung 2.1: Top-Down- und Bottom-Up-Vorgehensweise bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen¹.

Die Top-Down-Vorgehensweise startet bei der Analyse von relevanten Unfällen, d.h. Unfällen, für die ein signifikantes Reduktionspotential besteht, um die benötigten Funktionen des Fahrerassistenzsystems zu definieren. Hierauf aufbauend wird das System entwickelt. Die technische Realisierbarkeit des Fahrerassistenzsystems wird anschließend auf Grundlage von Simulationswerkzeugen oder eines Fahrsimulators dargestellt. Die Ableitung der

¹ Meitinger/Ehmanns/Heißing (2004): Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen: Beispiel Stop-Schild-Warnung S. 148.

Sensoranforderungen für eine Umsetzung des Fahrerassistenzsystems im Fahrzeug schließt die Entwicklung ab. Im Gegensatz hierzu startet die Bottom-Up-Vorgehensweise mit der Analyse bestehender Sensortechnologie und leitet daraufhin ab, in welcher Form die Möglichkeit besteht Unfälle zu reduzieren.²

Die Top-Down-Vorgehensweise erlaubt die notwendige Interaktion zwischen der erwünschten Funktion, d.h. Reduzierung der Unfälle, und der technischen Realisierung. Dabei besteht ein Vorteil darin, dass es möglich ist, zunächst unabhängig von Sensorbeschränkungen, wie z.B. begrenzte Reichweite, die Machbarkeit des Fahrerassistenzsystems aufzuzeigen. Darüber hinaus bieten Simulationswerkzeuge und Fahrsimulatoren die Möglichkeit, das System auch in kritischen Verkehrssituationen ohne Gefahr für Mensch und Maschine unter reproduzierbaren Bedingungen zu erproben.

Ein Vorteil der Bottom-Up-Vorgehensweise besteht dagegen darin, dass bereits bestehende oder prototypisch entwickelte Sensoren genutzt werden. Die Leistungsfähigkeit dieser Sensoren wird analysiert und auf Grundlage der Ergebnisse das Fahrerassistenzsystem entwickelt. Somit erfolgt bereits bei der Systemauslegung eine Berücksichtigung der Sensoreinschränkungen. Daher besteht die Möglichkeit einer zeitnahen Weiterentwicklung und Serieneinführung. Bei den meisten bisher in der Literatur vorgestellten Forschungsarbeiten zur Querverkehrsassistenz wurde die Bottom-Up-Vorgehensweise gewählt.

2.2 Prototypisch entwickelte Querverkehrsassistenzsysteme

Das Ziel der Querverkehrsassistenz besteht in der Reduzierung der Unfälle an Kreuzungen durch die Unterstützung des Fahrers beim Überqueren einer Vorfahrtsstraße und beim Einbiegen. Die Grundlage hierfür stellt die Erfassung des Verkehrsgeschehens in der Kreuzung dar. Hierzu werden die Positions- und Bewegungsdaten der relevanten Fahrzeuge im Kreuzungsbereich erfasst. Diese Erfassung kann mittels autarker Sensorik, wie z.B. Radar, Lidar, Video, oder kooperativer Sensorik, wie z.B. Car2Car-Kommunikation, erfolgen. Basierend auf den erfassten Daten analysiert und beurteilt das System das Kreuzungsgeschehen. Wird eine kritische Kreuzungssituation erkannt, erfolgt eine Assistenz des Fahrers.³ Als Assistenzmaßnahmen zur Entschärfung kritischer Situationen sind grundsätzlich eine Information, Warnung und ein autonomer Eingriff denkbar.

In Abb. 2.2 wird die Sequenz eines Unfalls dargestellt. Während der Normalfahrt tritt eine kritische Situation auf. Um diese kritische Situation zu entschärfen, ist es erforderlich, dass der Fahrer mit einer entsprechenden Gegenmaßnahme reagiert. Die Aufgabe von Fahrerassistenzsystemen besteht darin, den Fahrer dabei zu unterstützen. Ist der point-of-no-return erreicht, ist eine Kollision nicht mehr vermeidbar. Fahrerassistenzsysteme, die dazu beitragen Kollisionen zu verhindern, werden als „Collision Avoidance“-Systeme und Systeme, die erst nach dem point-of-no-return zur Unfallfolgenminderung eingreifen, als „Collision Mitigation“-Systeme bezeichnet.

² Hopstock/Ehmanns/Spannheimer (2005): Development of Advanced Assistance Systems for Intersection Safety.

³ Breuel/Ehmanns/Arbitmann (2006): AKTIV: Vorhabensbeschreibung Teilprojekt Kreuzungsassistenz -KAS S. 6.

⁴ Freymann (2004): Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen S. 10

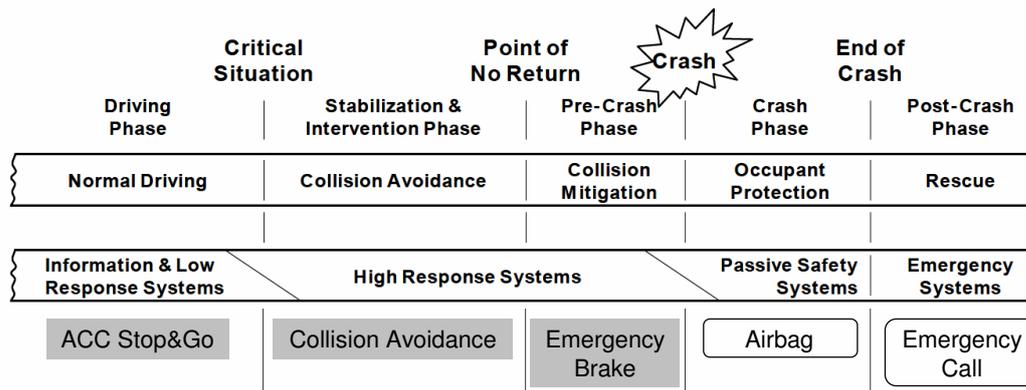


Abbildung 2.2: Sequenz eines Unfalls und Ansatzzeitpunkte für Fahrerassistenzsysteme⁴.

In der Literatur wurden bereits verschiedene prototypisch realisierte Querverkehrsassistenzsysteme vorgestellt. Der Schwerpunkt dieser Systeme liegt auf der „Collision Avoidance“. Bei diesen Assistenzsystemen wird zwischen Intelligenz des Assistenzsystems in der Infrastruktur und Intelligenz im Fahrzeug unterschieden. Zusätzlich lassen sich zwei verschiedene Situationen unterscheiden: 1. Assistenz bei der Kreuzungsannäherung und 2. Assistenz beim Stehen an der Haltelinie. Für die Situation der Kreuzungsannäherung unterscheiden sich die Systeme im gewählten Warnzeitpunkt. Im Folgenden werden die Systeme kurz vorgestellt sowie noch nicht betrachtete Aspekte zur Querverkehrsassistenz aufgezeigt.

2.2.1 Intelligenz in der Infrastruktur

Im Zuge des vom Federal Highway Administration (FHWA) geförderten Infrastructure Consortium wurde ein **Rural Intersection Decision Support (IDS)**⁵ System entwickelt. Das IDS-System basiert ausschließlich auf Komponenten in der an der Kreuzung installierten Infrastruktur. Diese sind Sensoren, Computer, ein Kommunikationssystem und eine Anzeige für den auf der Nebenstraße wartenden Autofahrer. Der Aufbau ist so gewählt, dass eine einfache Erweiterung, z.B. mit zusätzlichen Sensoren oder Anzeigen, möglich ist. Die Sensoren, Computer und das Kommunikationssystem dienen dazu, den Zustand der Kreuzung zu beobachten.

Der Zustand der Fahrzeuge auf der Hauptstraße ist durch deren Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Fahrstreifenzuordnung definiert. Basierend auf diesen Informationen werden die Zeitabstände zwischen den Fahrzeugen auf der Hauptstraße bestimmt. Der Zustand der Fahrzeuge auf der Nebenstraße ist durch deren Position und Geschwindigkeit sowie durch deren Fahrzeugart (PKW, NKW, Motorrad, etc.) definiert. Die Fahrzeugart ist für das IDS-System erforderlich, um die Abschätzung der Beschleunigungsfähigkeit der Fahrzeuge zu ermöglichen.

Der Zustand der gesamten Kreuzung wird von einem Zentralrechner berechnet. Durch einen in diesem integrierten Gefahrenbeurteilungsalgorithmus erfolgt eine Beurteilung, ob ein sicheres Einbiegen/Kreuzen möglich ist. Ist dies nicht gewährleistet, so leitet der Zentralrechner über eine Infrastruktur-basierte Fahrer-Infrastruktur-Schnittstelle eine entspre-

⁵ Donath et al. (2007): Intersection Decision Support: An Overview - Final Report.

chende Warnung des auf der Nebenstraße wartenden Fahrers ein. Als Fahrer-Infrastruktur-Schnittstellen-Konzept wurde z.B. ein herkömmliches Stoppschild um ein Display mit einer Risikowarnung erweitert, das nur aktiv wird, wenn eine potentielle Gefahr erkannt wird.

Beim IDS-System sind die Sensoren und ein Zentralrechner Bestandteil der Infrastruktur. Das System bietet nur eine Assistenz beim Stehen an der Haltelinie. Aspekte des Fahrerverhaltens sowie der Umgang mit unscharfen Positionsdaten des wartepflichtigen Fahrzeugs werden nicht betrachtet.

2.2.2 Intelligenz im Fahrzeug

Die Querverkehrsassistenzsysteme mit der Intelligenz im Fahrzeug unterscheiden sich untereinander dahingehend, dass die Erfassung des Kreuzungsgeschehens entweder rein auf fahrzeugautarker Sensorik, auf kooperativer Sensorik oder auf einer Kombination von beidem basiert.

Auf Basis fahrzeugautarker Sensorik

Im Rahmen des Teilprojekts Intersection Safety (INTERSAFE) vom durch die EU geförderten integrierten Projekt Preventive and Active Safety Applications (PReVENT) wurde ein Sensor-basierter Kreuzungsassistent entwickelt und evaluiert. Das Ziel bestand darin, die Machbarkeit eines **Sensor-basierten Kreuzungsassistenzsystems**⁶ aufzuzeigen.

Der Kreuzungsassistent umfasst u.a. einen Einbiege-/Kreuzenassistenten. Grundlage für den Einbiege-/Kreuzenassistenten sind eine hochgenaue Positionierung des Fahrzeugs relativ zur Kreuzung sowie die Bestimmung der Entfernung zum querenden Verkehr. Zur hochgenauen Positionierung wird eine hochpräzise Karte benötigt. Es wird gefordert, dass in dieser die Fahrbahnmarkierungen und natürlichen Landmarken mit einer relativen Genauigkeit von 0,1 m enthalten sind. Das Fahrzeug ist mit zwei Laserscannern und einer Videokamera ausgestattet. Mit Hilfe der Videokamera werden Daten über die Fahrbahnmarkierungen in der Kreuzung erfasst. Mit dem Laserscanner werden Daten von einerseits den natürlichen Landmarken und andererseits vom Querverkehr gesammelt. Das System setzt voraus, dass hierdurch die Entfernung zum querenden Verkehr auf 0,3 m genau bestimmt wird.

Bei der Fahrzeugortung wird gezielt auf die Nutzung von GPS verzichtet, weil nach der Ansicht der Autoren die GPS-basierte Ortung üblicherweise in Stadtgebieten nicht in der Lage ist, eine ausreichend genaue oder zuverlässige Ortung zu leisten. In einem zweiten Schritt erfolgt eine dynamische Risikobeurteilung. Diese basiert auf einer dynamischen Zuordnung („Tracking“) und einer Identifikation der Verkehrsteilnehmer (PKW, NKW, Motorradfahrer, etc.) sowie der Fahrerabsicht.

Wird bei der Annäherung an die Kreuzung eine potentiell kritische Situation mit dem Querverkehr erkannt, erfolgt eine permanente Darstellung des Risikogrades auf einem Bildschirm. Damit hat der Fahrer die direkte visuelle Rückkopplung zum vorliegenden Kollisionsrisiko.

Zur Evaluierung des Gesamtsystems⁷ wurde ein Sensortest, Systemtest und Nutzertest durchgeführt. Der Sensortest zeigt, dass mit dem Laserscanner andere PKW zuverlässig bis

⁶ Fürstenberg et al. (2007): D40.75 Final Report S. 30.

⁷ Chen/Deutschle (2007): D40.71/2/3 Evaluation and User Acceptance Test Results.

auf eine Entfernung von 200 m erkannt wurden. Bei einem Motorrad lag die Erkennungsreichweite bei knapp 150 m. Der durchschnittliche Fehler der Entfernungsbestimmung auf Grundlage der fusionierten Daten lag je nach durchgeführtem Test zwischen 10 und 20 Zentimeter. Der Systemtest zeigt, dass vom Kreuzungsassistenten im Durchschnitt in 97% der Fälle richtig gewarnt wurde. Zum Nutzertest fuhren 16 Probanden jeweils 2,5 Stunden mit den Systemen auf einem Testfeld. Die Probanden wurden vor, während und nach der Testfahrt befragt. Als Ergebnis zeigt sich, dass die Fahrer das System als hilfreich und entlastend beurteilen. Damit wurde die prinzipielle Machbarkeit eines Sensor-basierten Einbiege-/Kreuzenassistenten aufgezeigt.⁸

Dieser Einbiege-/Kreuzenassistent baut ausschließlich auf fahrzeugautarken Sensoren und einer hochpräzisen Karte auf. GPS wird zur Fahrzeugortung nicht genutzt. Die Funktion des Assistenzsystems ist nur gewährleistet, wenn freie Sicht zum Querverkehr besteht, eine hochpräzise Karte von der Kreuzung vorliegt und entsprechende Landmarken in der Realität wie auch in der Karte vorhanden sind. Damit ist eine genaue Positionierung des Fahrzeugs möglich. Der Umgang mit unscharfen Daten ist in diesem Assistenzsystem nicht erforderlich. Die Wirksamkeit dieses Systems zur Unfallvermeidung wurde noch nicht in praktischen Tests untersucht.

Auf Basis kooperativer Sensorik

Im Zuge einer vom General Motors R&D Center unterstützten Forschung wurde ein System zur **Cooperative Collision Warning (CCW)**⁹ entwickelt. Die CCW umfasst u.a. einen Intersection Assistant.

Das CCW-System greift zur Erfassung von Daten anderer Fahrzeuge ausschließlich auf ein drahtloses Kommunikationsnetzwerk zurück. Hierzu ist jedes Fahrzeug mit einem Kommunikationssystem ausgestattet, über welches die Positions- und Bewegungsdaten des Fahrzeugs an die relevanten Fahrzeuge im Kreuzungsbereich übertragen werden. Das Kommunikationssystem ermöglicht einen Erfassungsbereich von 360°, eine hohe Update-Rate und eine Erfassung der Daten auch von sichtverdeckten Fahrzeugen. In jedem Fahrzeug ist ein GPS-basierter Beobachter zur Schätzung der eigenen Fahrzeugposition integriert. Um auch eine Positionsbestimmung zu gewährleisten, wenn vom GPS-Empfänger keine Positionsdaten ausgegeben werden, wird eine so genannte Koppelnavigation verwendet. Als Messgrößen fließen in die Koppelnavigation neben den GPS-Daten auch die Bewegungsdaten des Eigenfahrzeugs mit ein. Modellwissen ermöglicht so die Positionsfortführung zeitweise auch auf alleiniger Basis der Bewegungsdaten.

Basierend auf den Positions- und Bewegungsdaten des Eigenfahrzeugs und der Querverkehrsfahrzeuge wird das Kollisionsrisiko bewertet. Der hierfür verwendete „Intersection Warning Algorithm“ basiert auf der Zeit und dem Abstand zur Kreuzung. Die Parameter zur Triggerung sind „Time to Collision“ (TTC) und „Distance to Collision“ (DTC). Die TTC berechnet sich aus der DTC und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs v . Hierbei wird angenommen, dass der Fahrer vernachlässigbar beschleunigt.

$$TTC = DTC/v \quad (2.1)$$

⁸ Rössler/Fürstenberg (2007): Intersection safety - results of the EC-project INTERSAFE.

⁹ Sengupta et al. (2006): Cooperative collision warning systems: Concept definition and experimental implementation.

Vor der Berechnung der TTC und DTC erfolgt eine Bestimmung des Kollisionspunktes. Der Kollisionspunkt ist der voraussichtliche Konfliktpunkt zweier Fahrzeuge und wird aus der prädizierten Trajektorie der Fahrzeuge unter der Annahme, dass die Fahrzeuge geradlinig weiterfahren abgeleitet. Ist der Winkel zwischen den Fahrtrichtungen der Fahrzeuge $\Delta\Phi$:

$$175^\circ \geq \Delta\Phi \geq 5^\circ \text{ oder } 355^\circ \geq \Delta\Phi \geq 185^\circ \quad (2.2)$$

so wird der Algorithmus aktiviert. Eine Warnung wird ausgegeben,

- wenn die TTC des einen Fahrzeugs und die des anderen Fahrzeugs kleiner als 7 s ist
- oder das eine Fahrzeug langsamer als 10 mph fährt und seine DTC kleiner als 50 m sowie die TTC des anderen kleiner als 7 s ist.

Treffen keine dieser Bedingungen zu, erfolgt keine Warnung. Die Warnung wird als optisches Symbol auf einem Monitor ausgegeben. Besteht keine Möglichkeit mehr die Kollision durch die Reaktion des Fahrers auf die Warnung zu vermeiden, können über die „Car2Car-Communication“ ein oder sogar beide Fahrzeuge aktiv gebremst werden. Die Machbarkeit des CCW-System wurde auf einer Presseveranstaltung gezeigt.¹⁰

Mit dem CCW-System wird gezeigt, dass mit einer Fzg-Fzg-Kommunikation u.a. ein Querverkehrsassistent realisierbar ist. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung erfolgt die Fusion von GPS- und Bewegungsdaten in einem Kalman-Filter. Wie das Assistenzsystem auf schwankende Positionsgenauigkeiten reagiert, wird jedoch nicht betrachtet. Das System berücksichtigt auch nicht das Fahrerverhalten bei der Kreuzungsannäherung. Es gibt keine Evaluierung der Wirksamkeit zur Vermeidung von Unfällen mit dem Querverkehr. Auch die Akzeptanz eines variierenden Warnzeitpunktes in Folge unscharfer Daten wird nicht betrachtet. Als Assistenz sind nur die beiden Extreme rein visuelle Warnung und autonome Vollbremsung realisiert. Eine Evaluierung dieser Assistenzen liegt nicht vor.

Ein weiteres rein auf **kooperativer Sensorik basierendes Querverkehrsassistenzsystem** wird von YANG ET AL.¹¹ vorgestellt. Der Fokus liegt auf gut einsehbaren Kreuzungen ohne Ampel. Dabei wird eine inhärente Unzulänglichkeit des menschlichen visuellen Suchsystems behandelt. Nähern sich z.B. zwei Fahrzeuge an eine Kreuzung an und ändern sich die Proportionen des durch den Kreuzungsmittelpunkt und die beiden Fahrzeuge aufgespannten Dreiecks nicht, so ist es für die Fahrer schwierig, auf das andere Fahrzeug aufmerksam zu werden.¹² Ändern sich hingegen die Proportionen des Dreiecks, so erkennt der Fahrer bereits vor dem Erreichen der Kreuzung andere Fahrzeuge leichter. Eine Unterstützung des Fahrers soll helfen, diese Schwäche zu überwinden. Die Fahrzeuge sind mit DGPS-Empfängern (Update-Rate 1 Hz) und einer Fzg-Fzg-Kommunikation zur Übertragung der Position, Geschwindigkeit, Zeit, etc. ausgestattet. Basierend auf dieser Information werden die Entfernung und Ausrichtung der Fahrzeuge sowie eine Kollisionswahrscheinlichkeit berechnet. Die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit basiert auf

¹⁰ Marshall (2006): V2V: GM technology can prevent accidents S. 4.

¹¹ Yang/Kobayashi/Katayama (2000): Development of an Intersection Collision Warning System Using DGPS S.123-127.

¹² Nach Scholl (2005): Fahrerverhalten und Mensch-Maschine-Interaktion - FVM wird der Tatbestand, dass ein Objekt nicht wahrgenommen wird, obwohl der Fahrer in die Richtung des Objekts blickt, als das „Looked but failed to see“-Phänomen bezeichnet.

der Steigung S der Verbindungsgeraden zwischen den Fahrzeugen:

$$S = \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} \quad (2.3)$$

x_A , x_B und y_A , y_B sind die Positionskoordinaten der Fahrzeuge A und B. Die Beurteilung, ob die Fahrzeuge kollidieren werden oder nicht, erfolgt an Hand der Änderung dieses Koeffizienten S . Daher wird S auch „Collision Judgment Coefficient (CJC)“ genannt. Hat der CJC nach k Zeitschritten (mit z.B. $k = 3$) eine höher Änderung als 10% besteht nach Annahme der Autoren keine Kollisionsgefahr. Liegt eine geringere Änderung als 10% vor, besteht möglicherweise eine Kollisionsgefahr. Daher wird von den Autoren vorgeschlagen, den CJC für die Beurteilung der Kollisionswahrscheinlichkeit zu verwenden. Der Warnzeitpunkt liegt 6 s bevor das Fahrzeug die Kreuzung erreicht. Dieser Zeitpunkt errechnet sich aus folgenden aufgerundeten Werten:

1. Vorausschauzeit des Fahrers: 2 s
2. Reaktionszeit des Fahrers auf eine Warnung (1,0 bis 1,2 s): 2 s
3. Ansprechzeit der Bremse (0,4 bis 0,8 s): 1 s
4. Latenzzeit der Kommunikation (0,8 s): 1 s

Mit Experimenten im Fahrzeug und in der Simulation konnte bisher nur die Machbarkeit des Systems nachgewiesen werden. Es ist geplant die Leistungsfähigkeit des Kollisionswahrscheinlichkeitsalgorithmus durch die Berücksichtigung der voraussichtlich benötigten Zeit bis zur Kreuzung weiter zu erhöhen. Zudem wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle genauer betrachtet.

Beim skizzierten System liegt der Fokus auf einer einfachen Methodik zur Berechnung des Kollisionsrisikos bei der Kreuzungsannäherung. Dabei erfolgt keine Berücksichtigung des Fahrerverhaltens und der Unschärfe der Positions- und Kommunikationsdaten. Eine Evaluierung des Nachweises der Wirksamkeit zur Unfallvermeidung im Realfahrzeug gibt es nicht. Auch die Akzeptanz eines variierenden Warnzeitpunktes wurde nicht betrachtet.

Auf Basis fahrzeugautarker und kooperativer Sensorik

Im Rahmen von INTERSAFE wurde ein **Einbiege-/Kreuzenassistent im Fahrsimulator**¹³ realisiert. Diese Entwicklung orientierte sich an der Top-Down-Vorgehensweise, d.h. zunächst erfolgte eine sensorunabhängige Entwicklung des Assistenzsystems und anschließend wurden die Anforderungen an die autarke und kooperative Sensorik abgeleitet (siehe Kap.2.1).

Als Grundlage für die Entwicklung des Einbiege-/Kreuzenassistenten wurden die Kreuzungsannäherungen von 31 Fahrern analysiert. Es zeigt sich, dass die meisten Fahrer mit maximal $3,1 \text{ m/s}^2$ und in keinem Fall mit mehr als 4 m/s^2 verzögerten, wenn das Fahrzeug an der Haltelinie zum Stillstand gebracht wurde.

Der entwickelte Algorithmus prädiziert das Verhalten des Fahrers. Zeigt der Fahrer keine Anzeichen, dass er an der Haltelinie anhalten wird, erfolgt die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit mit dem querenden Verkehr. Die Kollisionswahrscheinlichkeit wird als

¹³ Fürstenberg et al. (2007): D40.75 Final Report S. 15 und S. 41.

hoch angenommen, wenn beide Fahrzeuge etwa zeitgleich die Kreuzung erreichen. Liegt eine hohe Kollisionswahrscheinlichkeit vor, wird der Fahrer gewarnt.

Bei der Mensch-Maschine-Schnittstelle werden zwei Situationen unterschieden: 1. Das wartepflichtige Fahrzeug hat vor dem Einbiegen/Kreuzen angehalten oder 2. die Kreuzung wird ohne Anhalten überquert. Im ersten Fall erfolgt eine visuell-auditive Warnung und eine aktive Bremsung. Dadurch wird das stehende Fahrzeug daran gehindert, in die Kreuzung einzufahren. Im zweiten Fall erhält der wartepflichtige Fahrer eine rein visuelle Information darüber, dass sich ein vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug auf Kollisionskurs befindet. Reagiert der Fahrer auf diese Information nicht ausreichend, so erfolgt eine visuell-auditiv-haptische Akutwarnung. Die haptische Warnung besteht in einem starken Bremsruck.

Die Evaluierung des Einbiege-/Kreuzenassistenten erfolgte im dynamischen Fahrsimulator der BMW Group. Dabei ging es um dessen Machbarkeit auf Grundlage idealer Daten und um die Grundakzeptanz der Assistenz. Die Kollisionswarnung während der Annäherung beurteilten die Versuchspersonen als zufriedenstellend. Die aktive Bremsung im Falle des Versuchs, in eine ungeeignete Lücke einzufahren, sahen sie dabei als sehr hilfreich an.

Bemängelt wurde allerdings, dass die aktive Bremsung im Stillstand kein Hineintasten zur Verbesserung der Einsicht in die Vorfahrtsstraße zuließ. Bei der Annäherung an die Kreuzung wurde die Zeit zwischen der Information und der Akutwarnung als zu gering eingestuft. In den meisten Fällen bestand zu wenig Zeit, um dem Fahrer die Möglichkeit zu geben, durch eine rechtzeitige Reaktion auf die Information die Warnung zu verhindern.

¹⁴ Die Ergebnisse der Anforderungsdefinition sind von MAGES¹⁵ zusammengefasst.

Dieser im Rahmen von INTERSAFE entwickelte Einbiege-/Kreuzenassistent ist ausschließlich im Fahrsimulator umgesetzt. Der Fahrsimulator stellt für das Eigenfahrzeug sowie die Fremdfahrzeuge ideale Positions- und Bewegungsdaten zur Verfügung. Daher wird vom Assistenzsystem kein Umgang mit unscharfen Daten benötigt. Das System bietet für beide Situationen, die Annäherung an die Kreuzung und das Stehen an der Haltelinie, eine Assistenz an. Eine Evaluierung des Systems wurde durchgeführt. Dabei konnte das Potential zur Unfallvermeidung nicht abgeleitet werden, da bei den Fahrsimulatoruntersuchungen zu wenige kritische Kreuzungssituationen aufgetreten sind. Im Rahmen der Evaluierung wurde die Akzeptanz variierender Warnzeitpunkte, in Folge unscharfer Daten, nicht untersucht.

Ein Kreuzungsassistenzsystem auf Basis fahrzeugautarker und kooperativer Sensorik hat Honda im Rahmen des **Advanced Safety Vehicle (ASV)**¹⁶ Projekts entwickelt. Die ASV-3 Fahrzeuge (PKW und Motorrad) sind mit verschiedenen erweiterten Sicherheitstechnologien ausgestattet. Die Sicherheitstechnologien beinhalten ein System auf Basis von Kameras und Radarsensoren zur Erfassung des Fahrzeugumfeldes. Zusätzlich sind die Fahrzeuge mit einer bidirektionalen Kommunikation (5,8 GHz) zum Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen ausgestattet. Das System unterstützt eine Kommunikation von bis zu 120 Fahrzeugen in einem Umkreis von bis zu 200 Metern.

Auf Grundlage der erfassten Daten wird u.a. ein **Intersection Stop & Go Assistance System** realisiert. Die Systemausprägung des Intersection Stop & Go Assistance System unterscheidet sich danach, ob das System in einem Motorrad oder einem PKW verbaut ist. Im Motorrad wird Bildverarbeitung zur Erkennung von Stoppschildern und Straßenmar-

¹⁴ Hopstock/Thoma (2007b): D40.74b Evaluation Results of the Intersection Safety System S. 4ff und S. 16ff

¹⁵ Mages (2007): PReVENT Turn Into/Cross Driving Assistance.

¹⁶ Honda (2005): Honda Completes Development of ASV-3 Advanced Safety Vehicles S. 3f und S. 9.

kierungen genutzt. Zeigt der Motorradfahrer bei der Annäherung an die Kreuzung keine Anzeichen an der Haltelinie anhalten zu wollen, erfolgt eine visuelle und auditive Warnung.

Im PKW wird auf Grundlage des Navigationssystems erkannt, wenn die Kreuzung über keine Lichtsignalanlage verfügt. Bildverarbeitung erkennt die Haltelinien und Stoppschilder. Zeigt der Fahrer keine Anzeichen an der Haltelinie anzuhalten, erfolgt eine auditive Warnung und ein periodisch variierender Bremsdruck. Sobald das Automobil oder das Motorrad zum Stillstand gekommen ist, vermittelt die Fzg-Fzg-Kommunikation die Positionen von allen sich annähernden Fahrzeugen und unterstützt den Fahrer beim sicheren Einbiegen/Kreuzen.

Das Intersection Stop & Go Assistance System baut auf Fzg-Fzg-Kommunikation und fahrzeugautarken Sensoren auf. Die durch die Fzg-Fzg-Kommunikation übertragenen Daten stellen die Grundlage für die Kollisionswarnung dar. Durch die fahrzeugautarken Sensoren werden die Haltelinie und Stoppschilder erkannt. Die Fzg-Fzg-Kommunikation erfolgt jedoch erst, wenn das wartepflichtige Fahrzeug zum Stillstand gekommen ist. Somit besteht keine Möglichkeit bei der Kreuzungsannäherung des wartepflichtigen Fahrzeugs eine Kollisionswarnung auszugeben. Lässt der Fahrer bei der Kreuzungsannäherung trotz Stoppschild nicht erkennen, an der Haltelinie anzuhalten, erfolgt auf Basis der Daten der fahrzeugautarken Sensorik eine Warnung. Das System adressiert demnach die Situation „Stehen an der Haltelinie“ mit zusätzlicher Stoppschildüberfahrwarnung.

Einen weiteren Kreuzungsassistenten auf Basis **fahrzeugautarker** und **kooperativer Sensorik** hat Denso¹⁷ vorgestellt. Im Unterschied zu den ASV3-Fahrzeugen befindet sich aber die Sensorik nicht im Fahrzeug, sondern in der Infrastruktur. Wie beim Cooperative Collision Warning erfolgt auch bei diesem System der Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen bereits während der Annäherung an die Kreuzung. Im Rahmen der Projektdurchführung wurden vier verschiedene Technologieszenarien (siehe Abb. 2.3) analysiert.

	Low-tech "Simple IVC"	High-tech "Simple IVC"	Low-tech "Sophisticated IVC"	High-tech "Sophisticated IVC"
Communication technology	IVC	IVC	IVC+RVC	IVC+RVC
Sensor technology	today's GPS+ digital maps	next generation system + advanced digital maps	today's GPS+ digital maps	next generation system + advanced digital maps
GPS-Accuracy (m)	10	2	10	2
Communication range (m)	120	120	120	120
Signal accuracy (%)	5	5	5	5
Latency time (ms)	300	100	300	100
Update rate (Hz)	10	10	10	10
Equipment rates (%)	80 and 90	80 and 90	10 and 20	10, 20
RVC-detection range	-	-	50	50
Applicable assistance	informing/warning	informing/warning intervening	informing/warning	informing/warning intervening

Abbildung 2.3: Parameter der von Denso untersuchten Technologiekonzepte.

In allen Technologieszenarien wird eine Kommunikationsreichweite von 120 m, eine Signalgenauigkeit von 5 % Prozent und eine Update-Rate von 10 Hz gefordert. „Simple“ bedeutet, dass lediglich Inter Vehicle Communication (IVC) verwendet wird. Bei „Sophisti-

¹⁷ Suzuki/Benmimoun/Chen (2007): Development of an Intersection Assistant.

cated“ wird zusätzlich eine Roadside Vehicle Communication (RVC) eingesetzt. Durch die RVC werden Daten von Sensoren der Infrastruktur übermittelt. Sie ermöglichen auch die Erfassung von Fahrzeugen die nicht mit Kommunikation ausgestattet sind. Unter „Low-tech“ wird verstanden, dass heute verfügbare Positionierungssysteme und digitale Karten eingesetzt werden. Dabei wird von einer GPS-Genauigkeit von 10 m ausgegangen. Die Latenzzeit der Kommunikation darf 300 ms nicht überschreiten. „High-tech“ umfasst die nächste Generation von Positionierungssystemen und die Erweiterung digitaler Karten um die Verkehrsregelungen an Kreuzungen. Die angenommene Positionsgenauigkeit liegt hier bei zwei Metern, und die Latenzzeit der Kommunikation darf 100 ms nicht überschreiten.

Das Assistenzsystem stellt drei Funktionen zur Verfügung:

- Information darüber, ob sich ein anderes Fahrzeug der Kreuzung nähert
- Warnung des Fahrers für den Fall, dass eine kritische Kreuzungssituation bevorsteht
- Aktiver Eingriff in die Bremse, falls der Fahrer nicht selbst reagiert

Als Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) bieten sich visuelle, auditive und haptische Mittel an. Für die Kreuzungsassistenz bewerten die Autoren eine haptische Schnittstelle als nicht geeignet, weil die durch die Haptik zur Verfügung gestellte Information als mehrdeutig angesehen wird. Für das visuelle MMI wird ein Head-Up Display, ein Center Console Display und ein Instrument Panel Display verwendet. Das auditive MMI wird über ein einzelnes akustisches Signal und eine Sprachnachricht realisiert. Die Sprachnachricht übermittelt eine Warnung.

Die verschiedenen Technologieszenarien und unterschiedliche Kombinationen aus visuellem und auditivem MMI wurden mittels der Verkehrsflusssimulation PELOPS, einem dynamischen Fahr Simulator und zwei realen Fahrzeugen analysiert. Die Simulation von Worst-Case-Situationen zeigen, dass eine Kommunikationsreichweite von 120 m für Geschwindigkeiten bis zu 100 km/h ausreichend ist. Ebenso wird die von heutigen Ortungssystemen erreichte Genauigkeit von 10 m für warnende und informierende Systeme als ausreichend angesehen. Als Grund sehen die Autoren, dass der Fahrer selbst auch nicht in der Lage ist die Entfernung zu anderen Fahrzeugen genauer abzuschätzen.

Hinsichtlich der Verkehrssicherheit zeigen die Ergebnisse, dass der wichtigste Aspekt die Ausstattungsrate ist. Welches Technologiekonzept und -layout tatsächlich genutzt wird, spielt nur eine zweitrangige Rolle. Der Grund liegt darin, dass bei einer niedrigen Ausstattungsrate die meisten Fahrzeuge nicht erfasst werden und somit nicht die Möglichkeit besteht, gefährliche Situationen zu vermeiden. Zusätzlich hat sich ergeben, dass ein warnendes System wirkungsvoller ist als ein informierendes System.

An der Evaluierung im Fahr Simulator und im realen Fahrzeug nahmen jeweils 16 Personen teil. Als bestes Anzeige konzept im Fahrzeug wurde Human Voice + Center Console Display bewertet. Durch die Probanden hat das Konzept Low-tech „Simple IVC“ die schlechteste Beurteilung erhalten. Auf Grund der fehlenden Information über die Vorfahrtsregelung werden auch die vorfahrtsberechtigten Fahrer gewarnt. Dies wird von den Fahrern nicht akzeptiert. Die beste Bewertung hat das High-tech „Sophisticated IVC“ Konzept erhalten.

Für die erste Einführung kommunikationsbasierter Kreuzungsassistenzsysteme wird von den Autoren vorgeschlagen, ein „Sophisticated IVC“ Konzept auszuwählen, auch wenn die RVC dann zunächst nur an einigen Unfallschwerpunkten eingesetzt werden kann. Basierend auf den Simulationsergebnissen besteht die Möglichkeit, voraussichtlich bis zu 20%

aller kritischen Kreuzungssituationen zu vermeiden. Fast alle Probanden sind sich darüber einig, dass mit dem Kreuzungsassistenten die Möglichkeit besteht, die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Jedoch haben sie die Befürchtung, dass sich manche Fahrer zu stark auf das System verlassen.

Dieses Assistenzsystem wurde auf Basis unterschiedlicher Technologieszenarien in der Verkehrssimulation und im Fahrsimulator umgesetzt. Zusätzlich erfolgte die Realisierung eines Technologieszenarios im realen Fahrzeug. Die unterschiedlichen Technologieszenarien wurden durch Probandenversuche bewertet. Im Fahrzeug wurde keine Auseinandersetzung mit unscharfen Daten adressiert. Eine Evaluierung zum Nachweis der Wirksamkeit zur Unfallvermeidung im Realfahrzeug wurde nicht durchgeführt. Auch die Akzeptanz eines variierenden Warnzeitpunktes wurde nicht untersucht.

2.3 Diskussion und daraus abgeleitete zu verifizierende Hypothese

Mit der Top-Down- und Bottom-Up-Vorgehensweise wurden die Vorteile zweier Strategien zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen vorgestellt. Um diese Vorteile möglichst weitgehend zu nutzen wird bei der Entwicklung des KQA eine **kombinierte Vorgehensweise** gewählt. Die Situationsanalyse sowie Anforderungs- und Funktionsdefinition erfolgt gemäß dem Top-Down-Ansatz. Als Grundlage für die Auslegung des KQA werden aber die Unschärfen der adressierten Sensoren zunächst analysiert und entsprechend berücksichtigt (Bottom-Up-Vorgehensweise). Das Ziel der kombinierten Vorgehensweise besteht darin, den Bogen zwischen einer problemorientierten Entwicklung sowie einer Realisierung und Evaluierung des KQA im Fahrzeug zu schließen. Zudem soll die Top-Down-Definition der Anforderungen als Grundlage für die Weiterentwicklung der eingesetzten Sensoren dienen. Bei der Evaluierung des KQA werden die Ergebnisse sowohl aus den theoretischen Überlegungen der Situationsanalyse als auch aus der Sensoranalyse berücksichtigt.

Der **Stand der Technik** wurde hinsichtlich der bereits prototypisch realisierten Querverkehrsassistenzsysteme betrachtet. Dabei zeigte sich, dass die bisherigen Arbeiten das Ziel hatten, die grundsätzliche Machbarkeit verschiedener Technologiekonzepte aufzuzeigen. Diese wurden auch untereinander verglichen. Der Umgang mit unscharfen Daten wurden nur am Rande betrachtet und ein Funktionsnachweis der Querverkehrsassistenz in realen kritischen Kreuzungssituationen noch nicht erbracht.

Die **wissenschaftliche Zielsetzung** der vorliegenden Dissertation besteht daher im Nachweis, dass ein KQA auch auf Grundlage unscharfer Realdaten im Fahrzeug umsetzbar ist. Aus der wissenschaftlichen Zielsetzung wird die **existenzielle Hypothese** abgeleitet: „Es ist möglich, einen KQA in zwei Beispielszenarien auch auf Grundlage unscharfer Realdaten im Fahrzeug umzusetzen, wenn die Anforderungen an die Positionsbestimmung und die Kommunikation erfüllt sind sowie eine adressierte Kreuzungsgeometrie vorliegt!“.

Die adressierten Neuheitsansprüche sind:

- Entwicklung und Funktionsüberprüfung eines fahrzeugtauglichen KQA unter Berücksichtigung unscharfer Daten.
- Nachweis der Wirksamkeit zur Unfallvermeidung in einem realen kritischen Kreuzungsszenario.

- Nachweis der Grundakzeptanz der Assistenz in einem realen und kritischen Kreuzungsszenario unter Berücksichtigung unscharfer Daten.

Zum Nachweis der Wirksamkeit und der Grundakzeptanz sind geeignete Methoden zu entwickeln und anzuwenden, um eine praxismgerechte Evaluierung des KQA zu erreichen.

3 Situationsanalyse und daraus abgeleitete Systemarchitektur

Die Unfallstatistik zeigt die hohe Bedeutung von Unfällen mit Querverkehr auf. Um Ansatzpunkte für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zur Vermeidung dieser Unfälle zu finden, bietet sich eine weitere Detaillierung des Unfallgeschehens an. Im Folgenden wird diese Detaillierung vorgenommen. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Unfallanalyse werden die Anforderungen an die Funktion und die Technik des KQA definiert und die Architektur des KQA entwickelt.

3.1 Unfallanalyse

Das Ziel der Unfallanalyse besteht darin, die relevanten Verkehrssituationen zu klassifizieren. Auf Grundlage der Klassifizierung werden diejenigen Situationen ausgewählt, bei denen der Einsatz eines aktiven Sicherheitssystems besonders großen Nutzen verspricht. Dies sind entsprechend unfallträchtige Situationen, bei denen ein relevantes Reduktionspotential besteht. Zudem ist erforderlich, dass die Möglichkeit einer Unfallvermeidung durch ein aktives Sicherheitssystem aus technischer Sicht überhaupt gegeben ist.¹

Zur Klassifizierung der betrachteten Kreuzungsunfälle wurde die German In-Depth Accident Study (GIDAS) Datenbank ausgewertet. Die hier gesammelten Daten sind entsprechend der Verteilung der amtlichen Unfallstatistik gewichtet. Hierbei zeigt sich, dass bei Unfällen mit Querverkehr die mit 301, 321, 302 und 322 (siehe Abb. 3.1) bezeichneten Unfalltypen am häufigsten auftreten sind. In Summe decken diese Unfalltypen 61 % aller Unfälle mit Querverkehr ab.²

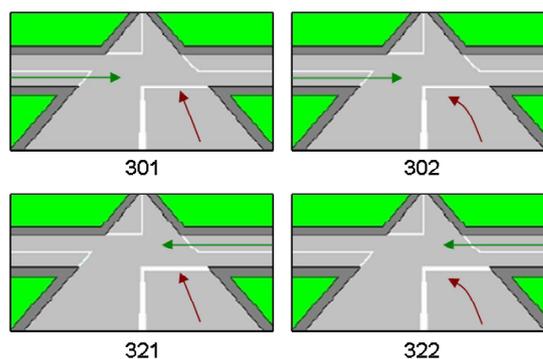


Abbildung 3.1: Häufigste Unfalltypen beim Einbiegen und Kreuzen an X- und T-Kreuzungen.

¹ Meitinger/Ehmanns/Heißing (2004): Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen: Beispiel Stop-Schild-Warnung S. 147.

² Klanner/Ehmanns/Winner (2006): ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz S. 2ff.

Die häufigsten Unfallursachen sind Unaufmerksamkeit (36 %), Fehleinschätzung (33 %) und Sichtbehinderung (23 %) des wartepflichtigen Fahrers. In 42 % der Unfälle erfolgte von diesem keine Bremsreaktion und in 60 % keine Ausweichreaktion³. Dies zeigt die Notwendigkeit, den Fahrer bereits bei der Kreuzungsannäherung zu unterstützen und vor potentiellen Kollisionen im Kreuzungsbereich zu warnen.

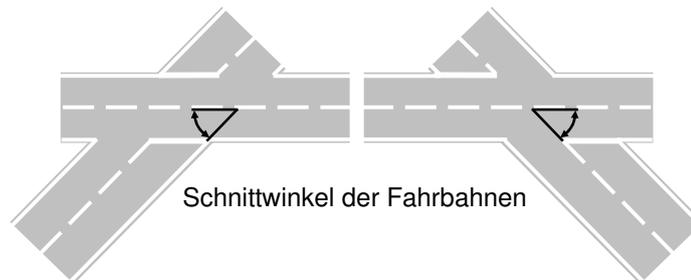


Abbildung 3.2: Bei der Unfallanalyse wird immer der kleinere Schnittwinkel zwischen den Fahrbahnen betrachtet.

Zur genaueren Beschreibung der relevanten Kreuzungsgeometrie wurden im Rahmen von Einzelunfallanalysen zusätzlich der Schnittwinkel (siehe Abb. 3.2) und die Krümmung der von den beiden Kollisionspartnern befahrenen Fahrbahnen betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.3 dargestellt.

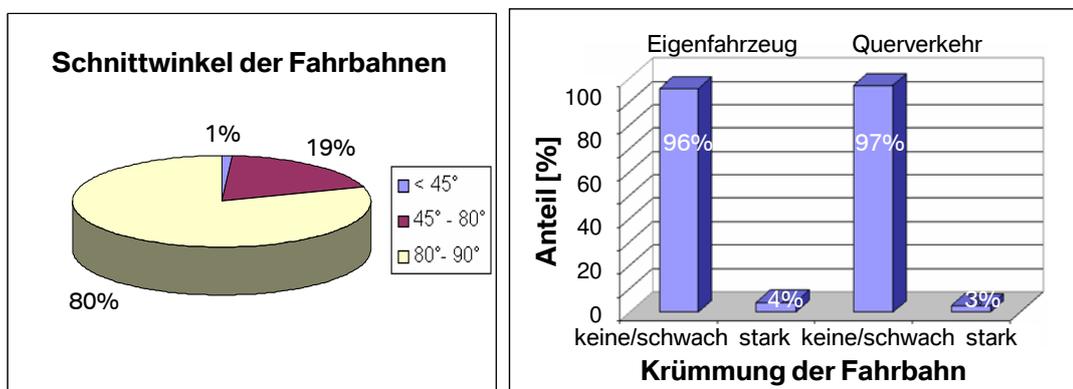


Abbildung 3.3: Relevante Kreuzungsgeometrie bei den häufigsten Unfalltypen bei Unfällen mit Querverkehr: 301, 321, 302, 322 auf Basis der GIDAS Datenbank.

Als Grundlage für die Bewertung erfolgte eine Einteilung des Schnittwinkels in drei Intervalle mit 80 ° bis 90 °, 45 ° bis 80 ° und kleiner als 45 °. In 80 % der Fälle lag ein Schnittwinkel der Fahrbahnen von 80 ° bis 90 ° und in 19 % von 45 ° bis 80 ° vor. Die Krümmung der Fahrbahnen wurde für das wartepflichtige und vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug getrennt betrachtet. Die Krümmung wird aus dem inversen Radius der Fahrbahn berechnet. Differenziert wurde nach keine oder nur eine schwache bzw. starke Fahrbahnkrümmung. In 96 % lag beim Eigenfahrzeug und 97 % beim Querverkehr keine oder nur eine schwache Krümmung der Fahrbahnen vor.

³ Hannawald (2005): Unfallanalyse zur Entwicklung und Bewertung von Fahrerassistenzsystemen im Kreuzungsbereich.

Eine weitere Erkenntnis sind die sechs häufigsten Unfallsituationen mit Querverkehr. Sie werden durch die Verkehrsregelung, Knotentyp sowie das Abbiegemanöver charakterisiert und in Tab. 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Die identifizierten häufigsten Unfallsituationen an Kreuzungen. RvL: Rechtsvor-Links, VA: Vorfahrtachten, X: X-Kreuzung, T: T-Kreuzung.

Verkehrssituation	Verkehrsregelung	Knotentyp	Abbiegemanöver	Häufigkeit [%]
1	RvL	X	Kreuzen	12
2	RvL	T	Kreuzen	2
3	RvL	XT	Linksabbiegen	2
4	VA	X	Kreuzen	36
5	VA	T	Linksabbiegen	22
6	VA	T	Rechtsabbiegen	5

In Abb. 3.4 sind die drei häufigsten Kreuzungsszenarien bei Unfällen mit Querverkehr dargestellt. Sie unterteilen sich nach den Unterscheidungsmerkmalen Sichtverdeckung, Fahrstreifenanzahl und zulässige Höchstgeschwindigkeit. Beim Szenario 1 und 2 liegt keine Sichtverdeckung vor. Insgesamt werden durch diese beiden Szenarien 63 % der Unfälle abgedeckt.

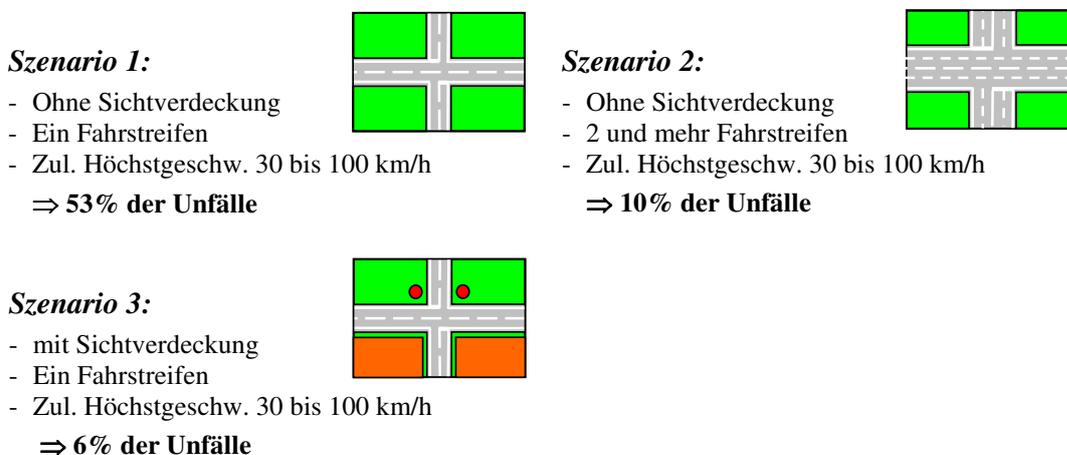


Abbildung 3.4: Relevante Kreuzungsszenarien bei den häufigsten Unfalltypen bei Unfällen mit Querverkehr: 301, 321, 302, 322 auf Basis der GIDAS Datenbank.

Die Angabe „Sichtverdeckung“ bezieht sich auf Sichtverdeckungen für den Fahrer im Kreuzungsbereich. Hierbei wird aber keine Aussage darüber getroffen, ob auch für ein Kommunikationssystem oder einen fahrzeugautarken Umfeldersensor eine Sichtverdeckung insbesondere in der Annäherungsphase bestehen würde. Daher wurde im Rahmen der Einzelunfallanalyse untersucht, ob während der Kreuzungsannäherung eine Sichtverdeckung zwischen dem wartepflichtigen und vorfahrtsberechtigten Fahrzeug bestand. Hierbei wurden die Länge der Sichtverdeckung sowie die Ortslage unterschieden. Das Ergebnis ist in Tab. 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2: Verteilung der betrachteten Unfälle hinsichtlich der Länge der Sichtverdeckung bei der Kreuzungsannäherung für Kreuzungsunfälle inner- und außerorts an schildergeregelten Knotenpunkten bei Tag.

Sichtverdeckung bei der Annäherung	innerorts [%]	außerorts [%]
Endet an Haltelinie	24	0
Endet 5 m vor Haltelinie	32	10
Endet 10 m vor Haltelinie	17	5
Endet 15 m vor Haltelinie	3	5
Endet 20 m vor Haltelinie	5	0
Endet 50 m vor Haltelinie	1	0
Keine	18	80
Insgesamt	78 [Anzahl]	20 [Anzahl]

Dies zeigt, dass insbesondere innerorts häufig eine Sichtverdeckung bei der Kreuzungsannäherung besteht. Daher ist es erforderlich, bei der Auslegung des Kommunikationssystems diesen Sachverhalt zu berücksichtigen, um eine hohe Verfügbarkeit des Assistenzsystems zu gewährleisten.

Die hohe Zahl von Unfällen mit Querverkehrsfahrzeugen und die Unfallursachen zeigen die Notwendigkeit, den Fahrer bereits bei der Kreuzungsannäherung zu unterstützen. Welche Formen der Unterstützung sich anbieten, wird in Abschnitt 6.4 erläutert. Grundsätzlich besteht das Ziel des KQA darin, potentielle Kollisionen möglichst frühzeitig zu erkennen, so dass die kritische Situation bereits im Vorfeld der Gefährdung durch Information oder Warnung entschärft werden kann.

3.2 Anforderungen

Der KQA soll dem Autofahrer helfen, in kritischen Situationen Einbiege-/Kreuzenunfälle zu vermeiden. Die Assistenz darf sich dabei nicht ausschließlich auf den Zeitraum nach dem Eintreten einer kritischen Situation und auf den Einsatz hochkomplexer autonomer Systeme beschränken (siehe Abb. 2.2). Ziel muss es vielmehr sein, auch die Annäherungsphase mit ins Kalkül einzubeziehen und den langen Zeitraum vor dem Eintreten einer kritischen Situation möglichst effektiv zur Konfliktvermeidung zu nutzen.⁴ Die Definition der Funktion und der Technik des KQA orientiert sich daran, dieses Ziel zu erreichen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in den nachfolgenden Abschnitten die wichtigsten Anforderungen zusammengestellt. Dabei wird jeweils auf die Kapitel verwiesen, in denen die einzelnen Anforderungen abgeleitet werden.

3.2.1 Funktion

Die Aufgabe des KQA besteht darin, den Fahrer beim sicheren Einbiegen/Kreuzen sowohl an Stadt- als auch an Überlandkreuzungen zu unterstützen. Eine Assistenz erfolgt nur im

⁴ Freyemann (2004): Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen S. 12.

wartepflichtigen Fahrzeug, da jener Fahrer bei der Unfallvermeidung unterstützt werden soll, der auch den primären potentiellen Fehler begeht. Die „Intelligenz“ des Assistenzsystems befindet sich im Fahrzeug. Das System ist somit nicht auf Infrastruktureinrichtungen angewiesen. Die Architektur des KQA wird trotzdem so angelegt, dass grundsätzlich auch die Möglichkeit gegeben ist, auf Informationen aus der Infrastruktur zurück zu greifen (siehe Kap. 3.3).

Um den wartepflichtigen Fahrer beim Einbiegen/Kreuzen zu unterstützen und die gesamte Phase der Kreuzungsannäherung zu nutzen, wird eine mehrstufige Assistenz verwendet:

1. Information über die Verkehrsregelung bei der Kreuzungsannäherung
2. Warnung vor einer potentiellen Kollision mit dem Querverkehr auf Grund einer Vorfahrtsmissachtung
3. Aktive Vollverzögerung, falls der wartepflichtige Fahrer auf die Warnung nicht reagiert

Durch die **situationsunabhängige Information** soll bereits in der frühen Annäherungsphase an die Kreuzung die Art der Verkehrsregelung verdeutlicht werden. Bei der Entwicklung des MMI ist zu beachten, dass hierbei potenziell eine redundante Information zur Fahrerwahrnehmung vorliegt, wobei in der frühen Annäherungsphase nicht beurteilt werden kann, ob der Fahrer die Verkehrsregelung bereits richtig interpretiert hat. Diese Information soll insbesondere jene Fahrer unterstützen, welche die Kreuzung noch nicht kennen und beispielsweise wegen eines Hindernisses, wie einem parkenden LKW, bis dicht vor die Kreuzung die Verkehrsregelung nicht erkennen können.

Durch die **situationsabhängige Warnung** soll der wartepflichtige Fahrer bei der Erkennung und Vermeidung von potentiellen Kollisionen mit dem Querverkehr unterstützt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die meisten kritischen Kreuzungssituationen bereits durch eine Verzögerung entschärft werden. Die Möglichkeit der Unfallvermeidung durch ein Ausweichmanöver wird daher nicht betrachtet.

Es wird gefordert, die Warnung einerseits so frühzeitig auszugeben, dass der Fahrer noch ausreichend Zeit hat, die kritische Kreuzungssituation selbst zu erkennen und so eine kollisionsvermeidende Handlung einzuleiten. Andererseits wird gefordert, den Warnzeitpunkt so spät zu wählen, dass der Fahrer bei einer konfliktfreien Kreuzungsannäherung keine Warnung erhält. Unter Warnzeitpunkt wird dabei der Zeitpunkt verstanden, zu dem die Warnung beginnt. Die Warnung darf nur erfolgen, wenn der Fahrer die Verkehrssituation offensichtlich falsch interpretiert und daher ein hohes Kollisionsrisiko mit einem vorfahrtsberechtigten Fahrzeug besteht. Bei der Auslegung des MMI ist es erforderlich davon auszugehen, dass der KQA nur sehr selten eine Warnung ausgibt und folglich kein Lerneffekt beim Fahrer zu erwarten ist. Das eingesetzte MMI soll dem Fahrer die Kritikalität der Kreuzungssituation und die Dringlichkeit einer adäquaten Reaktion verdeutlichen.

Bei verschiedenen bereits prototypisch realisierten Querverkehrsassistenzsystemen wird ein MMI verwendet, welches den Fahrer kontinuierlich über den aktuellen Zustand der Kreuzung informiert⁵ oder vor zu kleinen Lücken im Querverkehr warnt⁶ oder das aktuelle Kollisionsrisiko anzeigt⁷. In einer solchen kontinuierlichen Anzeige besteht u.U. der Vorteil

⁵ Suzuki/Benmimoun/Chen (2007): Development of an Intersection Assistant S. 97f.

⁶ Donath et al. (2007): Intersection Decision Support: An Overview - Final Report S. 17ff.

⁷ Fürstenberg et al. (2007): D40.75 Final Report S. 25f.

der Transparenz für den Fahrer. Jedoch haben Nutzeruntersuchungen von SUZUKI ET AL. ergeben, dass die Gefahr eines zu großen Vertrauens des Fahrers in das System besteht. Dadurch entsteht im Falle einer ausbleibenden Warnung möglicherweise eine kritische Situation. Daher wird beim KQA auf diese kontinuierliche Information verzichtet.

Durch die **aktive Vollverzögerung** soll der Fahrer dabei unterstützt werden, bereits vor dem point-of-no-return mit der kollisionsvermeidenden Bremsung zu beginnen. Als point-of-no-return wird jener Zeitpunkt bezeichnet, ab dem auf Grund der physikalisch begrenzten Verzögerung keine Möglichkeit mehr besteht, das Fahrzeug vor der Haltelinie zum Stehen zu bringen. Dies ist immer dann relevant, wenn der Fahrer auf die Warnung eine deutlich längere Reaktionszeit zeigt als die angenommene 1 s und somit erst nach dem point-of-no-return mit der Bremsung beginnen würde. Die aktive Vollverzögerung ist so auszulegen, dass der Fahrer die Möglichkeit hat sie zu übersteuern. Der Fahrer bleibt somit in der Regelschleife und der Verantwortung. Dies ist insbesondere in Hinblick auf Fehlwarnungen und Produkthaftung von Wichtigkeit.

Ein Sonderfall liegt vor, wenn der wartepflichtige Fahrer an der Haltelinie steht und potentiell die Vorfahrt durch Anfahren missachtet. Diese Thematik wurde im Projekt INTERSAFE ausführlich betrachtet. Als Lösung wurde ausgewählt, dass das Fahrzeug vom System am Anfahren gehindert wird, falls der wartepflichtige Fahrer versucht, in eine ungeeignete Lücke im Querverkehr einzufahren. Diese aktive Bremsung wurde von Probanden als sehr hilfreich angesehen, wenn das Hineintasten in eine Kreuzung zugelassen wird (siehe Kap. 2.2.2). Daher wird dieser Sonderfall im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht.

3.2.2 Technik

Aus technischer Sicht besteht die Aufgabe des KQA darin, bereits ab der frühen Phase der Kreuzungsannäherung mit der Beurteilung des Kreuzungsgeschehens und des Fahrerhaltens zu beginnen. Hierauf basierend wird das aktuelle Unfallrisiko zwischen dem Eigenfahrzeug und dem vorfahrtsberechtigten Querverkehr bestimmt.

Das Ergebnis der Beurteilung des Fahrerhaltens besteht in der Erkennung der Situationseinschätzung des wartepflichtigen Fahrers. Die Situationseinschätzung beinhaltet den Anhalte- sowie Abbiegewunsch. Diese Beurteilungen dienen als Eingangsgrößen bzw. Entscheidungsgrundlage für eine Unterstützung des Fahrers beim sicheren Einbiegen/Kreuzen.

Eine zusätzliche Aufgabe des KQA besteht in der Beurteilung der Kreuzungsparameter sowie der aktuellen Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Mess- und Zustandsgrößen. Diese Beurteilungen dienen als Entscheidungsgrundlage, ob eine für das Unfallgeschehen relevante Kreuzungsgeometrie vorliegt, und ob auf Grundlage der aktuellen Mess- und Zustandsdaten die Möglichkeit einer zuverlässigen Assistenz besteht.

Um das Kreuzungsgeschehen und das Fahrerverhalten bereits ab der frühen Phase der Kreuzungsannäherung beurteilen zu können, ist eine Erfassung der Positions- und Fahrodynamikdaten (Mess- und Zustandsdaten) des Eigenfahrzeugs und des Querverkehrs bereits in dieser Phase erforderlich. Für die Erfassung der Daten des Querverkehrs bieten sich autarke und kooperative Sensorik an (Kap. 2.2).

Kommunikationssystem: Beim KQA wird ausschließlich auf kooperative Sensorik zurückgegriffen, da diese mit ihrer hohen Reichweite, dem 360°-Erfassungsbereich und der Bereitstellung direkt im Fahrzeug gemessener Daten eine viel versprechende Grundlage für eine frühe Situationsinterpretation bildet. Die fahrzeugautarke Umfeldsensorik birgt

gerade in der frühen Phase der Kreuzungsannäherung den Nachteil, auf Grund von Sichtverdeckungen, z.B. parkenden Fahrzeugen, und der begrenzten Reichweite bei großen Öffnungswinkeln, keine zuverlässige Erfassung von Querverkehrsfahrzeugen zu ermöglichen. Die für die Funktion des KQA erforderliche Reichweite, Latenzzeit und Update-Rate wird in Kap. 5.1 aus Worst-Case-Betrachtungen abgeleitet.

Positionsbestimmungssystem: In jedem Fahrzeug ist ein System zur Bestimmung der absoluten Fahrzeugposition und -ausrichtung erforderlich. Um eine Kompatibilität dieser Daten zu ermöglichen, ist es notwendig, ein einheitliches Bezugssystem sowie eine globale Zeitbasis, z.B. die GPS-Zeit, zu wählen. Die maximal zulässige Abweichung der Position und Ausrichtung wird in Kap. 4.1 definiert.

Assistenzsystem: Auf Grundlage der Positions-, Ausrichtungs- und Fahrdynamikdaten der Fahrzeuge wird für jedes Fahrzeug eine Prädiktion der voraussichtlich befahrenen Trajektorie benötigt. Der räumliche und zeitliche Verlauf dieser Trajektorien stellt die Basis der Beurteilung des Unfallrisikos dar. Hierbei ist das instationäre Fahrverhalten des Fahrers bei der Kreuzungsannäherung zu berücksichtigen. Dieses erschwert die Beurteilung der Situationseinschätzung des Fahrers durch das Assistenzsystem, d.h. eine Verzögerung bei der Kreuzungsannäherung kann wegen des richtigen Erkennens einer Wartepflicht, aber auch aus anderen Gründen wie einem Abbiegewunsch, auftreten. Um das Fahrerverhalten richtig einzuschätzen, ist daher eine zusätzliche Analyse weiterer Fahrdynamikdaten des Fahrzeugs sowie weiterer Fahrervorgaben, z.B. Blinkerbetätigung, nötig.

Um Fehlwarnungen des KQA zu vermeiden, sind neben dem Fahrerverhalten zusätzlich eine Beurteilung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Mess- und Zustandsdaten sowie eine Überprüfung der Kreuzungsparameter erforderlich. Hierzu wird die aktuelle Genauigkeit mit den Mindestanforderungen (Kap. 4.1, 5.1, 6) sowie die Kreuzungsparameter mit denen der adressierten Kreuzungsszenarien (Kap. 3.1) verglichen. Liegen zu ungenaue Mess- und Zustandsdaten oder eine nicht adressierte Kreuzungsgeometrie vor, ist das Assistenzsystem temporär zu deaktivieren.

Digitale Karte: Für die Realisierung des KQA sind die fahrstreifengenaue Information über die Verkehrsregelung, die Position der Haltelinie sowie Ausrichtung, Krümmung und Schnittwinkel der Fahrbahnen erforderlich. Die Datenschärfe lässt sich deutlich verbessern, wenn die digitale Karte auch die Position der Haltelinien der Kreuzungen beinhaltet. Ist dies nicht der Fall, lässt sich diese näherungsweise aus den Kreuzungseckpunkten herleiten. Die Anforderungen an die digitale Karte werden in Kap. 4.1 und Kap. 4.4 definiert.

Mensch-Maschine-Interaktion (MMI): Besteht ein hohes Kollisionsrisiko und interpretiert der Fahrer die Kreuzungssituation offensichtlich falsch, ist der Fahrer zu unterstützen. Die Auslegung der Assistenz orientiert sich dabei an den Grundsätzen und Richtlinien nach ROESSLER ET AL.⁸

Auf Grundlage der definierten Anforderungen an die Funktion und die Technik des KQA wird im Folgenden die Architektur des KQA abgeleitet.

3.3 Systemarchitektur

Wie aus Abb. 3.5 ersichtlich, basiert die Architektur auf drei Teilsystemen:

1. System zur Generierung von Positions- und Fahrdynamikdaten (FD-Daten)

⁸ Rössler et al. (2005): D40.4 Requirements for Intersection Safety Applications S.54ff.

2. Kommunikationssystem

3. Assistenzsystem

Die Eingangsgrößen in das Assistenzsystem im Eigenfahrzeug sind die Positions- und Fahrdynamikdaten des Eigenfahrzeugs und der Fremdfahrzeuge. Die Informationen der Fahrzeuge werden über ein Kommunikationssystem übertragen. Die Funktion des Assistenzsystems im Eigenfahrzeug ist unabhängig davon, ob in den Fremdfahrzeugen Assistenzsysteme integriert sind oder nicht. Die Systeme zur Generierung der Positions- und Fahrdynamikdaten sind aber in allen relevanten Fahrzeugen erforderlich.

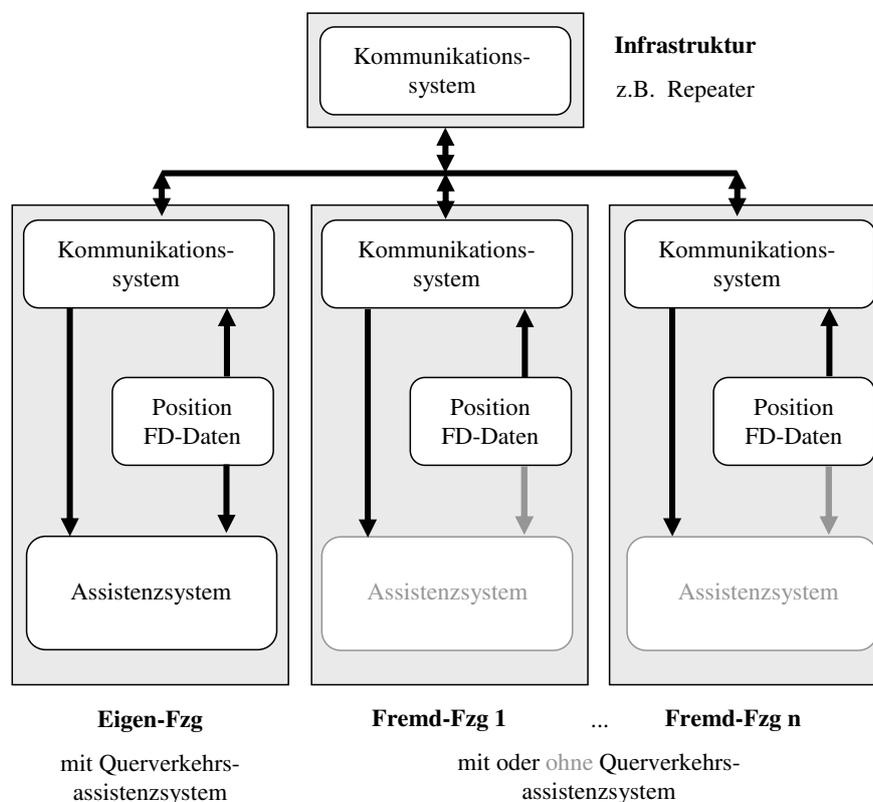


Abbildung 3.5: Architektur des KQA.

Die Übertragung der Daten erfolgt nach Möglichkeit direkt zwischen den Fahrzeugen. Sollte aber wegen einer für die Kommunikation unüberwindlichen Sichtbehinderung (siehe Kap. 5.2.2) keine direkte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen möglich sein, kann entweder ein anderes Fahrzeug oder eine Kommunikationseinheit in der Infrastruktur als Wiederholer („Repeater“) fungieren. Die Aufgabe des Repeaters besteht darin, die von den Fahrzeugen ausgesendete Information zu empfangen und nochmals auszusenden. Eine Positionierung des Repeaters in der Kreuzungsmitte bringt den Vorteil, dass die Information in alle Kreuzungsarme verbreitet wird und damit die Möglichkeit besteht Sichtbehinderungen zwischen den Fahrzeugen zu umgehen.

3.4 Fazit

Durch die Analyse des Unfallgeschehens wurden die für den KQA relevanten Kreuzungssituationen klassifiziert. Die vom KQA adressierte Kreuzung weist einen Schnittwinkel der Fahrbahnen zwischen 45° und 90° sowie keine oder nur eine schwache Krümmung der Fahrbahnen auf. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit bei Rechts-vor-Links-Kreuzungen liegt bei bis zu 50 km/h und an Vorfahrtachten-Kreuzungen bei bis zu 100 km/h . Die Fahrbahn besitzt einen oder mehrere Fahrstreifen.

Die Funktion des KQA besteht darin, durch eine mehrstufige Assistenz den wartepflichtigen Fahrer beim sicheren Einbiegen/Kreuzen zu unterstützen. Die Anforderungen an den KQA wurden auf Grundlage der jeweiligen Funktion abgeleitet. Das Grundkonzept des KQA basiert auf einem System zur Generierung der Positions- und Fahrdynamikdaten jedes Fahrzeugs, einem Kommunikationssystem sowie einem Assistenzsystem. Im Folgenden werden die Anforderungen an diese Teilsysteme, die gewählten Lösungsansätze und die jeweiligen Evaluierungsergebnisse vorgestellt.

4 Positionsbestimmung

Die Fahrzeugposition besteht aus den Positionskoordinaten in einem globalen Bezugssystem sowie der Ausrichtung gegenüber Norden. Im KQA werden die globalen Positionskoordinaten in fahrzeugbezogene Positionskoordinaten transformiert und für jedes Fahrzeug die künftige Trajektorie prädiziert sowie der Schnittpunkt der Trajektorien (SP) berechnet. Der Schnittwinkel α zwischen den Trajektorien entspricht der Differenz aus den Fahrzeugausrichtungen. Der Schnittpunkt ist der theoretische potentielle Kollisionspunkt, vorausgesetzt die Fahrzeuge werden als Punkte beschrieben, deren Positionen exakt bekannt sind. Unter Berücksichtigung der Fahrzeuglänge und -breite ergibt sich anstelle dieses Kollisionspunktes ein Kollisionsbereich, der so genannte kritische Bereich (siehe Abb. 4.1). Befinden sich die Mittelpunkte des vorfahrtsberechtigten (Fremd-Fzg) und des wartepflichtigen Fahrzeugs (Eigen-Fzg) gleichzeitig innerhalb dieses Bereiches, ereignet sich eine Kollision.

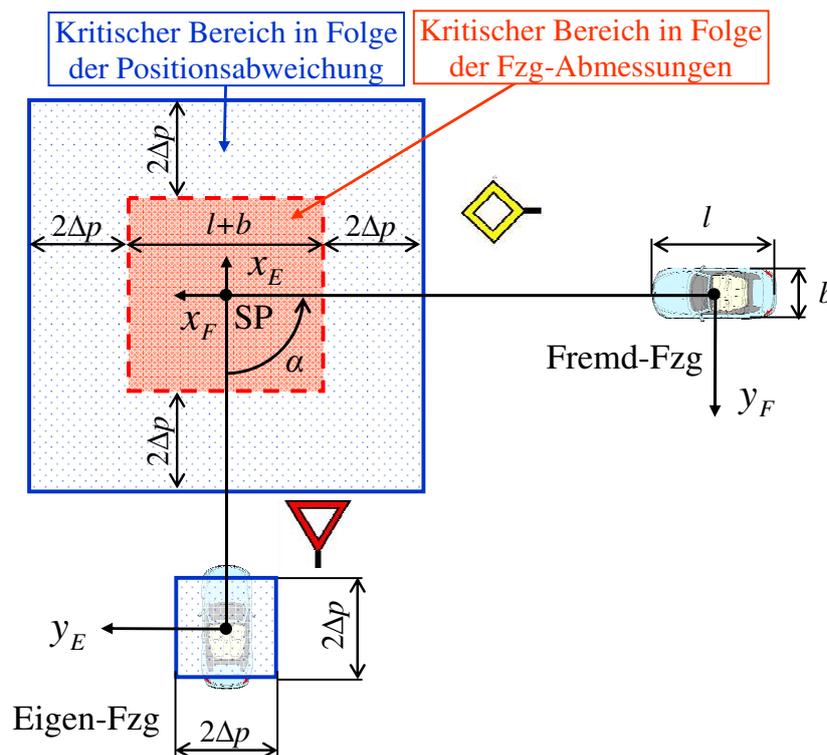


Abbildung 4.1: Der kritische Bereich ergibt sich aus den Fahrzeugabmessungen (l : Länge, b : Breite) und den messfehlerbedingten Positionsabweichungen (für beide Fahrzeuge mit Δp in die jeweilige x- und y-Richtungen als gleich groß definiert).

Die zur Bestimmung der Fahrzeugposition verwendeten Messdaten sind fehlerbehaftet. Bei der Kollisionsbetrachtung wird dies dadurch berücksichtigt, dass der kritische Bereich um die durch diese Fehler bedingten Positionsabweichungen Δp vergrößert wird.

Wie in Kap. 3.2.2 beschrieben, benötigt der KQA auch Daten aus einer digitalen Karte, z.B. um aus der absoluten Fahrzeugposition den Abstand zur Haltelinie zu ermitteln oder zur Stützung der Fahrzeugausrichtung bei der Trajektorienprädiktion.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Positionsbestimmung und die digitale Karte definiert. Das entwickelte Positionierungssystem sowie die Ergebnisse einer Analyse der Eigenschaften dieses Systems werden dargestellt.

4.1 Anforderungen des KQA

Die Anforderungen des KQA an das Positionierungssystem leiten sich aus der Berechnung der Warnentfernung und des Kollisionsrisikos ab. Die Warnentfernung entspricht jener Distanz zur Haltelinie, bei der es erforderlich ist, den wartepflichtigen Fahrer vor einer potentiellen Kollision zu warnen, damit er das Fahrzeug noch vor der Haltelinie bzw. dem kritischen Bereich zum Stehen bringen kann. Als Grundlage für die Berechnung des Kollisionsrisikos wird die Entfernung zwischen den Fahrzeugen und dem Schnittpunkt der Trajektorien berechnet.

Nachfolgend werden im Rahmen einer Worst-Case-Betrachtung die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit abgeleitet. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung der für die Funktion des KQA erforderlichen Mindestgeschwindigkeit der Fahrzeuge.

4.1.1 Zulässige Abweichungen bei der Berechnung des Kollisionsrisikos

Maximal zulässige Positionsabweichungen

Die Bestimmung der Entfernung zwischen den Fahrzeugen und dem Schnittpunkt der Trajektorien wird durch die Positionsabweichungen der Fahrzeuge in Folge der Positionsfehler (translatorisch) und Ausrichtungsfehler (rotatorisch) sowie durch die Latenzzeit bei der Kommunikation verfälscht. Eine Positionsverfälschung in Folge der Latenzzeit tritt dann auf, wenn sich während dieser Zeit die Fahrzeuggeschwindigkeit ändert.

Grundlage für die Berechnung der zulässigen Entfernungsabweichung und damit der maximal zulässigen Positionsabweichung stellt eine Zeitlückenbetrachtung dar. Bei dieser wird davon ausgegangen, dass sich beide Fahrzeuge mit konstanten Geschwindigkeiten an die Kreuzung annähern und der wartepflichtige Fahrer zum sicheren Einbiegen/Kreuzen eine bestimmte Zeitlücke t_{Luecke} zum vorfahrtsberechtigten Fahrzeug lässt und daher auch akzeptiert. Fahrerverhaltensuntersuchungen im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts INVENT haben gezeigt, dass diese Zeitlücke bei Annäherungen ohne Stopp an der Haltelinie bei mindestens 4 s liegt.¹

Der KQA verwendet diese Zeitlücke als zeitlichen Sicherheitsabstand, der bei den maximal auftretenden Positionsabweichungen gerade aufgebraucht wird. Wird dieser Sicherheitsabstand unterschritten, dann besteht Kollisionsgefahr und im wartepflichtigen Fahrzeug erfolgt eine Warnung. Dann existiert nämlich die Möglichkeit, dass das Eigenfahrzeug bereits in die Kreuzung einfährt, wenn das Fremdfahrzeug diese noch nicht verlassen hat, oder umgekehrt. Bei vorgegebener Zeitlücke lassen sich die maximal zulässigen Positions-

¹ Scheuchenpflug et al. (2004): FVM AP 1400 Abschlussbericht.

abweichungen berechnen. Der Rechengang ist aus Abb. 4.2 ersichtlich. Es gelten folgende Randbedingungen:

- Beide Fahrzeuge nähern sich der Kreuzung mit konstanter Geschwindigkeit v_E, v_F an.
- Die maximal zulässigen Positionsabweichungen Δp der Fahrzeuge werden für beide Fahrzeuge als gleich groß definiert.
- Die Fahrzeuglängen und -breiten brauchen bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden, weil sie keinen Einfluss auf die Positionsabweichung haben. Die Fahrzeuge werden daher als Punkte betrachtet. In Folge dieser Positionsabweichung befindet sich die eigentliche Fahrzeugposition innerhalb eines Quadrats mit der Seitenlänge $2\Delta p$. Der kritische Bereich ist ein Quadrat mit $4\Delta p$.

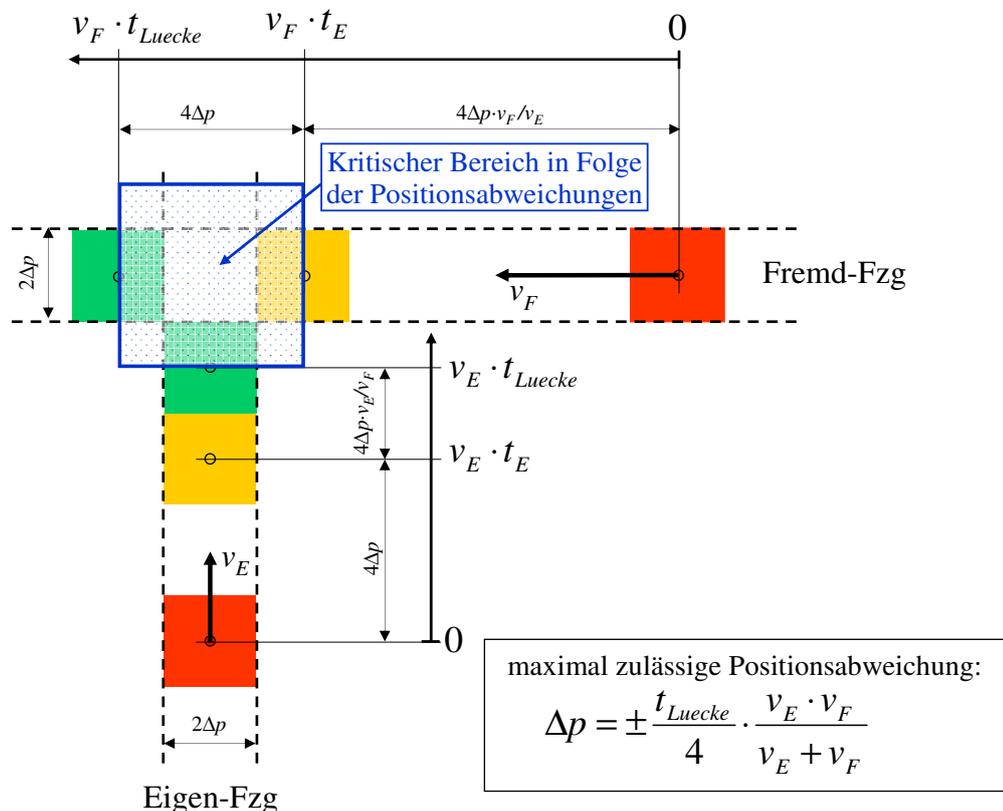


Abbildung 4.2: Fahrzeugpositionen zu den Zeitpunkten 0, t_E und t_{Luecke} bei aufgebrauchtem Sicherheitsabstand (Sicherheitsabstand = Zeitlücke).

In Abb. 4.2 sind die Positionen der beiden Fahrzeuge für die drei Zeitpunkte 0, t_E und $t_{Luecke} = t_E + t_F$ dargestellt. Zum Zeitpunkt 0 hat das Fremdfahrzeug den Zeitabstand t_{Luecke} bis zum Verlassen des kritischen Bereiches, und das Eigenfahrzeug den Zeitabstand t_{Luecke} bis zum Erreichen des kritischen Bereiches. Hätte das Eigenfahrzeug einen etwas kürzeren Abstand, könnte es zu einer Kollision kommen, da sich das Fremdfahrzeug dann bei entsprechendem Positionsfehler noch im kritischen Bereich befindet. Der Zeitabstand

t_{Luecke} markiert hier also den Übergangsbereich zwischen „mögliche Kollision“ und „sicher keine Kollision“.

Zum Zeitpunkt t_E erreicht das Fremdfahrzeug gerade den kritischen Bereich. Das Eigenfahrzeug hat dann die Länge des kritischen Bereichs, also $4\Delta p$, zurückgelegt. Wäre die zurückgelegte Strecke $> 4\Delta p$, dann hätte es den kritischen Bereich ohne Kollisionsgefahr passieren können, vorausgesetzt es hätte zum Zeitpunkt 0 den kritischen Bereich bereits erreicht gehabt. Die Wegstrecke $4\Delta p$ des Eigenfahrzeugs entspricht also genau dem Grenzfall, ab dem das Fremdfahrzeug vor dem Eigenfahrzeug in den kritischen Bereich einfährt. Für t_E gilt daher:

$$t_E = \frac{4 \cdot \Delta p}{v_E} \quad (4.1)$$

Zum Zeitpunkt t_{Luecke} erreicht das Eigenfahrzeug den kritischen Bereich und das Fremdfahrzeug verlässt ihn. Für die Zeit t_F , die das Fremdfahrzeug zum Durchfahren des kritischen Bereichs braucht, gilt:

$$t_F = \frac{4 \cdot \Delta p}{v_F} \quad (4.2)$$

Für die Zeitlücke ergibt sich daraus:

$$t_{Luecke} = t_E + t_F = 4 \cdot \Delta p \cdot \frac{v_E + v_F}{v_E \cdot v_F} \quad (4.3)$$

Daraus ergibt sich für die maximal zulässige Positionsabweichung:

$$\Delta p = \pm \frac{t_{Luecke}}{4} \cdot \frac{v_E \cdot v_F}{v_E + v_F} \quad (4.4)$$

Für eine Zeitlücke von 4 s mit Δp in m und v_E, v_F in m/s lautet (4.4):

$$\Delta p = \pm 1 \text{ s} \cdot \frac{v_E \cdot v_F}{v_E + v_F} \quad (4.5)$$

In Tab. 4.1 wird für verschiedene Geschwindigkeiten v_E und v_F die maximal zulässige Positionsabweichung Δp bei einer angenommenen Zeitlücke von 4 s angegeben.

Tabelle 4.1: Maximal zulässige Positionsabweichungen der Fahrzeuge in Abhängigkeit von deren Geschwindigkeiten bei einer Zeitlücke von 4 s.

Δp [m]								
$v_E \downarrow$ [m/s] $v_F \rightarrow$	7,5	10	12,5	15	17,5	20	25	30
7,5	3,8	4,3	4,7	5	5,3	5,5	5,8	6,0
10	4,3	5	5,6	6	6,4	6,7	7,1	7,5
12,5	4,7	5,6	6,3	6,8	7,3	7,7	8,3	8,8
15	5	6	6,8	7,5	8,1	8,6	9,4	10
17,5	5,3	6,4	7,3	8,1	8,8	9,3	10,3	11,1
20	5,5	6,7	7,7	8,6	9,3	10	11,1	12
25	5,8	7,1	8,3	9,4	10,3	11,1	12,5	13,6
30	6	7,5	8,8	10	11,1	12	13,6	15

Bei v_E und v_F jeweils gleich 30 m/s liegt die maximal zulässige Positionsabweichung bei $\pm 15 \text{ m}$ ($\hat{=} \pm 3\sigma$), bei 10 m/s bei $\pm 5 \text{ m}$. Es ist erforderlich, die Entfernung umso genauer zu bestimmen, je niedriger die Geschwindigkeit ist. Der Grund hierfür besteht darin, dass bei einer fest angenommenen Zeitlücke mit sinkender Geschwindigkeit der zurückgelegte Weg abnimmt.

Resultierende Längsrichtungsfehler und deren Komponenten

Die durch Positions- und Ausrichtungsfehler sowie durch die Latenzzeit bedingten Positionsabweichungen führen letztlich zu Entfernungsfehlern zwischen den Fahrzeugen und dem Schnittpunkt ihrer Trajektorien. Die Summe dieser Entfernungsfelder, bezogen auf das jeweilige Fahrzeug, wird im Folgenden als resultierender Längsrichtungsfehler bezeichnet.

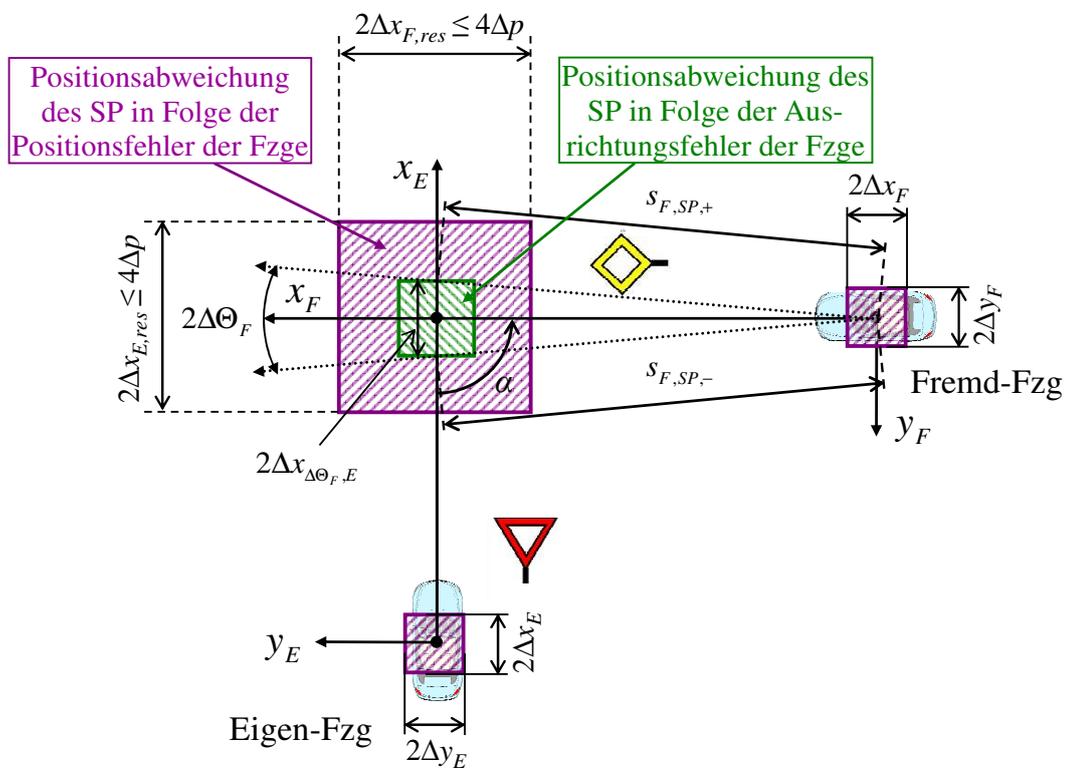


Abbildung 4.3: Einfluss der resultierenden Längsrichtungsfehler (ohne Einfluss der Latenzzeit) auf die Position des Trajektorienschnittpunktes.

Er setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Diese werden einfach addiert, wenn die Trajektorien der Fahrzeuge keine Krümmung aufweisen. So wird, wie aus Abb. 4.3 ersichtlich, bei einem Schnittwinkel der Trajektorien α gleich 90° der Querrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs Δy_F direkt zum Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs Δx_E addiert. Bei anderen Schnittwinkeln wird der Längs- und Querrichtungsfehler (Δx_F und Δy_F) des Fremdfahrzeugs anteilig ($\Delta x_{\Delta x_F, E}$ und $\Delta x_{\Delta y_F, E}$) zum Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs addiert. Durch die Latenzzeit bei der Kommunikation entsteht ein zusätzlicher Längsrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs $\Delta x_{F, Lat}$, welcher ebenfalls anteilig als $\Delta x_{\Delta x_{F, Lat}, E}$ addiert wird. Auf diesen Fehler wird in Kap. 5.1 noch genauer eingegangen.

Neben den Positionsfehlern der beiden Fahrzeuge kann auch der Ausrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs $\Delta\Theta_F$ in einen Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs $\Delta x_{\Delta\Theta_F,E}$ umgerechnet werden. Der resultierende Längsrichtungsfehler $\Delta x_{E,res}$ des Eigenfahrzeugs errechnet sich damit zu:

$$\Delta x_{E,res} = \Delta x_E + \Delta x_{\Delta x_F,E} + \Delta x_{\Delta x_F,Lat,E} + \Delta x_{\Delta y_F,E} + \Delta x_{\Delta\Theta_F,E} \quad (4.6)$$

Für den resultierenden Längsrichtungsfehler $\Delta x_{F,res}$ des Fremdfahrzeugs gilt analog:

$$\Delta x_{F,res} = \Delta x_F + \Delta x_{\Delta x_E,F} + \Delta x_{F,Lat} + \Delta x_{\Delta y_E,F} + \Delta x_{\Delta\Theta_E,F} \quad (4.7)$$

Diese resultierenden Längsrichtungsfehler beinhalten somit auch den lateralen Positionsfehler und Ausrichtungsfehler des anderen Fahrzeugs. Wie aus Abb. 4.3 ersichtlich, entsteht in Folge der Längsrichtungsfehler um den theoretischen Trajektorienschnittpunkt ein Rechteck. Der tatsächliche Trajektorienschnittpunkt kann an jeder Stelle dieses Rechtecks liegen. Um die aus der Zeitlückenbetrachtung resultierende maximal zulässige Positionsabweichung einzuhalten, darf dieses Rechteck nicht größer sein als das Quadrat mit der Seitenlänge $4\Delta p$. Die Bedingungen für den zulässigen resultierenden Längsrichtungsfehler lauten damit $\Delta x_{E,res} \leq 2\Delta p$ und $\Delta x_{F,res} \leq 2\Delta p$.

Die Anteile des Längs- und Querrichtungsfehlers berechnen sich nach:

$$\Delta x_{\Delta x_F,E} = \Delta x_F \cdot |\cos \alpha| \quad (4.8)$$

$$\Delta x_{\Delta y_F,E} = \Delta y_F \cdot |\sin \alpha| \quad (4.9)$$

Der Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs auf Grund des Ausrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs ist in x_E -Richtung nur bei einem Schnittwinkel α der Fahrbahnen von 90° bzw. 270° symmetrisch. Allgemein berechnen sich die Anteile nach:

$$\Delta x_{\Delta\Theta_F,E,-} = \sqrt{s_{F,SP,-}^2 + s_{F,SP}^2 - 2 \cdot s_{F,SP,-} \cdot s_{F,SP} \cdot \cos(\Delta\Theta_F)} \quad (4.10)$$

$$\Delta x_{\Delta\Theta_F,E,+} = \sqrt{s_{F,SP}^2 + s_{F,SP,+}^2 - 2 \cdot s_{F,SP} \cdot s_{F,SP,+} \cdot \cos(\Delta\Theta_F)} \quad (4.11)$$

Die Strecken $s_{F,SP,-}$ und $s_{F,SP,+}$ berechnen sich nach:

$$s_{F,SP,-} = \frac{s_{F,SP} \cdot \sin \alpha}{\sin(180^\circ - (\alpha + \Delta\Theta_F))} \quad (4.12)$$

$$s_{F,SP,+} = \frac{s_{F,SP} \cdot \sin(180^\circ - \alpha)}{\sin(\alpha - \Delta\Theta_F)} \quad (4.13)$$

In gleicher Weise lassen sich anteilig der Längs- und Querrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs und der Ausrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs in einen resultierenden Längsrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs umrechnen. Aus den Gleichungen 4.10 und 4.11 ist ersichtlich, dass sich der Ausrichtungsfehler umso geringer auswirkt, je näher sich das Fahrzeug an der Kreuzung befindet. In Abb. 4.4 wird beispielhaft die Auswirkung des Ausrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs $\Delta\Theta_F$ zwischen 0 und 5° auf den Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs $\Delta x_{\Delta\Theta_F}$ bei den Abständen des Fremdfahrzeugs zum Schnittpunkt der Trajektorien $s_{F,SP}$ von 0 bis 150 m dargestellt. Bei einem Ausrichtungsfehler von ± 1 bzw. $\pm 5^\circ$ und einem Abstand von 50 m liegt der Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs bei $\pm 0,9$ bzw. $\pm 4,4$ m. Bei einem Abstand von 150 m liegt dieser bei $\pm 2,7$ bzw. $\pm 13,2$ m.

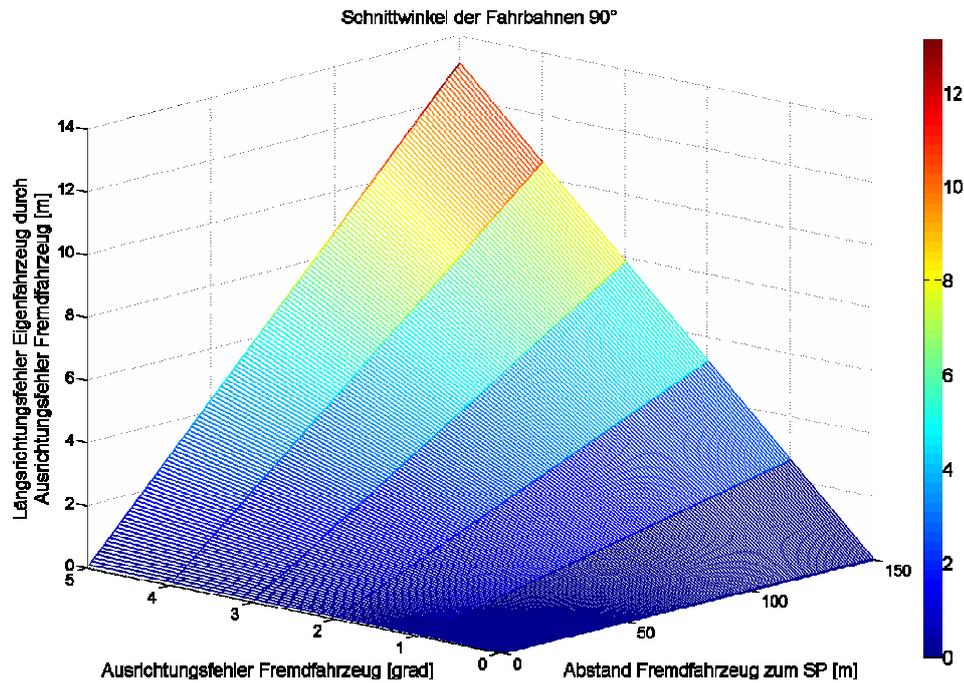


Abbildung 4.4: Auswirkung des Ausrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs $\Delta\Theta_F$ auf den Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs $\Delta x_{\Delta\Theta_F}$ in Abhängigkeit vom Abstand zur Kreuzung $s_{F,SP}$.

Zulässiger Positionsfehler, Latenzzeit und Mindestgeschwindigkeit

Die Fahrzeugposition wird auf Grundlage der Daten eines DGPS-Empfängers bestimmt. Stillstandsmessungen² mit einem DGPS-Empfänger zeigen, dass damit die Fahrzeugposition mit einer Abweichung kleiner gleich $\pm 3\text{ m}$ ($\hat{=} \pm 3\sigma$) bestimmt werden kann. Daher wird als Anforderung für den zulässigen Positionsfehler $\pm 3\text{ m}$ festgelegt. Der Ausrichtungsfehler wird zunächst mit $\pm 2,5^\circ$ angenommen. Eine genauere Festlegung des zulässigen Ausrichtungsfehlers erfolgt im nachfolgenden Unterkapitel „zulässiger Ausrichtungsfehler“.

Als weitere Anforderung gilt, dass die Auswirkung der Latenzzeit auf den resultierenden Längsrichtungsfehler vernachlässigbar klein ist. Das bedeutet, dass eine Maßnahme gefunden werden muss, die Auswirkung der Latenzzeit auf den resultierenden Längsrichtungsfehler zu kompensieren.

Auf Grundlage dieser Annahmen wird eine Mindestgeschwindigkeit für die Bestimmung des Kollisionsrisikos abgeleitet. Unter der Annahme, dass bei der sich ergebenden Mindestgeschwindigkeit der Anhalteweg nicht über 40 m liegt, ergibt sich nach Gleichung 4.10 und 4.11 als Beitrag des Ausrichtungsfehlers zum resultierenden Längsrichtungsfehler $\pm 2\text{ m}$.

Zusammen mit dem zulässigen Positionsfehler von $\pm 3\text{ m}$ ergibt sich für den zulässigen Längsrichtungsfehler $\pm 5\text{ m}$. Nach Tab. 4.1 beträgt so die Mindestgeschwindigkeit für beide Fahrzeuge 10 m/s . Für niedrigere Mindestgeschwindigkeiten ist es erforderlich, die Entfernung zum kritischen Bereich genauer zu bestimmen. Dies kann beispielsweise auf

² Klanner (2004): Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistenz.

Grundlage fahrzeugautarker Sensoren erfolgen, wird aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Die endgültigen Anforderungen an den zulässigen Ausrichtungsfehler sowie an die digitale Karte werden im Folgenden auf Grundlage verschiedener Worst-Case-Szenarien bestimmt.

Zulässiger Ausrichtungsfehler

Die Auswirkung des Ausrichtungsfehlers auf den resultierenden Längsrichtungsfehler des anderen Fahrzeugs nimmt mit steigender Entfernung von der Kreuzung zu. Auf der anderen Seite steigt die Anforderung an die Ausrichtungsgenauigkeit mit abnehmender Geschwindigkeit. Hieraus leiten sich drei mögliche Worst-Case-Szenarien ab:

1. Szenario: Bei maximaler Entfernung des Eigenfahrzeugs zum SP, ab der eine Interpretation des Kreuzungsgeschehens erforderlich ist, nähert sich das Fremdfahrzeug mit Mindestgeschwindigkeit.
2. Szenario: Bei maximaler Entfernung des Eigenfahrzeugs zum SP, ab der eine Interpretation des Kreuzungsgeschehens erforderlich ist, und bei maximaler Entfernung des Fremdfahrzeugs, bei der es für diese Interpretation bereits relevant ist, nähern sich beide Fahrzeuge mit gleicher Geschwindigkeit.
3. Szenario: Bei maximaler Entfernung des Fremdfahrzeugs zum SP, bei der es für die Situationsinterpretation im Eigenfahrzeug bereits relevant ist, nähert sich das Eigenfahrzeug mit Mindestgeschwindigkeit an.

Bei den nachfolgenden Betrachtungen wird von konstanten Geschwindigkeiten beider Fahrzeuge ausgegangen.

Erstes Szenario

Die maximale Entfernung $s_{Sitint,Start,SP}$ des Eigenfahrzeugs, ab der eine Situationsinterpretation erforderlich ist, leitet sich aus der Anforderung ab, dass der wartepflichtige Fahrer so frühzeitig gewarnt werden soll, dass er noch ausreichend Zeit hat nach einer Warnung das Fahrzeug noch vor der Haltelinie zum Stehen zu bringen (siehe Kap. 3.2.1). Die Komponenten dieser Entfernung werden in Abb. 4.5 dargestellt: Sie setzt sich zusammen aus dem Weg $s_{Vorlauf}$, den das Eigenfahrzeug während der Zeit $t_{Vorlauf}$ zwischen dem Start der Situationsinterpretation und dem Warnzeitpunkt zurücklegt, dem Anhalteweg s_{Anh} nach einer Warnung, der halben Fahrzeuglänge $l/2$ sowie dem Abstand zwischen der Haltelinie und dem Schnittpunkt der Trajektorien $s_{H,SP}$.

Während $t_{Vorlauf}$ wird durch den KQA die Kreuzungssituation interpretiert und die Grundlage für eine mögliche Warnung gelegt. Zur Berechnung des Anhalteweges wird von einer Reaktionszeit $t_{reak} = 1$ s sowie einer Bremsverzögerung durch den Fahrer $a_{x,FA,norm} = -6$ m/s² ausgegangen. Zusätzlich wird während der Reaktionszeit durch den KQA eine haptische Anbremsung $a_{x,hap} = -3$ m/s² vorgenommen. Hierauf wird in Kap. 6.4 noch genauer eingegangen. Die Berücksichtigung von $l/2$ ist erforderlich, da die Fahrzeugposition in der Mitte des Fahrzeugs bestimmt wird. Der Abstand $s_{H,SP}$ berechnet sich aus der Anzahl n_{FS} der Fahrstreifen zwischen der Haltelinie und dem Trajektorienschnittpunkt.

$$s_{Sitint,Start,SP} = s_{Vorlauf} + s_{Anh} + l/2 + s_{H,SP} \quad (4.14)$$

$$s_{Vorlauf} = v_{x,E,0} \cdot t_{Vorlauf} \quad (4.15)$$

$$s_{Anh} = \frac{(v_{x,E,0} + a_{x,hap} \cdot t_{reak})^2}{-2 \cdot a_{x,FA,norm}} + \frac{1}{2} \cdot a_{x,hap} \cdot t_{reak}^2 + v_{x,E,0} \cdot t_{reak} \quad (4.16)$$

$$s_{H,SP} = (n_{FS} - \frac{1}{2}) \cdot b_{FS} \quad (4.17)$$

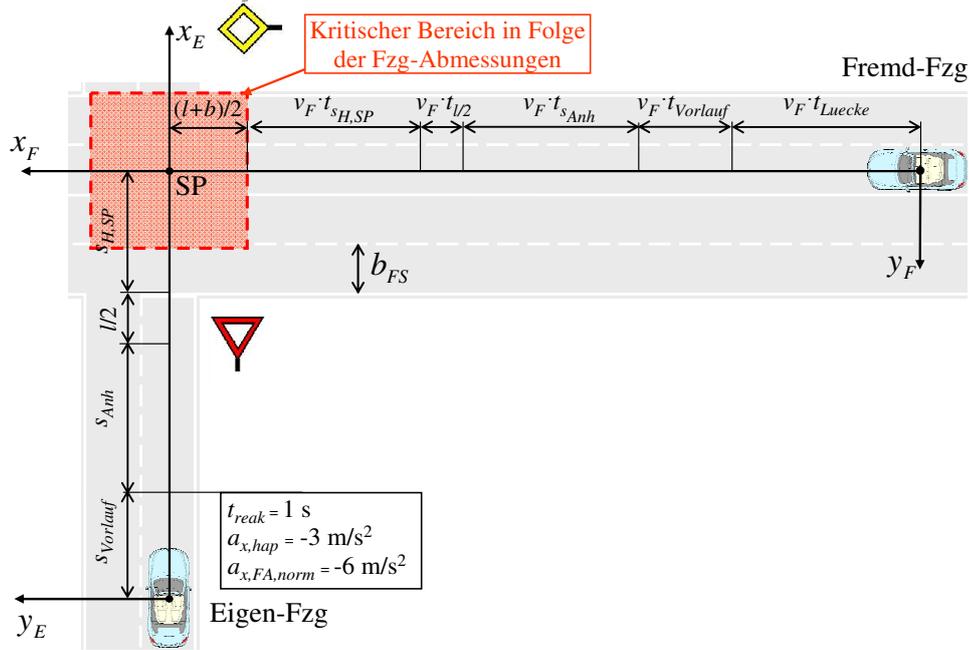


Abbildung 4.5: Zu berücksichtigende Entfernungsanteile zur Berechnung der maximalen Entfernung zwischen dem Eigenfahrzeug bzw. dem Fremdfahrzeug und dem SP, ab der es für eine zuverlässige Funktion des KQA erforderlich ist, mit der Situationsinterpretation zu beginnen bzw. das Fremdfahrzeug für diese Interpretation eine Relevanz besitzt.

b_{FS} ist die Breite eines Fahrstreifens. Für eine angenommene Eigenfahrzeuggeschwindigkeit $v_{x,E,0}$ von 10 bzw. 30 m/s, einen Systemvorlauf von $t_{Vorlauf}$ gleich 2 s, einer Fahrzeuglänge von 5 m, einer zu überquerenden Anzahl von 3 Fahrstreifen sowie einer Fahrstreifenbreite von 3 m beträgt die Entfernung $s_{Sitint,Start,SP}$ gleich 44 bzw. 160 m. Unter der Annahme eines Ausrichtungsfehlers eines DGPS-Empfängers von $\pm 5^\circ$ (siehe Kap. 4.3) ergibt sich nach den Gleichungen 4.10 und 4.11 bei einem Schnittwinkel der Fahrbahnen von 90° ein Längsrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs durch den Ausrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs von ± 4 bzw. ± 14 m. Unter der Annahme, dass das Fremdfahrzeug mit der Mindestgeschwindigkeit $v_{x,min}$ gleich 10 m/s fährt, ergibt sich nach Tab. 4.1 eine zulässige Abweichung der Entfernung zwischen den Fahrzeugen und dem Schnittpunkt der Trajektorien $2\Delta p$ von ± 10 bzw. ± 15 m. Unter der Annahme eines Positionsfehlers beider Fahrzeuge von jeweils ± 3 m ergibt sich nach Gleichung 4.6 ein gesamter Längsrichtungsfehler für das Fremdfahrzeug $\Delta x_{F,res}$ von ± 10 bzw. ± 20 m. Unter den getroffenen Annahmen ist somit

für $v_{x,E,0}$ gleich 10 m/s die zulässige Abweichung des resultierenden Längsrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs eingehalten und für $v_{x,E,0}$ gleich 30 m/s nicht eingehalten.

Der zulässige Anteil des Längsrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs $\Delta x_{\Delta\Theta_E,F}$ durch den Ausrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs $\Delta\Theta_E$ errechnet sich nach den Gleichungen 4.10 und 4.11. Für α gleich 90° vereinfacht sich die Berechnung zu:

$$\Delta x_{\Delta\Theta_E,F} = s_{E,SP} \cdot \tan \Delta\Theta_E \quad (4.18)$$

Zur Berechnung des zulässigen Ausrichtungsfehlers des Eigenfahrzeugs wird für $\Delta x_{\Delta\Theta_E,F}$ die Differenz aus dem zulässigen Längsrichtungsfehler $2\Delta p$ und der Summe aus den angenommenen Positionsfehlern in Längsrichtung des Fremdfahrzeugs Δx_F und Querrichtung des Eigenfahrzeugs $\Delta x_{\Delta y_{E,F}}$ (analog Gleichung 4.6) eingesetzt. Für $s_{E,SP}$ wird $s_{Sitint,Start,SP}$ eingesetzt. Damit errechnet sich $\Delta\Theta_E$ zu:

$$\Delta\Theta_E = \arctan \left(\frac{2\Delta p - (\Delta x_F + \Delta x_{\Delta y_{E,F}})}{s_{Sitint,Start,SP}} \right) \quad (4.19)$$

Demnach darf bei $v_{x,E,0}$ gleich 30 m/s und $v_{x,F,0}$ gleich 10 m/s der zulässige resultierende Längsrichtungsfehler in Folge der Ausrichtungsabweichung des Eigenfahrzeugs maximal $\pm 9 \text{ m}$ betragen. Dies entspricht einer zulässigen Ausrichtungsabweichung von $\pm 3,2^\circ$ ($\hat{=} \pm 3\sigma$).

Zweites Szenario

Die maximale Entfernung des Eigenfahrzeugs entspricht der aus dem ersten Szenario. Die maximale Entfernung $s_{t_{Luecke},SP}$ des Fremdfahrzeugs leitet sich aus dem Sachverhalt ab, dass es bereits für die Situationsinterpretation des Eigenfahrzeugs von Relevanz ist. Diese Relevanz ist gegeben, wenn sich beide Fahrzeuge voraussichtlich gleichzeitig innerhalb des kritischen Bereichs aufhalten werden. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Entfernung des Fremdfahrzeugs zum Trajektorienschnittpunkt (SP) und der Entfernung des Eigenfahrzeugs zum SP. In Abb. 4.5 werden die Komponenten dieser Entfernung dargestellt. Zu diesen zählt der Weg, den das Fremdfahrzeug während der Zeit zurücklegt, die das Eigenfahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit vom Start der Situationsinterpretation bis zum Erreichen des Trajektorienschnittpunktes benötigt. Da das Fremdfahrzeug u.U. erst nach dem Eigenfahrzeug die Kreuzung erreicht, ist zusätzlich der Weg, den das Fremdfahrzeug während der Zeitlücke t_{Luecke} zurücklegt, und die Hälfte des kritischen Bereiches in Folge der Fahrzeugabmessungen zu berücksichtigen.

$$s_{t_{Luecke},SP} = v_{x,F,0} \cdot (t_{Vorlauf} + t_{s_{Anh}} + t_{l/2} + t_{s_{H,SP}}) + v_{x,F,0} \cdot t_{Luecke} + (l + b)/2 \quad (4.20)$$

$$t_{s_{Anh}} = \frac{s_{Anh}}{v_{x,E,0}} \quad (4.21)$$

$$t_{l/2} = \frac{l}{2v_{x,E,0}} \quad (4.22)$$

$$t_{s_{H,SP}} = \frac{s_{H,SP}}{v_{x,E,0}} \quad (4.23)$$

Unter der Annahme einer Fahrzeugbreite $b = 2 \text{ m}$, einer Fahrzeuglänge $l = 5 \text{ m}$, einer Geschwindigkeit des Fremdfahrzeugs $v_{x,F,0}$ von 10 bzw. 30 m/s und der gleichen Geschwindigkeit des Eigenfahrzeugs $v_{x,E,0}$ von 10 bzw. 30 m/s ergibt sich eine Entfernung $s_{t_{Luecke},SP}$

von 84 bzw. 280 m. Der entsprechende Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs $\Delta x_{\Delta\Theta_F,E}$ durch den Ausrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs von $\pm 5^\circ$ errechnet sich nach den Gleichungen 4.10 und 4.11 zu ± 8 bzw. ± 25 m. Nach Tab. 4.1 ergibt sich eine maximal zulässige Abweichung von $2\Delta p$ von ± 10 bzw. ± 30 m. Unter der Annahme eines Positionsfehlers beider Fahrzeuge von ± 3 m ergibt sich nach Gleichung 4.6 ein gesamter Längsrichtungsfehler für das Eigenfahrzeug $\Delta x_{E,res}$ von ± 14 bzw. ± 31 m. Somit sind für beide $v_{x,F,0}$ die Anforderungen an den zulässigen resultierenden Längsrichtungsfehler nicht erfüllt.

Der zulässige Ausrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs wird analog Gleichung 4.18 berechnet:

$$\Delta x_{\Delta\Theta_F,E} = s_{F,SP} \cdot \tan \Delta\Theta_F \quad (4.24)$$

Für $\Delta x_{\Delta\Theta_F,E}$ wird die Differenz aus dem zulässigen Längsrichtungsfehler $2\Delta p$ und der Summe aus den angenommenen Positionsfehlern in Längsrichtung des Eigenfahrzeugs Δx_E und Querrichtung des Fremdfahrzeugs $\Delta x_{\Delta y_{F,E}}$ eingesetzt. Für $s_{F,SP}$ wird $s_{t_{Luecke,SP}}$ eingesetzt. Damit errechnet sich $\Delta\Theta_F$ zu:

$$\Delta\Theta_F = \arctan \left(\frac{2\Delta p - (\Delta x_E + \Delta x_{\Delta y_{F,E}})}{s_{t_{Luecke,SP}}} \right) \quad (4.25)$$

Demnach darf bei $v_{x,E,0}$ und $v_{x,F,0}$ von jeweils 10 m/s bzw. 30 m/s der zulässige resultierende Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs in Folge der Ausrichtungsabweichung des Fremdfahrzeugs maximal ± 4 bzw. ± 24 m betragen. Dies entspricht einer zulässigen Ausrichtungsabweichung von $\pm 2,7$ bzw. $\pm 4,8^\circ$ ($\cong \pm 3\sigma$).

Drittes Szenario

Unter der Annahme einer Geschwindigkeit des Fremdfahrzeugs $v_{x,F,0}$ von 30 m/s und der Mindestgeschwindigkeit des Eigenfahrzeugs $v_{x,E,0}$ von 10 m/s ergibt sich eine Entfernung $s_{t_{Luecke,SP}}$ von 250 m. Der entsprechende Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs $\Delta x_{\Delta\Theta_F,E}$ durch den Ausrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs von $\pm 5^\circ$ errechnet sich nach den Gleichungen 4.10 und 4.11 zu ± 22 m. Nach Tab. 4.1 ergibt sich eine maximal zulässige Abweichung $2\Delta p$ von ± 15 m. Unter der Annahme eines Positionsfehlers beider Fahrzeuge von ± 3 m ergibt sich nach Gleichung 4.6 ein gesamter Längsrichtungsfehler für das Eigenfahrzeug $\Delta x_{E,res}$ von ± 28 m. Somit ist die Anforderung an den zulässigen resultierenden Längsrichtungsfehler nicht erfüllt.

Analog zum zweiten Szenario errechnet sich der maximal zulässige resultierende Längsrichtungsfehler in Folge der Ausrichtungsabweichung des Fremdfahrzeugs zu ± 9 m. Dies entspricht einer zulässigen Ausrichtungsabweichung des Fremdfahrzeugs von $\pm 2,0^\circ$ ($\cong \pm 3\sigma$). Es ist erforderlich, dass diese $\pm 2,0^\circ$ durch das verwendete Positionierungssystem gewährleistet werden.

Digitale Karte

Kann die geforderte zulässige Ausrichtungsabweichung durch das verwendete Positionierungssystem nicht gewährleistet werden, wird die Verwendung einer digitalen Karte gefordert. Aus dieser wird entweder

- die Ausrichtung der Fahrbahnen der Haupt- und Nebenstraße
- oder die Position der Kreuzungseckpunkte

entnommen. Die Ausrichtung der Fahrbahnen darf maximal $\pm 2,0^\circ$ von der tatsächlichen Ausrichtung gegenüber Nord abweichen. Auf Grundlage dieser Information wird es ermöglicht, die Richtung der prädizierten Trajektorie zu stützen. Damit wird der resultierende Längsrichtungsfehler auf Grund der Ausrichtungsabweichung auf das geforderte Maß begrenzt. Diese Stützung bietet zusätzlich den Vorteil, die Zuverlässigkeit der Trajektorienprädiktion zu erhöhen. Starke Ausrichtungsänderungen des Fahrzeugs gegenüber der Ausrichtung der Fahrbahn, z.B. in Folge eines Ausweichmanövers, können erkannt und bei der Trajektorienprädiktion mit berücksichtigt werden.

Die Eckpunkte der Kreuzung sind dadurch gekennzeichnet, dass durch sie die Begrenzungslinien der Haupt- und Nebenstraße wiedergegeben werden (siehe Abb. 4.6). Kommt das wartepflichtige Fahrzeug vor dieser Linie zum Stehen, hat es die Hauptstraße noch nicht erreicht und befindet sich damit noch nicht in einem potentiellen Konfliktbereich mit dem vorfahrtsberechtigten Fahrzeug.

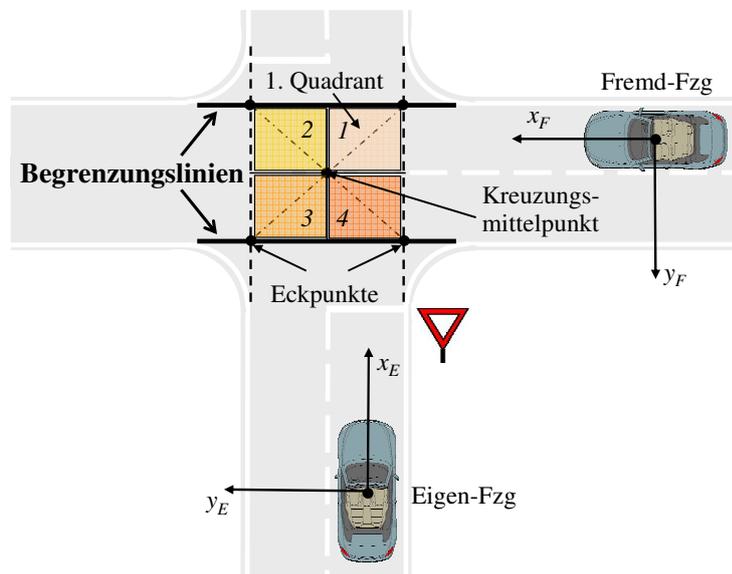


Abbildung 4.6: Auf Grundlage der Kreuzungseckpunkte in der digitalen Karte wird der Kreuzungsmittelpunkt sowie die Begrenzungslinien definiert.

Durch das Verbinden der diagonal gegenüberliegenden Eckpunkte wird der Kreuzungsmittelpunkt bestimmt. Auf Grundlage des bestimmten Kreuzungsmittelpunktes sowie der vier Eckpunkte lässt sich ebenfalls die Ausrichtung bei der Trajektorienprädiktion stützen. Die maximal zulässige Abweichung der Eckpunkte darf wie im zweiten Worst-Case-Szenario berechnet maximal $\pm 4\text{m}$ betragen. Durch die vier Eckpunkte lässt sich ebenfalls der resultierende Längsrichtungsfehler auf das geforderte Maß begrenzen.

Für die Bestimmung des Kollisionsrisikos bietet sich der zusätzliche Vorteil, dass durch die Eckpunkte und den Kreuzungsmittelpunkt die Kreuzung in vier Quadranten untergliedert wird. Hierdurch wird eine Stützung der Berechnung des Trajektorienschnittpunktes sowie der Bestimmung des kritischen Bereichs ermöglicht. Denn wird das Eigenfahrzeug voraussichtlich kreuzen und nähert sich das Fremdfahrzeug von rechts an, befindet sich der Trajektorienschnittpunkt und damit der kritische Bereich sehr wahrscheinlich im ersten Quadranten.

4.1.2 Zulässige Abweichungen bei Berechnung der Warnentfernung

Kennzeichnend für die Warnentfernung sind folgende Kriterien (siehe Kap. 3.2.1):

- Warnung so frühzeitig, dass der Fahrer ausreichend Zeit hat die kritische Situation zu erkennen und eine kollisionsvermeidende Handlung einzuleiten, d.h. in der Regel Verzögerung des Fahrzeugs bis zum Stillstand vor der Haltelinie
- Warnung so spät, dass der Fahrer bei einer konfliktfreien Kreuzungsannäherung keine Warnung erhält

An Kreuzungen mit Rechts-vor-Links- oder Vorfahrtachten-Regelung ist nicht immer eine Haltelinie vorhanden. Daher wird eine entsprechende Bezugslinie benötigt. Hierfür wird die Grenzlinie zwischen der Haupt- und Nebenstraße (siehe Abb. 4.6) oder, wenn keine digitale Karte mit Kreuzungseckpunkten vorhanden ist, die Grenze des kritischen Bereichs verwendet.

Die Warnentfernung wird durch Abweichungen in der Längsrichtung des Fahrzeugs sowie der Grenzlinienposition verfälscht. In Abb. 4.7 wird der Ansatz zur Definition der zulässigen Abweichung dargestellt. Diesem Ansatz liegt die Hypothese zu Grunde, dass der wartepflichtige Fahrer einen Korridor akzeptiert, in welchem der Warnzeitpunkt liegt. Grundlage für die Bestimmung dieses angenommenen Akzeptanzkorridors stellt das Fahrerverhalten bei der Kreuzungsannäherung dar.

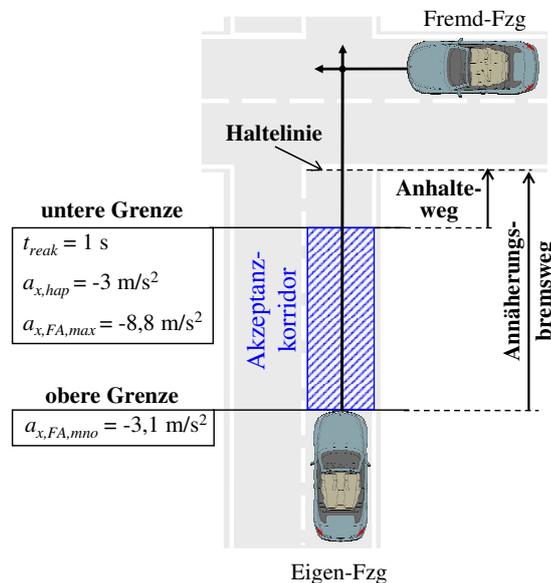


Abbildung 4.7: Ansatz zur Definition der zulässigen Abweichung der Warnentfernung.

So zeigte MAGES³ im Rahmen einer Fahrerverhaltensanalyse, dass bei einer konfliktfreien Kreuzungsannäherung mit Stopp an der Haltelinie bis auf eine Ausnahme die maximal erforderliche Verzögerung ($a_{x,FA,mno}$) bei betragsmäßig $3,1 \text{ m/s}^2$ lag. Auf Basis technischer

³ Mages (2005): PReVENT Turn Into/Cross Driving Assistance S. 11.

Analysen von Verkehrsunfällen⁴ wurde ermittelt, dass bei den betrachteten Unfallsituationen auf trockener Fahrbahn maximal eine Verzögerung ($a_{x,FA,max}$) von $8,8 \text{ m/s}^2$ erzielbar gewesen wäre. Grundsätzlich sind auch Verzögerungen von über 10 m/s^2 realisierbar.

Für die Definition des voraussichtlichen Akzeptanzkorridors wird als obere Grenze der Annäherungsbremsweg mit $a_{x,FA,mno}$ und als untere Grenze der Anhalteweg mit t_{reak} gleich 1 s und $a_{x,FA,max}$ gleich $-8,8 \text{ m/s}^2$ gewählt. Zusätzlich wird während der Reaktionszeit eine haptische Anbremsung mit $a_{x,hap}$ gleich -3 m/s^2 durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass bereits während der Reaktionszeit Geschwindigkeit abgebaut wird und sich so der Anhalteweg verkürzt. Hierauf wird in Kap. 6.4 noch genauer eingegangen. Die Gesamtbreite des Korridors ist die Differenz zwischen diesen beiden Grenzen. Die zulässige Abweichung der Warnentfernung $\Delta x_{E,H,zul}$ wird gleich plus/minus der Hälfte dieser Differenz gesetzt.

$$\Delta x_{E,H,zul} \stackrel{!}{=} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{x,E,0}^2}{-2 \cdot a_{x,FA,mno}} \mp \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(v_{x,E,0} + a_{x,hap} \cdot t_{reak})^2}{-2 \cdot a_{x,FA,max}} + v_{x,E,0} \cdot t_{reak} + \frac{1}{2} \cdot a_{x,hap} \cdot t_{reak}^2 \right) \quad (4.26)$$

In Tab. 4.2 wird beispielhaft für verschiedene Geschwindigkeiten des Eigenfahrzeugs $v_{x,E,0}$ die zulässige Abweichung $\Delta x_{E,H,zul}$ angegeben.

Tabelle 4.2: Zulässige Abweichung der Warnentfernung auf Grundlage des angenommenen Akzeptanzkorridors mit der Obergrenze: Annäherungsbremsweg mit $a_{x,FA,mno} = -3,1 \text{ m/s}^2$ und der Untergrenze: Anhalteweg mit $t_{reak} = 1 \text{ s}$, einer haptischen Anbremsung $a_{x,hap} = -3 \text{ m/s}^2$ und $a_{x,FA,max} = -8,8 \text{ m/s}^2$.

$v_{x,E,0}$ [m/s]	7,5	10	12,5	13,0	15	17,5	20	25	30
$\Delta x_{E,H,zul}$ [m]	0,9	2,4	4,5	5,0	7,3	10,7	14,7	24,9	37,6

Bei einer Geschwindigkeit von 30 m/s liegt diese bei $\pm 37,6 \text{ m}$ ($\cong \pm 3\sigma$), bei $12,5 \text{ m/s}$ bei $\pm 4,5 \text{ m}$ und bei 10 m/s bei $\pm 2,4 \text{ m}$. Auch diese Anforderung ist geschwindigkeitsabhängig. Es ist erforderlich, die Warnentfernung umso genauer zu bestimmen, je niedriger die Geschwindigkeit liegt. Ein Grund hierfür besteht darin, dass bei gleicher angenommener Verzögerung und sinkender Geschwindigkeit der Bremsweg überproportional kürzer wird.

Worst-Case-Betrachtungen

In den folgenden Worst-Case-Betrachtungen wird wie in Kap. 4.1.1 von einer Positionsabweichung kleiner gleich $\pm 3 \text{ m}$ ($\cong \pm 3\sigma$) und einem resultierenden Längsrichtungsfehler aus der Ausrichtungsabweichung von größer gleich $\pm 2 \text{ m}$ ($\cong \pm 3\sigma$) ausgegangen. Unter diesen Annahmen ergibt sich ein Gesamtfehler von $\pm 5 \text{ m}$. Nach Tab. 4.2 beträgt so die Mindestgeschwindigkeit für das Eigenfahrzeug 13 m/s .

Bezüglich der Auswirkung des Ausrichtungsfehlers sowie der steigenden Anforderung an die zulässige Ausrichtungsabweichung mit sinkender Geschwindigkeit liegen ähnliche Bedingungen vor wie bei den zuvor betrachteten Worst-Case-Szenarien. Ein wichtiger Unterschied besteht jedoch darin, dass die Geschwindigkeit des Fremdfahrzeugs keinen Einfluss auf die zulässige Positionsabweichung des Eigenfahrzeugs hat. Daher besteht das

⁴ Danner/Halm (1994): Technische Analyse von Verkehrsunfällen S. 219ff.

Worst-Case-Szenario darin, dass sich das Fremdfahrzeug in einer maximalen Entfernung zur Kreuzung befindet und sich das Eigenfahrzeug mit der Mindestgeschwindigkeit annähert.

Die maximale Entfernung des Fremdfahrzeugs ist dadurch gekennzeichnet, dass dieses Fahrzeug eine Relevanz für die Situationsinterpretation des Eigenfahrzeugs hat und sich das Eigenfahrzeug so nah an der Kreuzung befindet, dass eine Entscheidung hinsichtlich einer Warnung erforderlich ist. Diese Entfernung errechnet sich nach den Gleichungen 4.14 bis 4.23. Die Annahmen sind die gleichen wie im *zweiten Szenario* (siehe Kap. 4.1.1). Nur $t_{Vorlauf}$ wird gleich Null gesetzt, da es ausreichend ist, erst beim Warnort die zulässige Abweichung der Warnentfernung zu gewährleisten.

Der gesamte resultierende Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs berechnet sich nach Gleichung 4.6. Somit ist auch dieser neben dem Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs von den Anteilen des Positionsfehlers des Fremdfahrzeugs in der Längsrichtung des Eigenfahrzeugs sowie dem Ausrichtungsfehler des Fremdfahrzeugs abhängig.

Unter der Annahme eines Querrichtungsfehlers des Fremdfahrzeugs von ± 3 m ergibt sich mit dem Längsrichtungsfehler des Eigenfahrzeugs ein Gesamtfehler von $\geq \pm 6$ m. Dieser liegt somit um ± 1 m über der zulässigen Abweichung der Warnentfernung. Daher ist eine Stützung der Entfernungsbestimmung durch zusätzliche Informationen erforderlich. Wie in Kap 4.1.1 wird die Nutzung einer digitalen Karte vorgeschlagen. Aus dieser wird wie in Abb. 4.6 dargestellt die Grenzlinie zwischen der Haupt- und Nebenstraße bestimmt. Es ist erforderlich, diese Grenzlinie mit einer maximalen Abweichung von ± 2 m zu berechnen, damit in Verbindung mit der Längsrichtungsabweichung des Eigenfahrzeugs die zulässige Entfernungsabweichung von ± 5 m nicht überschritten wird.

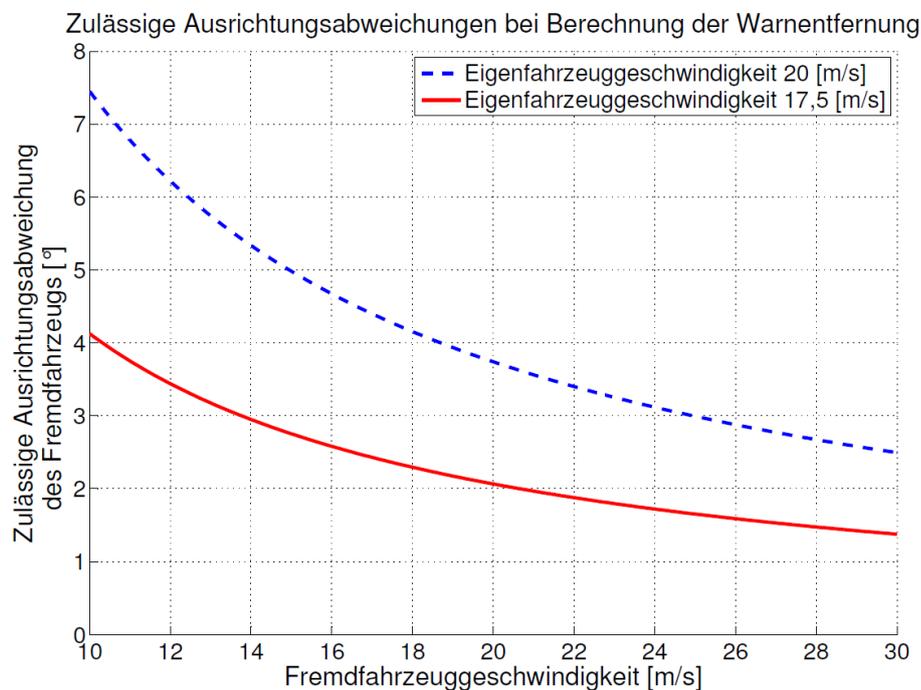


Abbildung 4.8: Zulässige Ausrichtungsabweichung des Fremdfahrzeugs bei der Berechnung der Warnentfernung.

Wird durch die digitale Karte nur die im vorausgegangenen Kapitel gefordert maximale

Abweichung von ± 4 m gewährleistet, erhöht sich die zulässige Mindestgeschwindigkeit des Eigenfahrzeugs auf 15 m/s . Um einen Anhaltspunkt dafür zu geben, ab welcher Geschwindigkeit des Eigenfahrzeugs bzw. des Fremdfahrzeugs auf die digitale Karte verzichtet werden kann, ist in Abb. 4.8 exemplarisch für die beiden Eigenfahrzeuggeschwindigkeiten $17,5$ und 20 m/s der Zusammenhang zwischen der Fremdfahrzeuggeschwindigkeit und dem zulässigen Ausrichtungsfehler $\Delta\Theta_F$ dargestellt.

$\Delta\Theta_F$ berechnet sich nach Gleichung 4.25, wobei $2\Delta p$ gleich $\Delta x_{E,H,zul}$ sowie Δx_E und $\Delta x_{\Delta y_{F,E}}$ jeweils gleich ± 3 m gesetzt werden.

4.2 Methodik

Grundlage für die Bestimmung der Entfernung zwischen den Fahrzeugen und dem Schnittpunkt der Trajektorien sowie zwischen dem wartepflichtigen Fahrzeug und der Haltelinie stellt die absolute Position dar. Zur Bestimmung der absoluten Position bietet sich die Satellitennavigation an.

4.2.1 Satellitennavigation

Global Positioning System (GPS)

Das GPS stellt ein vom amerikanischen Verteidigungsministerium beauftragtes, in Betrieb befindliches System dar. Mit diesem System besteht die Möglichkeit, weltweit eine Positionsmessung im World Geodetic System 1984 (WGS-84)-Koordinatensystem durchzuführen. Diese weltweit eindeutige Position bezieht sich auf das WGS-84-Ellipsoid. Dieses Ellipsoid wurde 1984 zur mathematischen Annäherung der Erdoberfläche festgelegt und wird in Abschnitt Koordinatentransformation noch näher betrachtet.

Das GPS besteht aus 24 Satelliten, welche die Erde in einer nominellen Höhe von 20200 km umkreisen. Die GPS-Satelliten senden auf zwei Frequenzen ($L_1 = 1575,42 \text{ MHz}$, $L_2 = 1227,60 \text{ MHz}$) Daten aus. Für die Positionsbestimmung eines GPS-Empfängers wird die Laufzeit benötigt, welche die erste Frequenz vom Satelliten bis zum Empfänger braucht. Aus dieser Zeit wird die Entfernung des Satelliten zum GPS-Empfänger berechnet. Sind zu mehreren Satelliten die Entfernungen bekannt, wird die aktuelle Position durch Triangulation berechnet. Für eine dreidimensionale Positionsbestimmung werden Entfernungen zu mindestens vier Satelliten benötigt, wobei die vierte Messung zur Korrektur des Zeitversatzes zwischen der Quarzuhr im Empfänger und den Atomuhren in den Satelliten erforderlich ist. Es erfolgt eine Triangulation im vier-dimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum.

Neben diesem Uhrzeitfehler sind die berechneten Entfernungen auch durch andere Fehlerquellen verfälscht. Deshalb bezeichnet man diese Entfernung auch als Pseudoentfernung. Die weiteren Hauptfehlerquellen sind Störungen durch die Ionosphäre und Troposphäre, Schwankungen der Satellitenumlaufbahnen, Uhrenfehler der Satelliten, Mehrwegeeffekte sowie Rechnungs- und Rundungsfehler. Hieraus ergibt sich für die GPS-Genauigkeit $\pm 15 \text{ m}$ (50 % aller Messpunkte eingeschlossen).^{5,6}

Im realen Betrieb kommt der Mehrwegeausbreitung (Multipath-Effekt) insbesondere in Stadtgebieten eine besondere Bedeutung zu. Hierunter wird verstanden, dass die GPS-

⁵ Klanner (2004): Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistenz S. 6ff.

⁶ Köhne/Wölkner (2007): Navstar GPS.

Signale z.B. an Gebäuden reflektiert werden, wodurch sich die Laufzeit bis zum GPS-Empfänger verlängert. So führt eine Laufzeitverlängerung von 100 ns zu einem Positionsfehler von bis zu 30 m. Die Mehrwegeausbreitung ist in Stadtgebieten starken Streuungen unterworfen, wodurch die systematische Verfälschung der GPS-Position stark variieren kann.

Differential GPS (DGPS)

Basierend auf dem GPS existieren verschiedene Messprinzipien zur Genauigkeitssteigerung. Zu diesen zählen das Differential GPS und die Phasenmessung Carrier Phase DGPS (CPDGPS). Grundlage des DGPS bildet die Überlegung, dass bei zwei GPS-Empfängern, die in unweiter Entfernung voneinander das GPS-Signal ohne der Mehrwegeausbreitung unterworfen zu sein empfangen, die meisten der auftretenden Fehler nahezu gleich sind. Dieser Effekt wird beim DGPS zur Signalkorrektur genutzt. So ist von einem fest installierten GPS-Empfänger, einer so genannten Referenzstation, die Position hochgenau bekannt. Von dieser wird zusätzlich auf Grundlage des aktuellen GPS-Signals die Pseudoposition bestimmt. Die Differenz zwischen diesen beiden Positionen stellt die Grundlage für ein Korrektursignal dar. Dieses wird von der Referenzstation ausgesendet. Dieses Korrektursignal und das aktuelle GPS-Signal ermöglichen anderen DGPS-Empfängern ihre Position entsprechend genauer zu bestimmen.

Solche Korrektursignale sind von kommerziellen Dienstleistern verfügbar. Zu diesen zählen Omnistar oder Wide Area Augmentation System/European Geostationary Navigation Overlay Service (WAAS/EGNOS). Auf Grundlage dieses Korrektursignals sind Genauigkeiten in der Positionsbestimmung von ± 3 bis ± 5 m (Omnistar) bis hinzu ± 1 bis ± 3 m (WAAS/EGNOS) möglich. Das Korrektursignal kann auch durch einen nicht kommerziellen, stationär angebrachten GPS-Empfänger berechnet werden.

Eine Erweiterung des DGPS stellt das CPDGPS dar. Neben der L_1 - wird auch die L_2 -Frequenz genutzt. Hierbei erfolgt eine Phasenmessung. Die Pseudoentfernungskorrektur wird dadurch exakter. Hiermit besteht die Möglichkeit, Genauigkeiten in der Positionsbestimmung von bis zu $\pm 0,02$ bis $\pm 0,05$ m (Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service, HEPS) zu erreichen.

Durch das Korrektursignal werden vor allem die Fehler verringert, welche durch die atmosphärischen Effekte und die Schwankungen in den Satellitenbahnen entstehen. In der Regel nicht berücksichtigt sind Fehler auf Grund von Mehrwegeausbreitungen. Zudem ist für die Bestimmung einer genauen DGPS- bzw. hochgenauen CPDGPS-Position eine bestimmte Mindestanzahl von Satelliten sowie eine gute Satellitenkonstellation erforderlich. Eine gute Satellitenkonstellation liegt vor, wenn die Signale von Satelliten in allen vier Himmelsrichtungen für die Positionsbestimmung verwendbar sind. Liegt eine schlechte Satellitenkonstellation vor, können auch mit Differential GPS die genannten Positionsgenauigkeiten nicht zuverlässig gewährleistet werden.⁷

Koordinatentransformation

Für die Positionsbestimmung eines Fahrzeugs werden in dieser Arbeit DGPS-Daten mit Fahrdynamikdaten gekoppelt. Um dies zu ermöglichen, ist eine Darstellung der Messgrößen

⁷ Köhne/Wößner (2007): Navstar GPS.

in einem gemeinsamen Koordinatensystem erforderlich. Dazu wird eine Koordinatentransformation durchgeführt. Das Bezugssystem der GPS-Koordinaten ist das rotationssymmetrische WGS-84-Ellipsoid. Zur Beschreibung einer Position auf diesem Bezugssystem, werden die Längen- und Breitengradkoordinaten angegeben. Wie in Abb. 4.9 dargestellt entspricht der Längengrad λ dem Winkel zwischen dem Nullmeridian und der projizierten Position auf der Äquatorebene. Der Breitengrad φ ist der Winkel zwischen dem Querkrümmungsradius N_r und der Äquatorebene.

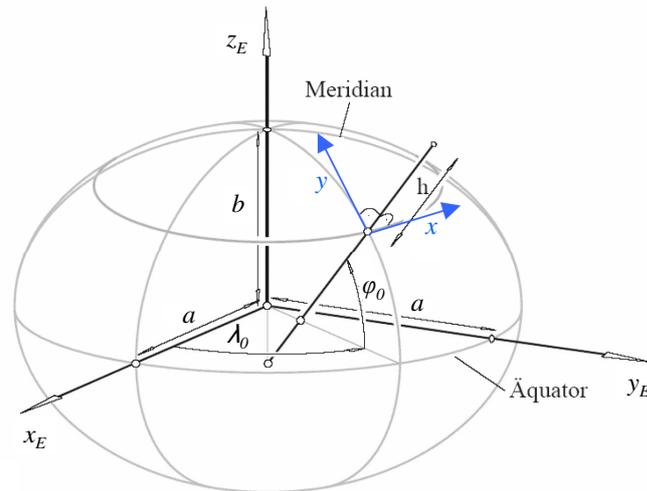


Abbildung 4.9: Annäherung der Erdoberfläche durch das WGS-84-Ellipsoid sowie die Darstellung des kartesischen Koordinatensystems auf der Erdoberfläche⁸.

Das Bezugssystem der Fahrdynamikdaten befindet sich auf der Erdoberfläche. Es lässt sich durch ein kartesisches Koordinatensystem darstellen. In diesem zeigt die y -Achse nach Norden und die x -Achse nach Osten. Die Fahrzeugbewegung wird nur zweidimensional betrachtet. Der Ursprung liegt in einem ortsfesten Punkt mit den Koordinaten (λ_0, φ_0) . Um eine Position mit dem Längengrad- und Breitengrad (λ_P, φ_P) in kartesische Koordinaten (x_P, y_P) zu transformieren, sind folgende Umrechnungen erforderlich:

$$x_P = N_r \cdot \cos \varphi_0 \cdot (\lambda_P - \lambda_0) \quad (4.27)$$

$$y_P = M_r \cdot (\varphi_P - \varphi_0) \quad (4.28)$$

mit dem Querkrümmungsradius N_r

$$N_r = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi_0}} \quad (4.29)$$

mit dem Meridiankrümmungsradius M_r

$$M_r = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi_0)^{\frac{2}{3}}} \quad (4.30)$$

mit der 1. Exzentrizität

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (4.31)$$

und den Halbachsen des WGS-84-Ellipsoids $a = 6.378137 \cdot 10^6$ m, $b = 6.3567523142 \cdot 10^6$ m.

⁸ Rummel/Peters (2007): Bezugssysteme - Vorlesungsskript.

4.2.2 Kalman-Filter zur Messdatenfusion

Die zur Bestimmung der Fahrzeugposition verwendeten Messdaten sind fehlerbehaftet. Daher werden mit diesen immer nur so genannte Schätzwerte bestimmt. Zur Erzielung möglichst guter Schätzwerte wird ein Kalman-Filter verwendet. Nach BRAMMER⁹ zählt das Kalman-Filter zu den Verfahren, „die der optimalen Schätzung des Zustandes dynamischer Systeme dienen, trotz mancher Störeinflüsse und Unsicherheiten, wie sie die Praxis mit sich bringt.“

Zur Erzielung einer optimalen Schätzung benutzt das Kalman-Filter neben den Messwerten auch a-priori-Kenntnisse über das dynamische Verhalten des behandelten Systems. Die Kenntnis über das System wird über Differentialgleichungen und Differenzgleichungen beschrieben. Weiter erfolgt über statistische Kenngrößen auch eine Berücksichtigung der System- und Messfehler. Ein großer Vorteil des Kalman-Filters liegt in seiner rekursiven Arbeitsweise. Zunächst erfolgt auf Grundlage der aktuellen Zustandsdaten und Fehlervarianzen eine Prädiktion der Zustandsdaten für den nächsten Zeitschritt. Im nächsten Zeitschritt erfolgt dann eine Korrektur der geschätzten Zustandsgrößen auf Grundlage der Messwerte. Dadurch fließt in jeden Schätzwert gewichtetes Wissen über die Historie des Systemzustandes mit ein.

Für die optimale Schätzung verarbeitet das Kalman-Filter die Messdaten aller verwendeten Sensoren gemeinsam. Die dynamische Gewichtung der einzelnen Messungen erfolgt dabei automatisch in Abhängigkeit von der jeweiligen Messgenauigkeit. Die bei jeder Schätzung ermittelte Fehlervarianz ermöglicht eine ständige Bewertung der Zuverlässigkeit des Schätzergebnisses. Ein großer Nachteil des Kalman-Filters besteht darin, dass stark schwankende, unbekannte systematische Fehler der Messgrößen zu einem instationären Filterverhalten führen können. Das Kalman-Filter ist überdies nur für Gauß'sche Fehlerverteilungen optimal.

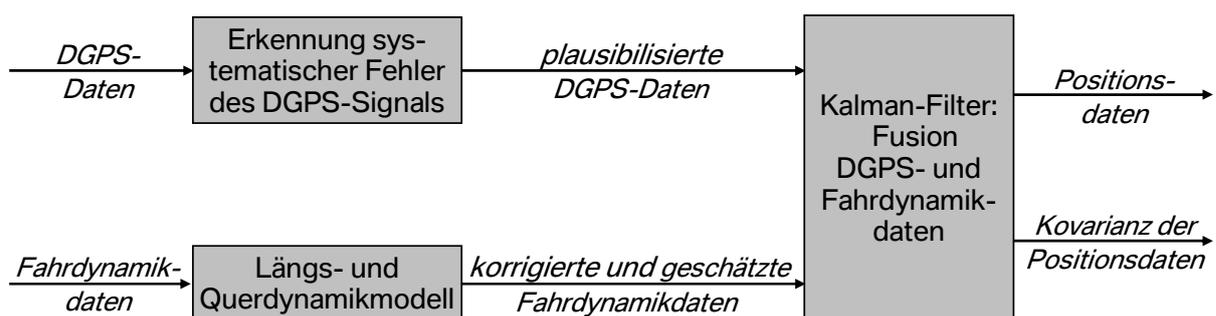


Abbildung 4.10: Struktur des Positionsfilters.

⁹ Brammer/Siffling (1994): Kalman-Bucy-Filter.

Die Struktur des entwickelten Positionsfilters wird in Abb. 4.10 dargestellt. Die Zustandsgrößen des Filters sind die x - und y -Koordinate sowie der Winkel gegenüber Nord Θ des Fahrzeugs. Messgrößen sind die DGPS-Daten (Längengrad, Breitengrad, Ausrichtung) sowie die Fahrdynamikdaten (Fahrzeuggeschwindigkeit, Raddrehzahlen, Gierrate, Querschleunigung). Eine Fusion dieser Messdaten bietet als Vorteil die Möglichkeit, die Stärken beider Informationsquellen zu nutzen und Schwächen zu kompensieren. Die Positionsbestimmung wird dadurch über zwei verschiedene Methoden abgesichert. So liegt eine Schwäche des DGPS in der schwankenden Genauigkeit. Die Analyse der Ergebnisse von durchgeführten Messfahrten zeigt aber, dass für größere Distanzen die gefahrene Strecke gut wieder gegeben wird. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung auf Grundlage der Fahrdynamikdaten verhält sich gegenläufig zu der des DGPS. Zur Positionsfortschreibung wird u.a. die Fahrzeuggeschwindigkeit bezüglich der Zeit integriert. Durch die Summation wird auch der Messfehler mit akkumuliert. Dies hat zur Folge, dass auf längere Distanzen die Genauigkeit der Positionsfortschreibung sinkt.

4.2.3 Umgang mit unscharfen Daten im Positionsfiler

Kalman-Filter stellen lineare Schätzverfahren dar, die gegen systematische Verfälschung der Messgrößen extrem empfindlich sind. Um zu vermeiden, dass in das Kalman-Filter Messdaten mit systematischen Fehlern einfließen, wird vor der Kalman-Filterung eine Bereinigung der Fahrdynamikdaten und eine Plausibilisierung der DGPS-Daten nach der in KLANNER¹⁰ und NIEHUES¹¹ entwickelten Methode vorgenommen.

Bereinigung der Fahrdynamikdaten

Zur Bereinigung der Fahrdynamikdaten wird ein eigenes Kalman-Filter verwendet. Grundlage für dieses Filter ist ein erweitertes Querdynamikmodell. Als Ergebnis liegen die beobachteten Zustandsgrößen Gierrate $\dot{\psi}$, befahrene Krümmung κ und Querschleunigung a_y vor. Zusätzlich wird ein erweitertes Längsdynamikmodell verwendet. Als Ergebnis dieses Modells liegen die bereinigte Längsgeschwindigkeit v_x und Längsbeschleunigung a_x vor.

Plausibilisierung der DGPS-Daten

Zur Erkennung von fluktuierenden systematischen Fehlern der DGPS-Position wird eine Fehlerellipse¹² eingesetzt. Die Fehlerellipse wird um die prädierten Positionskordinaten gelegt. In die Größe der Fehlerellipse fließt die aktuelle Fehlervarianz der Zustandsgrößen x und y mit ein. Liegt die DGPS-Position außerhalb dieser Ellipse, wird sie verworfen und nicht für die Messwertkorrektur verwendet. Die Messwertkorrektur erfolgt dann ausschließlich auf Grundlage der Fahrdynamikdaten.

Eine detaillierte Analyse der durch die Mehrwegeausbreitung verfälschten DGPS-Messdaten zeigt, dass zwar die DGPS-Koordinaten nicht für die Messwertkorrektur, jedoch die vom GPS-Empfänger ausgegebene Ausrichtung gegenüber Nord nutzbar ist. Im Rahmen

¹⁰ Klanner (2004): Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistenz.

¹¹ Niehues (2006): Untersuchung zur präzisen und zuverlässigen Bestimmung der Fahrzeugposition und -ausrichtung.

¹² Klanner (2004): Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistenz S. 58.

von Messfahrten wurde der Positionsfilter mit und ohne vorgelagerter Plausibilisierung der DGPS-Daten verwendet. Das Ergebnis der Messfahrten wird in Abb. 4.11 dargestellt.

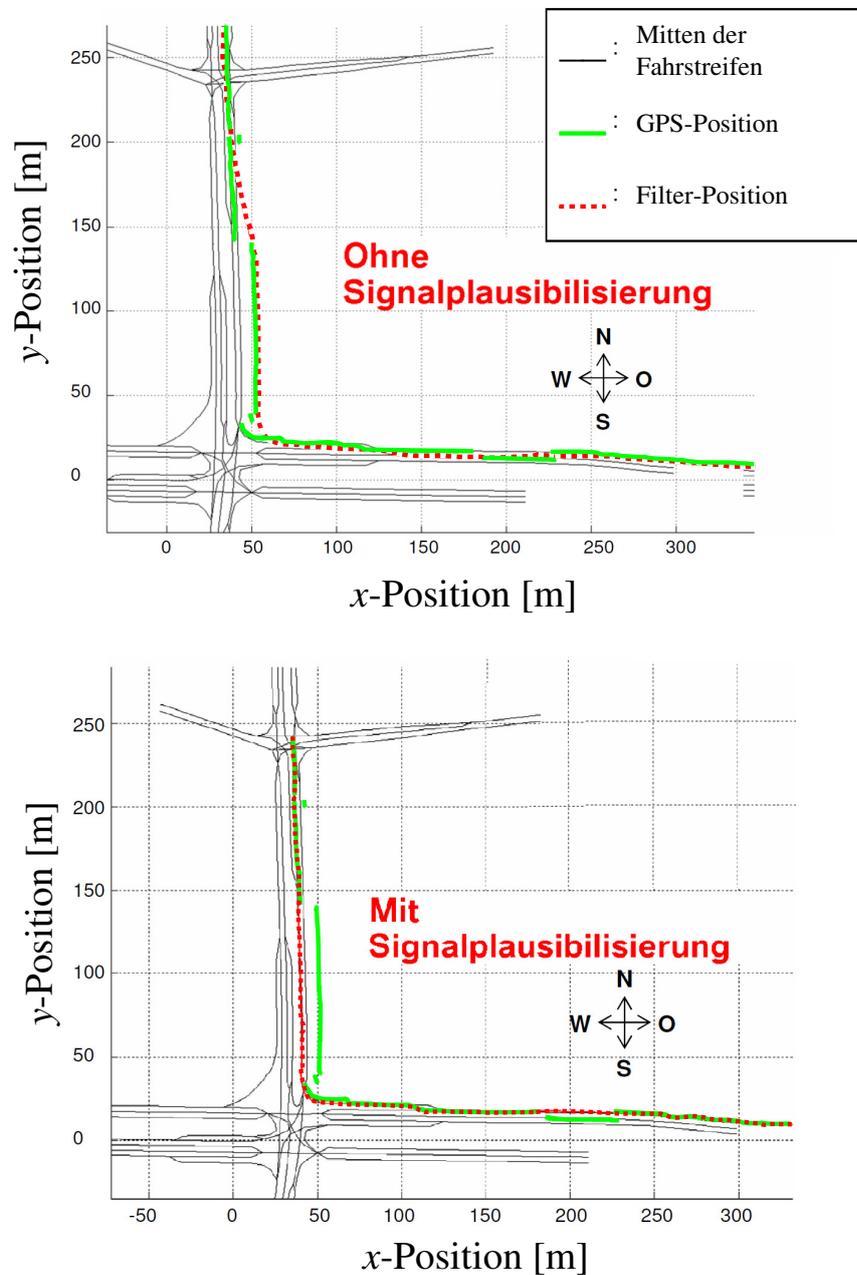


Abbildung 4.11: Positionsfortschreibung bei Multipath-Effekt ohne und mit Plausibilisierung der DGPS-Nachricht und Nutzung der DGPS-Ausrichtung¹³.

Die schwarzen Linien stellen die Mitten der Fahrstreifen dar. Befahren wurde zunächst der rechte und nach dem Abbiegemanöver der linke Fahrstreifen. Die DGPS-Koordinaten weichen an mehreren Stellen um mehr als 8 m von der Mitte der Fahrstreifen ab. Ohne Signalplausibilisierung folgen die gefilterten Positionen den DGPS-Koordinaten. Hingegen wurde mit Signalplausibilisierung und Nutzung der DGPS-Ausrichtung eine Abweichung von weniger als 0,5 m realisiert.

¹³ Klanner/Ehmanns/Winner (2006): ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz S. 997.

4.3 Eigenschaftsanalyse

Das Ziel der Analyse des Positionsfilters besteht in der Bestimmung

- des Leistungsgewinns durch die Nutzung des Positionsfilters gegenüber einer Positionierung nur auf Basis des DGPS-Empfängers,
- sowie der Leistungsfähigkeit des Positionsfilters auf einem exemplarischen Rundkurs in München.

Als Leistungskriterien werden hierbei die absolute Positions- und Ausrichtungsabweichung verwendet.

Methodik

Als DGPS-Empfänger wird ein High-End-GPS-Empfänger in Verbindung mit einem Funkmodem zum Empfang von Korrekturdaten verwendet. Die Korrekturdaten stammen vom Dienstleister Omnistar und ermöglichen eine Genauigkeit der Positionsbestimmung von $\pm 3\text{m}$ (50 % aller Messpunkte eingeschlossen). Als Referenzsystem wird eine CPDGPS-gestützte Inertialplattform verwendet. Dieses Referenzsystem ermöglicht eine zentimetergenaue Positionsbestimmung. Als Kriterium, dass das System als Referenz genutzt werden kann, wird eine zulässige Standardabweichung der CPDGPS-Position von kleiner gleich $0,15\text{m}$ festgelegt. Hiermit soll sicher gestellt werden, dass das Referenzsystem um rund den Faktor zehn genauer ist als das zu beurteilende Positionierungssystem. Da, wie in Kap. 4.2.1 eingeführt, die Standardabweichung ggf. bei Positionsfehlern auf Grund der Mehrweageausbreitung die tatsächliche absolute Positionsabweichung nicht wieder gibt, erfolgt zusätzlich die Nutzung eines orthogonal zur Messstrecke aufgenommenen Fotos. Dieses Foto dient zur Plausibilisierung der berechneten Standardabweichung der CPDGPS-Position.

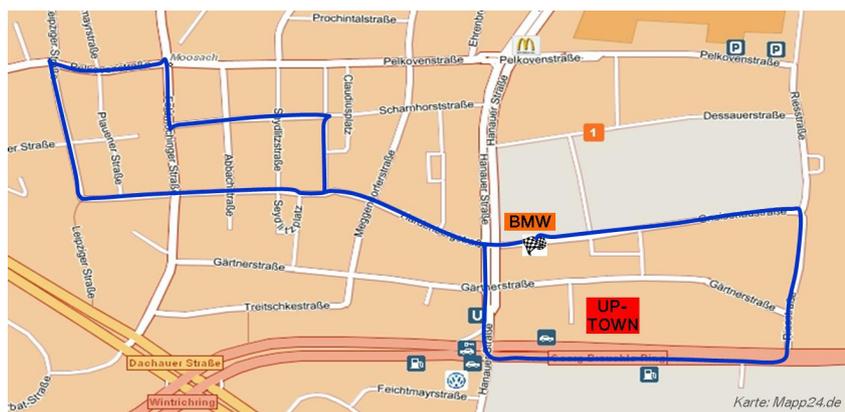


Abbildung 4.12: Messstrecke zur Analyse der Leistungsfähigkeit des entwickelten Positionsfilters¹⁴.

Zur Analyse des Positionsfilters wurden Messfahrten auf einem exemplarischen Rundkurs in München durchgeführt. Dieser Rundkurs wird in Abb. 4.12 dargestellt und hat eine Länge von 4,4 km. Er führt zu rund der Hälfte durch ein Wohngebiet und zur anderen Hälfte

¹⁴ N.N. (2007a): map24

durch ein Industriegebiet. Insgesamt wurde der Rundkurs dreimal bei unterschiedlichen Satellitenkonstellationen befahren. Das Ziel bestand dabei darin, eine Streuung der GPS-Bedingungen zu realisieren.

Ergebnisse

Auf gut 50 % der Messtrecke waren die Anforderungen an das Referenzsystem erfüllt. Für diesen Teil der Messtrecke erfolgt die Messdatenauswertung. Die Auswertung besteht in der Bestimmung der Entfernung zwischen den berechneten Positionen und Ausrichtungen des Referenzsystems sowie des Positionsfilters bzw. DGPS-Empfängers. Die Ergebnisse werden in den Abb. 4.13 und 4.14 dargestellt.

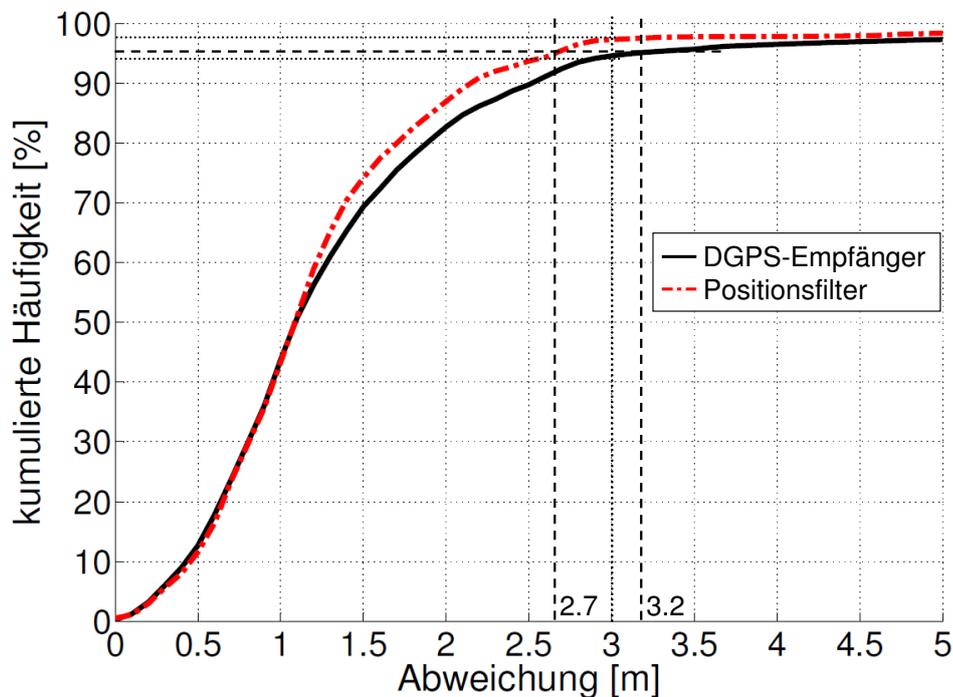


Abbildung 4.13: Kumulierte Häufigkeit der Positionsabweichung der Positionierungssysteme zum Referenzsystem.

Durch den DGPS-Empfänger wurde in 95 % der Fälle eine Positionsabweichung von kleiner gleich $\pm 3,2$ m erwirkt. In Folge des Positionsfilters reduzierte sich diese Abweichung auf kleiner gleich $\pm 2,7$ m, also um 15 %. Eine Positionsabweichung kleiner gleich ± 3 m wurde durch den DGPS-Empfänger in 94 % und durch den Positionsfilter in 98 % der Fälle erzielt.

Für die Ausrichtung ergab sich beim DGPS-Empfänger in 95 % der Fälle eine Abweichung von kleiner gleich $\pm 4,5^\circ$. Mit Hilfe des Positionsfilters verbesserte sich diese auf kleiner gleich $\pm 2,3^\circ$, also um knapp den Faktor zwei. Eine Ausrichtungsabweichung kleiner gleich $\pm 2^\circ$ wurde durch den DGPS-Empfänger in 86 % und durch die zusätzliche Verwendung des Positionsfilters in 93 % der Fälle erwirkt.

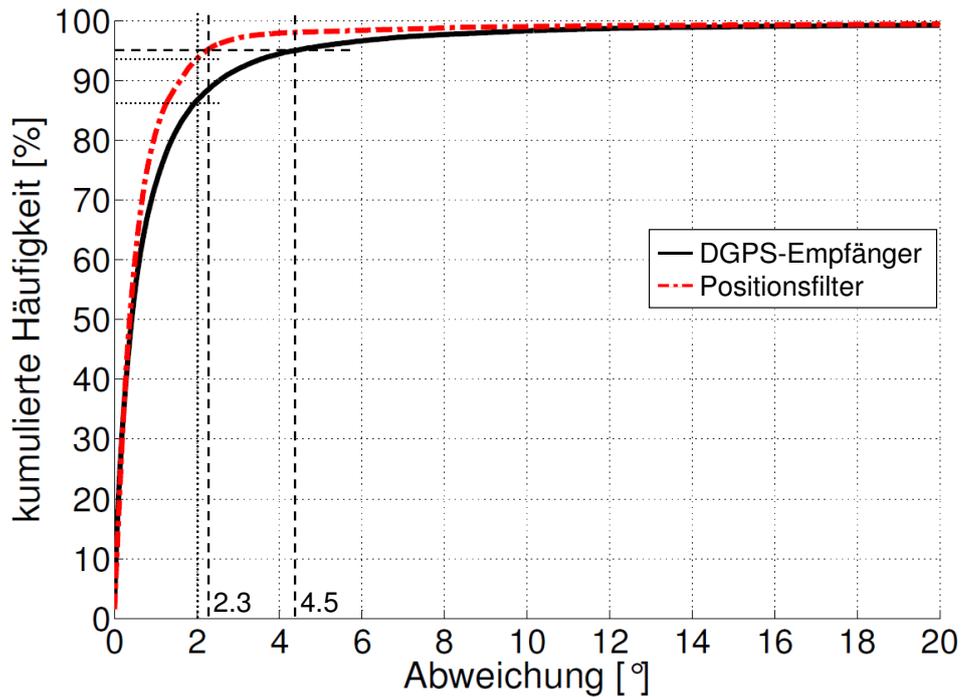


Abbildung 4.14: Kumulierte Häufigkeit der Ausrichtungsabweichung der Positionierungssysteme zum Referenzsystem.

4.4 Diskussion

Auf Grundlage der Anforderungen an den KQA wurden die Anforderungen an das Teilsystem Positionsbestimmung sowie an die digitale Karte definiert. Grundsätzlich ist es erforderlich, die Fahrzeugposition und -ausrichtung umso genauer zu bestimmen, je kleiner die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist. Als Grundlage für eine zuverlässige Kollisionswarnung darf bei einer Geschwindigkeit beider Fahrzeuge von 10 m/s der resultierende Entfernungfehler zwischen den Fahrzeugen und dem Schnittpunkt der Trajektorien nicht mehr als $\pm 5 \text{ m}$ betragen.

Eine Worst-Case-Betrachtung hinsichtlich dieses Fehlers zeigt, dass für die Funktion des KQA eine Mindestgeschwindigkeit von 10 m/s erforderlich ist. Als maximale Geschwindigkeit werden 30 m/s berücksichtigt. Nähert sich das Eigenfahrzeug der Kreuzung mit 10 m/s und das Fremdfahrzeug mit 30 m/s , so ergibt sich die Worst-Case-Situation mit den höchsten Anforderungen bezüglich der Ausrichtungsbestimmung. Beträgt der Positionsfehler $\pm 3 \text{ m}$, so ist in diesem Fall erforderlich, die Ausrichtung mit einer Genauigkeit von $\pm 2,0^\circ$ zu bestimmen. Kann diese Anforderung vom Positionierungssystem nicht gewährleistet werden, wird die Nutzung einer digitalen Karte vorgeschlagen. Diese ist um die Ausrichtungsinformation der Fahrbahnen mit einer Genauigkeit von $\pm 2,0^\circ$ zu erweitern. Alternativ kann statt der Ausrichtung der Fahrbahn auch auf die Nutzung von vier Kreuzungseckpunkten zurückgegriffen werden. Diese sind mit einer maximalen Abweichung von $\pm 4 \text{ m}$ in der digitalen Karte zu vermerken.

Die Ausrichtungsinformation aus der digitalen Karte wird zur Stützung der Trajektorienprädiktion verwendet. Dies bietet zusätzlich den Vorteil, dass der Schnittpunkt der Trajektorien auch im Falle eines Ausweichmanövers oder Fahrstreifenwechsels während

der Kreuzungsannäherung zuverlässig berechnet werden kann.

Eine Eigenschaftsanalyse des entwickelten Positions- und Ausrichtungsbestimmungssystems auf einem exemplarischen Rundkurs in München hat ergeben, dass 98 % der Messdaten weniger als $\pm 3,0\text{ m}$ von der tatsächlichen Absolutposition abweichen. Der Ausrichtungsfehler beträgt in 93 % der Fälle weniger als $\pm 2,0^\circ$. Diese Ergebnisse zeigen, dass durch das entwickelte Positionierungssystem die vom KQA gestellten Anforderungen zu einem hohen Prozentsatz erfüllt sind.

Durch den Positionsfilter kann die Zuverlässigkeit der Positions- und Ausrichtungsbestimmung gegenüber den ungefilterten DGPS-Daten deutlich gesteigert werden. Ein Inhalt nachfolgender Arbeiten kann sein, die Zuverlässigkeit durch die Hinzunahme zusätzlicher Sensoren weiter zu erhöhen. Hinsichtlich der Möglichkeiten zur Evaluierung wird vorgeschlagen, zusätzlich ein GPS-unabhängiges Referenzsystem einzusetzen, um auch in jenen Bereichen, in welchen das CPDGPS-gestützte Referenzsystem keine ausreichende Genauigkeit aufweist, eine Analyse der Positionierungssysteme durchführen zu können.

Abb. 4.15 zeigt, welche Auswirkungen die festgestellten Unschärfen bei der Positionsbestimmung auf die erwartete Akzeptanz des KQA beim Fahrer haben. Dazu ist in dieser Abbildung ein Akzeptanzkorridor (Definition siehe Kap. 4.1.2) eingezeichnet, dessen obere Grenze durch eine erwartete mittlere Verzögerung von $3,1\text{ m/s}^2$ bestimmt ist. Als untere Grenze des Akzeptanzkorridors wird eine maximal mögliche Bremsverzögerung von $8,8\text{ m/s}^2$ angenommen. Der Unschärfekorridor des KQA ergibt sich in Folge des Positions- und Ausrichtungs- bzw. Haltelinienfehlers von $\pm 5\text{ m}$ (Positionsfehler $\pm 3\text{ m}$, Ausrichtungs- bzw. Haltelinienfehler $\pm 2\text{ m}$) im gesamten Geschwindigkeitsbereich. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass ein Fahrer als Folge einer Warnung des KQA mit einer durchschnittlichen Verzögerung von -6 m/s^2 bis zur Haltelinie abbremst.

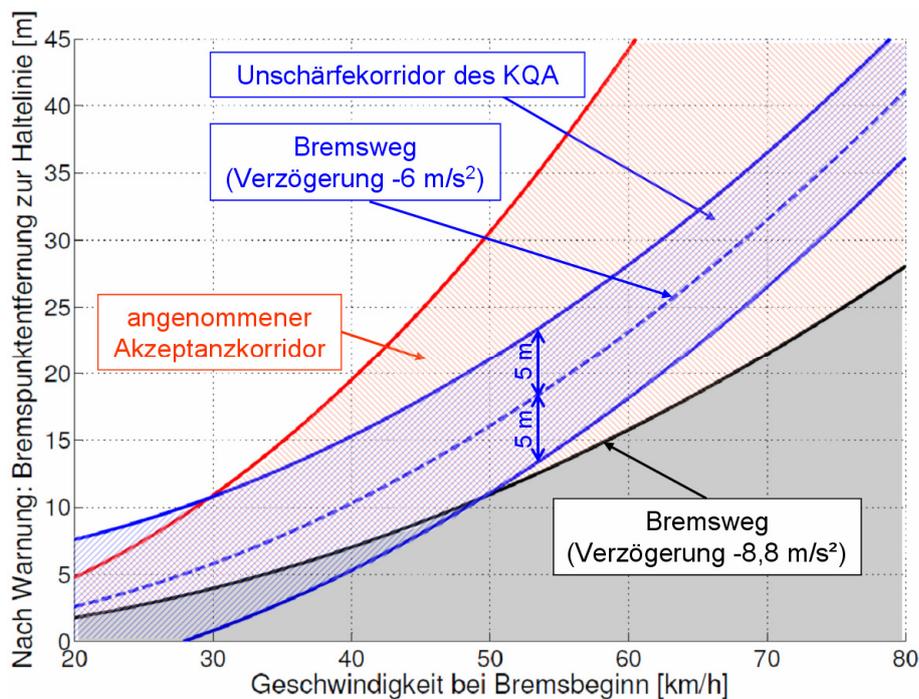


Abbildung 4.15: Unschärfekorridor des KQA mit einer Entfernungsabweichung von $\pm 5\text{ m}$ und aus Fahrerverhalten abgeleiteter Akzeptanzkorridor.

Es zeigt sich, dass ab einer Geschwindigkeit bei Bremsbeginn von 50 km/h der Unschärfe-korridor voll im angenommenen Akzeptanzkorridor liegt und deshalb ab dieser Geschwindigkeit eine volle Akzeptanz zu erwarten ist. Die Frage, ob sich diese Erwartung im realen Fahrbetrieb bestätigt, wird in Kap. 7 untersucht.

5 Kommunikation

Beim KQA wird neben der Bestimmung der Positions- und Fahrdynamikdaten der Fahrzeuge eine drahtlose Kommunikation zwischen den Fahrzeugen benötigt (siehe Kap. 3.3). Wichtige Eigenschaften des Kommunikationssystems mit Einfluss auf das Querverkehrsassistenzsystem sind Reichweite, Latenzzeit und Update-Rate. Im Folgenden werden die Anforderungen an das Kommunikationssystem definiert. Die genutzte Kommunikationstechnologie wird hinsichtlich ihrer Eigenschaften analysiert. Zusätzlich erfolgt ein Ausblick auf die Weiterentwicklung dieser Technologie für eine herstellerübergreifende Fzg-Fzg-Kommunikation.

5.1 Anforderungen des KQA

Die Definition der Anforderungen an das Kommunikationssystem wird aus Applikations-sicht durchgeführt. So soll der wartepflichtige Fahrer rechtzeitig vor einer potentiellen Kollision mit einem vorfahrtsberechtigtem Fremdfahrzeug gewarnt werden, so dass er das Fahrzeug noch selbst vor der Haltelinie zum Stehen bringen kann (siehe Kap. 3.2.1). Als Grundlage für die Abschätzung der hierfür erforderlichen Reichweite der Kommunikation wird von den Annahmen des zweiten Worst-Case-Szenarios der Ausrichtungsbestimmung in Kap. 4.1.1 ausgegangen. Kennzeichnend für dieses Szenario ist, dass beide Fahrzeuge ihre maximale Entfernung von der Kreuzung aufweisen, bei der bereits eine Situationsinterpretation erforderlich ist, um rechtzeitige Querverkehrsassistenz zu gewährleisten. Für das Fremdfahrzeug ergibt sich daher bei 10 bzw. 30 m/s eine Entfernung $s_{t_{Luecke},SP}$ von 84 bzw. 280 m zur Kreuzung. Für das Eigenfahrzeug beträgt die Entfernung $s_{Sitint,Start,SP}$ 44 bzw. 160 m. Bei einer 90° oder 270°-Winkel Kreuzung ergibt sich so eine geforderte Reichweite von 95 bzw. 323 m. Bei einer nicht 90° oder 270°-Winkel Kreuzung errechnet sich die erforderliche Reichweite gemäß

$$s_R = \sqrt{s_{F,SP}^2 + s_{E,SP}^2 - 2 \cdot s_{F,SP} \cdot s_{E,SP} \cdot \cos(\alpha)} \quad . \quad (5.1)$$

Damit ergibt sich beispielsweise für einen Schnittwinkel der Fahrbahnen von 135° oder 225° eine erforderliche Reichweite von 120 bzw. 409 m. Befinden sich mehrere Fahrzeuge im Kreuzungsbereich, reicht auch eine geringere Kommunikationsreichweite aus, da die Möglichkeit besteht, die Daten über das Multihop-Prinzip weiter zu reichen. Nachteilig am Multihop-Prinzip sind aber die stärkere Belastung des Kommunikationssystems und eine Erhöhung der Latenzzeit bei der Datenübertragung. Die Erhöhung der Latenzzeit kommt dadurch zustande, dass auf einem Kanal des Kommunikationssystems zu einem Zeitpunkt immer nur ein Fahrzeug Informationen versenden kann. Die Versendung der Informationen von mehreren Fahrzeugen erfolgt daher sequenziell.

Um die Positionsabweichungen des Fremdfahrzeugs möglichst gering zu halten, wird gefordert, dass der Einfluss der Latenzzeit auf die resultierenden Positionsabweichungen vernachlässigbar klein ist. Er wird daher im Folgenden auf $\pm 0,1$ m begrenzt. Daraus lässt

sich die zulässige Latenzzeit berechnen:

$$t_{Lat,zul} = \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta x_{F,Lat}|}{|a_{max}|}} \quad (5.2)$$

Die maximal zulässige Latenzzeit wird demnach umso kleiner, je instationärer das Fremdfahrzeug fährt. Wird als Worst-Case $a_{max} = 10 \text{ m/s}^2$ gesetzt, ergibt sich eine maximal zulässige Latenzzeit von 140 ms. Dies ist eine Anforderung an das Kommunikationssystem.

Das Kommunikationssystem besitzt eine begrenzte Kapazität, d.h. nur eine begrenzte Menge an Nachrichten kann pro Zeiteinheit über einen von mehreren Fahrzeugen gemeinsam genutzten Kanal gesendet werden. Da sich die Fahrzeuge diese Kapazität teilen, steht dem Einzelnen bei höherem Verkehrsaufkommen ein entsprechend kleinerer Anteil zu. Für das Querverkehrsassistenzsystem wird daher beispielsweise kein rein zyklisches, sondern ein weg- oder beschleunigungsabhängiges Update der Kommunikationsdaten vorgeschlagen. Dies bedeutet, je langsamer oder je weniger instationär ein Fahrzeug fährt, desto seltener muss es eine Nachricht aussenden. Stehende Fahrzeuge sollen aber trotzdem ihren aktuellen Fahrzustand regelmäßig übermitteln, um den umliegenden Fahrzeugen ein vollständiges Bild der Verkehrssituation zu ermöglichen. Diese Update-Rate soll aber deutlich geringer gewählt werden als bei den fahrenden Fahrzeugen.¹

Die Nachrichten des KQA sind Grundlage für die Funktion des Gesamtsystems. Nur auf Grundlage zuverlässiger und aktueller Nachrichten der anderen Fahrzeuge kann durch den KQA eine potentielle Erhöhung der Kreuzungssicherheit erzielt werden. So kann beispielsweise die KQA-Nachricht gegenüber nicht sicherheitsrelevanten Nachrichten mit einer hohen Priorität versehen werden.

5.2 Technologien

Im Folgenden wird der Stand der Technik in einem Überblick erläutert. Weiter erfolgt eine Darstellung der verwendeten Kommunikationslösung. Die Eigenschaften dieser Kommunikationslösung werden auf Grundlage von Messergebnissen bestimmt. Darüber hinaus werden die Arbeiten zu einem Konzept einer europäischen Adaption des WLAN-Standards 802.11p vorgestellt, auf welchem in nachfolgenden Forschungsprojekten aufgebaut werden kann.

5.2.1 Stand der Technik

In den USA, Europa und Japan wird seit mehreren Jahren an Lösungen für die Car2X-Kommunikation gearbeitet. Bisher wird keine einheitliche Kommunikationslösung angestrebt. Die Ursache hierfür besteht in unterschiedlichen Rahmenbedingungen, wie z.B. zulässigen Frequenzbereichen.

In Abb. 5.1 werden wichtige Projekte vorgestellt, welche in den verschiedenen Regionen zur Entwicklung von Kommunikationslösungen und darauf aufbauenden Applikationen durchgeführt werden. In den USA sind das die Projekte Vehicle Infrastructure Integration

¹ Klanner/Ehmanns/Winner (2006): ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz S. 1001.

² Suzuki (2007): DENSO Cooperative Safety System Development

Region	USA 	EU 	Japan 
Strategie	SAFETEA_LU	I2010 Intelligent Car Initiative	IT New Reform Strategy
Projekte	VII CICAS CAMP	COMeSafety C2C-CC NoW / PReVENT AKTIV / SIM-TD	DSSS AHS ASV Ubiquitous ITS
DSRC Trend	5,9 GHz DSRC/WAVE (IEEE 802.11p/1609)	5,9 GHz DSRC/WAVE (IEEE 802.11p vEU)	5,8 GHz DSRC (ARIB T-75)

Abbildung 5.1: Aktuelle Aktivitäten in den USA, Europa und Japan hinsichtlich der Entwicklung und Implementierung von Kommunikationslösungen².

(VII), Cooperative Intersection Collision Avoidance System (CICAS) und Collision Avoidance Metrics Partnership (CAMP). Das Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) befasst sich im Augenblick mit der Spezifizierung und Verabschiedung eines neuen WLAN-Standards IEEE802.11p. Dieser Standard ist lizenzfrei und ausschließlich für die Car2X-Kommunikation reserviert. Der reservierte Frequenzbereich liegt, wie aus Abb. 5.2 ersichtlich, zwischen 5,850 und 5,925 GHz.

Um einerseits eine erhöhte Wirksamkeit und andererseits eine größere Wirtschaftlichkeit des Kommunikationssystems zu erreichen, ist eine möglichst weite Verbreitung der Technologie wichtig. In Europa hat sich daher zur Beschleunigung der Einführung das Car to Car Communication Consortium (C2C-CC) gebildet, welches auf Betreiben europäischer Automobilhersteller zustande gekommen ist. Aufgabe dieses Konsortiums ist die Definition von Standards für die eingesetzte Kommunikation als Voraussetzung für eine schnelle und effektive Markteinführung. Das ins Auge gefasste Frequenzband liegt bei 5,885 bis 5,905 GHz (Part 1 in Abb. 5.2).

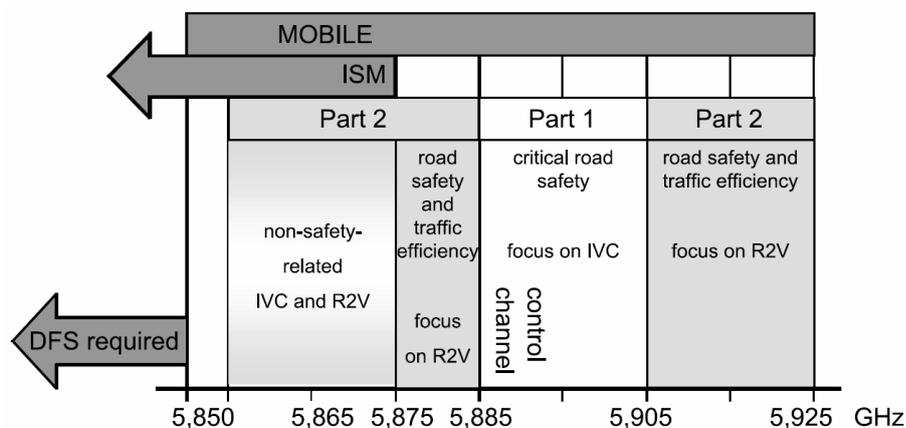


Abbildung 5.2: Adressierte Frequenzbänder für den WLAN-Standard IEEE802.11p³.

Projekte, die sich auf Grundlage der Arbeiten des C2C-CC mit der weiterführenden Spezifikation und Implementierung der Kommunikation sowie darauf aufbauender Systeme befassen, sind Communications for Electronical Safety (COMeSafety), Network on Wheels (NoW), Preventive and Active Safety Applications (PReVENT), Adaptive und kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr (AKTIV) und Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland (SIM-TD).

In Japan laufen die drei Projekte Advanced Cruise-Assist Highway Systems (AHS), Advanced Safety Vehicles (ASV) und Driving Safety Support System (DSSS) parallel zueinander. Eine projektübergreifende Kommunikation ist für 2008 geplant. Das zu Grunde liegende Frequenzband liegt bei 5,77 bis 5,85 GHz.

In den USA sind bei 900 MHz und in Japan bei 700 MHz zusätzliche Frequenzbänder reserviert. In Deutschland werden im Rahmen des Teilprojekts Cooperative Cars (CoCar) im nationalen Förderprojekt AKTIV die Möglichkeiten einer Nutzung von Mobilfunknetzen für die Car2X-Kommunikation untersucht.⁴

5.2.2 Verwendete Technologie (WLAN-Standard 802.11b)

Im Augenblick sind in Europa noch keine der adressierten Kommunikationslösungen verfügbar, so dass für die Untersuchungen des KQA der WLAN-Standard 802.11b verwendet wird. Dieser liegt im 2,4 GHz Band mit einer zulässigen Sendeleistung von 100 mW und einer maximalen Übertragungsrate von 54 Mbit/s. Die verwendete Hardware kommt auch im Projekt PReVENT zum Einsatz.



Abbildung 5.3: Messaufbau zur Analyse des WLAN-Standards IEEE802.11b.

Zur Analyse dieser Kommunikationslösung wurden Messfahrten durchgeführt. Das Ziel der Analyse bestand darin zu ermitteln

1. welchen Einfluss die Entfernung und Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuge auf die Datenübertragung haben.

³ Hess (2006): Frequency spectrum for its status report of July 2006.

⁴ BMWi (2006): Aktiv - gemeinsam die Zukunft erfahren.

2. welche Sendereichweiten und Verfügbarkeit des WLAN gewährleistet werden kann.

Bei den Messfahrten bestand Sichtverbindung zwischen den Kommunikationspartnern. Als Messgrößen wurden die Fahrzeuggeschwindigkeiten, die Positionen der Fahrzeuge, die Stärke und das Rauschen des empfangenen WLAN-Signals sowie die Anzahl der gesendeten Pakete und Paketfehler gewählt.

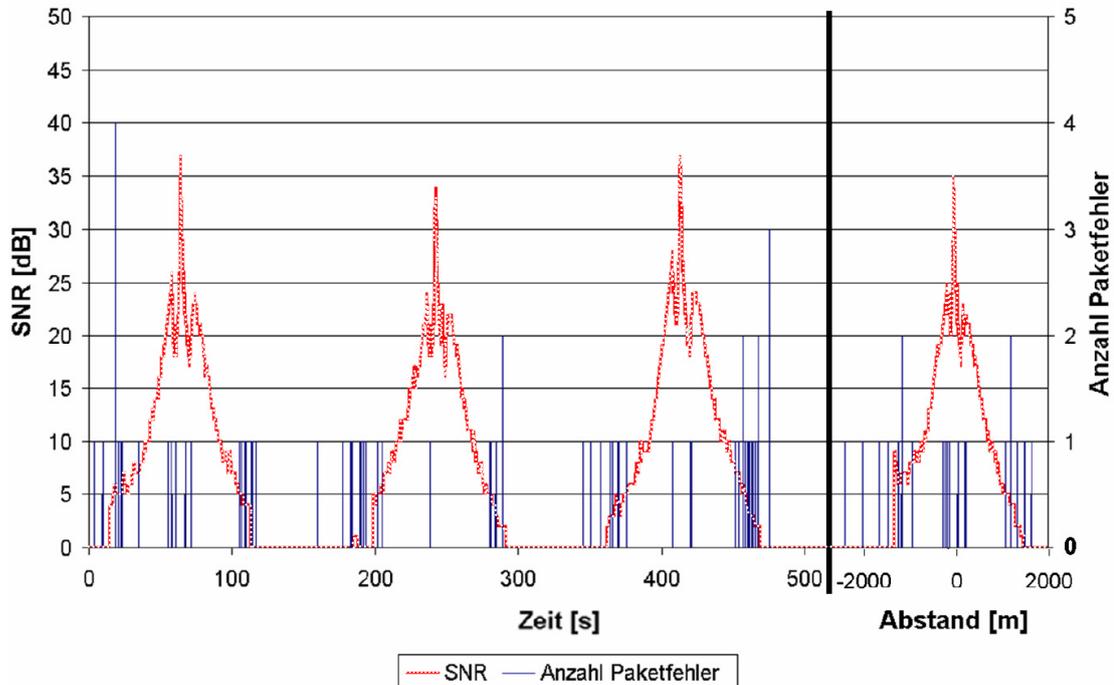


Abbildung 5.4: Entgegenkommende Fahrzeuge mit einer Relativgeschwindigkeit von 100 km/h (vier Begegnungen).

Aus den Messgrößen werden die Relativgeschwindigkeit, die Entfernung, der Signalausgangsabstand (Signal to Noise Ratio (SNR)) und die Paketfehlerrate bestimmt. Das SNR entspricht dem Verhältnis von Signalstärke zum Rauschniveau des empfangenen WLAN-Signals. Die Messdatenaufzeichnung erfolgte mit einer Update-Rate von 1 Hz. Der Messaufbau ist in Abb. 5.3 dargestellt. Die WLAN-Antennen waren im rückwärtigen Bereich des Fahrzeugdachs angebracht.

Zum Startzeitpunkt einer jeden Messung waren die Fahrzeuge soweit von einander entfernt, dass sie nicht in Funkkontakt standen. Bei den Messfahrten fuhren sie parallel aneinander vorbei. Die Annäherung erfolgte mit jeweils konstanter Geschwindigkeit von 30 bis 200 km/h . Die Relativgeschwindigkeit lag dementsprechend im Bereich von 60 bis 400 km/h .

In Abb. 5.4 werden das SNR und die Anzahl der Paketfehler bei einer Relativgeschwindigkeit von 100 km/h dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass bei einem SNR kleiner 10 dB und einer starken Schwankung des SNR gehäuft Signalfehler auftreten. Auch bei den anderen Relativgeschwindigkeiten ergeben sich ähnliche Resultate. Daher wird für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation empfohlen, erst ab einem $SNR \geq 10 \text{ dB}$ eine WLAN-Verbindung für die Datenübermittlung zu nutzen.

Inwieweit die festgestellten Paketfehler aus Applikationssicht einen Einfluss auf die Übertragungsqualität haben, wird in Kap. 5.2.3 noch genauer analysiert.

In Abb. 5.5 ist das SNR logarithmisch über dem Abstand vor und nach der Vorbeifahrt dargestellt. Die Relativgeschwindigkeit betrug 100 km/h . Das maximale SNR liegt bei 38 dB .

Die durchgezogene Linie entspricht der theoretischen Abnahme der Empfangsleistung P_e über dem Abstand s unter Berücksichtigung der Freiraumdämpfung L_b , der Sendeleistung P_s sowie dem Empfangs- G_e und Sendegewinn G_s der Antenne⁵:

$$P_e = P_s + G_s + G_e - L_b \text{ [dBm]} \quad (5.3)$$

Die Freiraumdämpfung errechnet sich unter Berücksichtigung der Wellenlänge λ aus:

$$L_b = 10 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot s / \lambda)^2 \text{ [dB]} \quad (5.4)$$

In Abb. 5.5 wird die Differenz aus Empfangsleistung P_e und dem Empfangsrauschen P_r dargestellt.

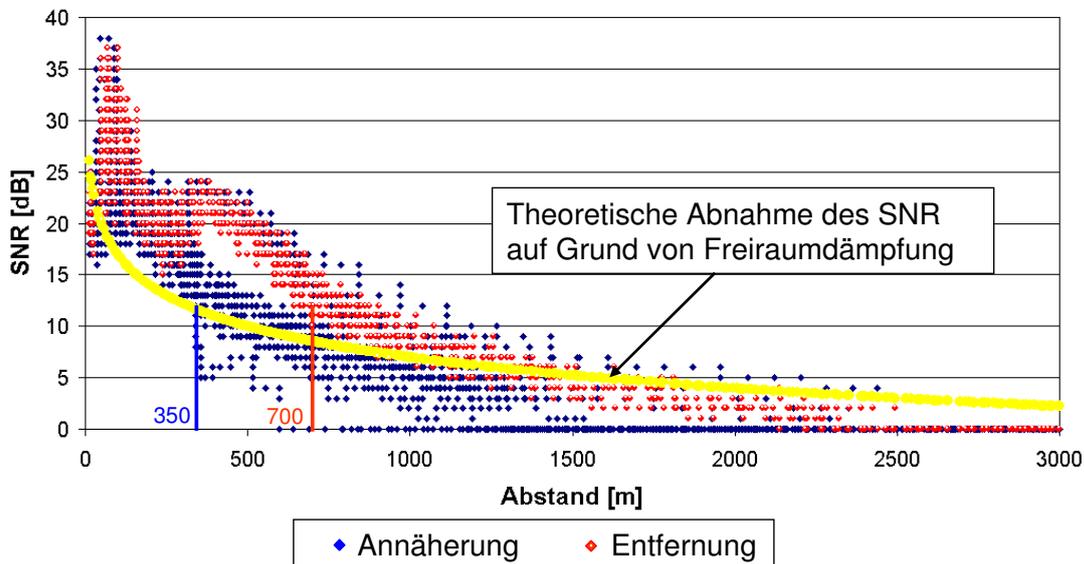


Abbildung 5.5: SNR der Kommunikation zweier entgegenkommender Fahrzeuge mit 100 km/h Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit von deren Abstand (10 Begegnungen).

Die Messergebnisse zeigen, dass bei Abständen von mehr als 600 m die Messpunkte dem theoretischen Verlauf folgen. Deutliche Abweichungen der Messkurve vom theoretischen Verlauf zeigen sich hingegen bei einem Abstand kleiner als 600 m . Folgende Effekte sind zu beobachten:

- Der Abstand bei Erstkontakt (Annäherung) und einem $SNR \geq 10 \text{ dB}$ liegt bei rund 350 m . Beim Signalabriss (Entfernung) hingegen liegt der Abstand bei rund 700 m . Demnach ist bei der Annäherung die Reichweite nur halb so groß, wie wenn sich die Fahrzeuge voneinander entfernen.
- Bei einem Abstand kleiner als 350 m treten starke Schwankungen von (über 20 dB) im SNR auf.

⁵ N.N. (2004): Fahrzeugkommunikation, Ortung, Navigation und Zielführung.

Gründe für die unterschiedlichen Reichweiten liegen möglicherweise in der geringen Updaterate t_{Update} der Messdaten mit 1 Hz und in der Antennenposition auf dem Fahrzeugdach.

Der Einfluss der geringen Abtastrate auf die Reichweitenbestimmung d_{Reiwei} errechnet sich aus:

$$d_{Reiwei} = v_{rel} \cdot t_{Update} \quad (5.5)$$

Unter der Annahme einer Relativgeschwindigkeit v_{rel} von 100 km/h liegt damit d_{Reiwei} bei rund 28 m. Dies entspricht aber nur 8 % von der Entfernung bei Erstkontakt.

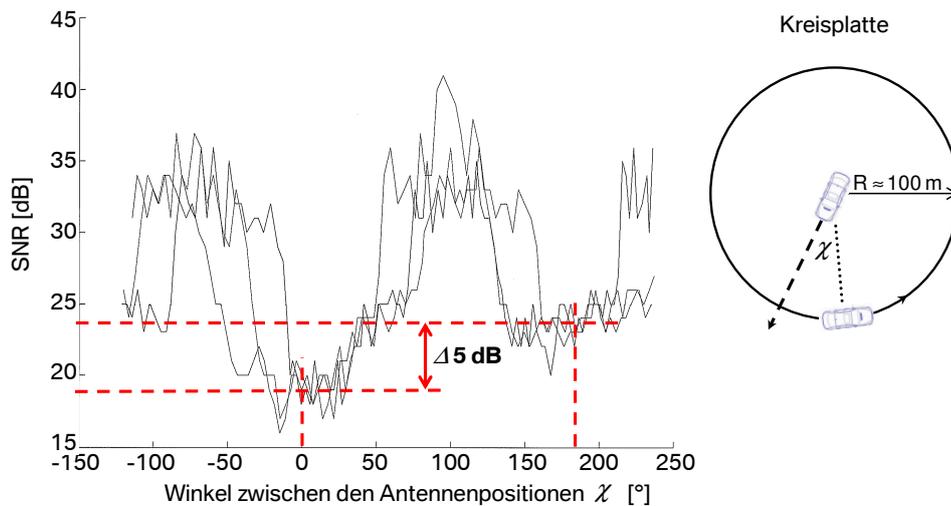


Abbildung 5.6: Antennencharakteristik.

Der Einfluss der Antennenposition auf dem Fahrzeugdach wurde in weiteren Messfahrten genauer betrachtet. Hierzu wurden Messfahrten auf einer Kreisplatte durchgeführt. Die WLAN-Antennen wurden in derselben Weise wie bei den ersten Messfahrten, das heißt im rückwärtigen Bereich des Fahrzeugdachs positioniert. Wie in Abb. 5.6 dargestellt, stand das eine Fahrzeug in der Mitte der Kreisplatte. Das zweite Fahrzeug umkreiste dieses Fahrzeug mit einem konstanten Abstand von 100 m und einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h. Bei den Messfahrten bestand Sichtverbindung. Als Messgrößen wurden die Positionen der Fahrzeuge sowie die Stärke und das Rauschen des empfangenen WLAN-Signals aufgezeichnet. Aus den Messgrößen wurden der Winkel χ und der SNR bestimmt. Der Winkel χ entspricht dem Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse des in der Mitte stehenden Fahrzeugs und der Fahrzeugquerrachse des umkreisenden Fahrzeugs. Befindet sich das umkreisende Fahrzeug genau vor dem stehenden Fahrzeug so ist χ gleich 0° . Befindet es sich genau hinter dem stehenden Fahrzeug so ist χ gleich 180° .

In Abb. 5.6 wird für drei Umkreisungen das SNR über dem Winkel χ dargestellt. Das Messergebnis zeigt, dass bei χ gleich 0° ein SNR von 19 dB und bei χ gleich 180° von 24 dB vorlag. Dies entspricht einem Delta von 5 dB. Der Unterschied ist wohl dadurch zu erklären, dass das Fahrzeugdach einen Teil der Funkstrahlen absorbiert und einen anderen Teil wegreflektiert.

Als weiteres Ergebnis zeigt sich, dass durchschnittlich dann ein höherer SNR vorliegt, wenn sich das umkreisende Fahrzeug neben und nicht vor oder hinter dem stehenden

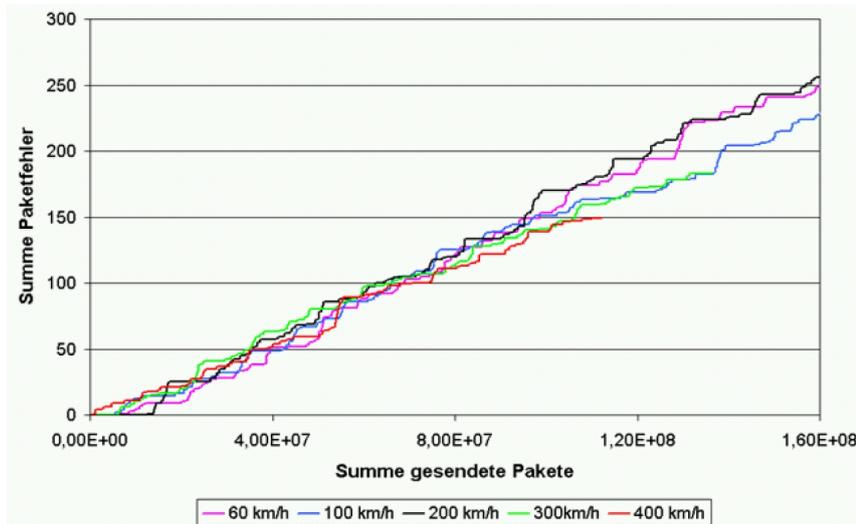


Abbildung 5.7: Paketfehler der Kommunikation zweier entgegenkommender Fahrzeuge mit 100 km/h Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der gesendeten Pakete (10 Begegnungen).

Fahrzeug befindet. Dies lässt sich dadurch erklären, dass für eine gute Kommunikation ein Ground unter der Antenne benötigt wird. Als Ground fungiert hierbei das Fahrzeugdach. Als Schlussfolgerung sollten nahezu die gleichen Funkbedingungen vorliegen, wenn sich die WLAN-Antennen in der Mitte des Fahrzeugdachs befinden. Dies bestätigte sich auch bei weiteren Messfahrten auf der Kreisplatte.

Auch bei den anderen Relativgeschwindigkeiten zeigte sich eine ähnliche Abnahme des SNR über dem Abstand. Das maximale SNR streute zwischen 30 und 40 dB. Eine Abhängigkeit des SNR von der Relativgeschwindigkeit wurde nicht beobachtet. In Abb. 5.7 wird die Summe der gesendeten Paketfehler über der Summe der gesendeten Pakete bei verschiedenen Geschwindigkeiten dargestellt. Auch hierbei zeigte sich keine Abhängigkeit zwischen der Summe der Paketfehler und der Relativgeschwindigkeit. Für alle getesteten Geschwindigkeiten wurde innerhalb eines $\pm 10\%$ -Korridors eine mittlere Fehlerrate von $1,5 \cdot 10^{-6}$ ermittelt.

5.2.3 Verwendete Kommunikationslösung

Das Ziel der verwendeten Kommunikationslösung besteht im zuverlässigen Austausch von KQA-Nachrichten zwischen externen Steuergeräten in verschiedenen Fahrzeugen. Als externes Steuergerät kann beispielsweise die Autobox verwendet werden. Dieses Steuergerät bildet die Plattform für die Implementation des Gesamtsystems KQA (Kapitel 6). Die Anbindung an die verschiedenen CAN-Busse eines Fahrzeugs erfolgt über mehrere CAN-Karten. Dies ermöglicht den Zugriff auf die Messdaten der serienmäßig verfügbaren Fahrzeugsensoren und die Stellgrößen der über CAN ansteuerbaren Aktuatoren, wie beispielsweise der Bremse. Die Hardwarekonfiguration der verwendeten Kommunikationslösung wird in Abb. 5.8 dargestellt.

Neben den Fahrzeug-CAN-Bussen (FzgCAN) sind ein Kommunikations-PC sowie ein GPS-Empfänger über zwei weitere CAN-Busse (ComCAN und GPSCAN) an das externe Steuergerät angebunden. Der abstrakte Weg einer KQA-Nachricht vom ComCAN eines

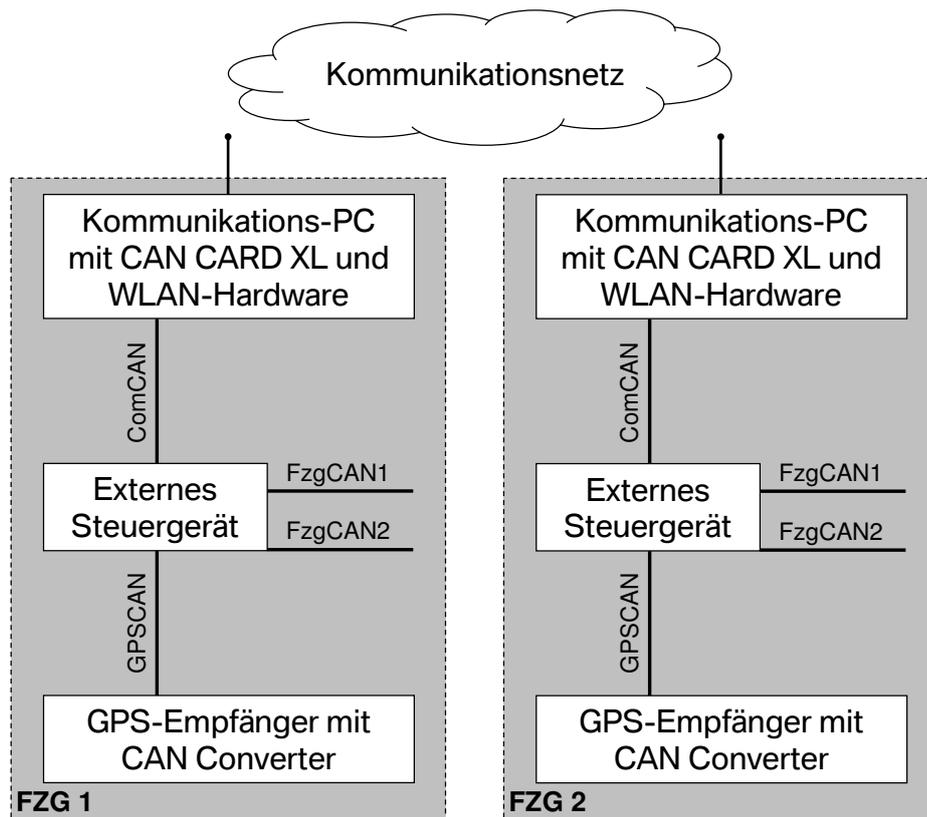


Abbildung 5.8: Hardwarekonfiguration der verwendeten Kommunikationslösung.

Fahrzeugs zum ComCAN der anderen Fahrzeuge wird in Abb. 5.9 dargestellt.

Die KQA-Nachricht des sendenden externen Steuergerätes wird über eine CAN CARD XL dem Kommunikations-PC zur Verfügung gestellt. Über einen CAN CARD-Treiber und eine entsprechende CAN-Bibliothek wird die CAN-Hardware abstrahiert. Auf diese CAN-Hardware setzt das Softwaretool UltraCom auf. UltraCom wurde bei BMW entwickelt. Die Aufgaben von UltraCom bestehen in der

- Gruppierung von CAN-Nachrichten mit definierten CAN-IDs zu WLAN-Paketen.
- Addition einer definierten Zahl zu den CAN-IDs der einzelnen KQA-Nachrichten. Dies ermöglicht bei der Decodierung der KQA-Nachrichten eine einfache fahrzeug-spezifische Zuordnung der CAN-Nachrichten.
- Berechnung einer Checksumme.

Die Adressierung der Empfänger erfolgt im Header des WLAN-Pakets mit der MAC Broadcasting-Adresse. Die WLAN-Pakete werden an den Capture-Treiber (z.B. WinPcap⁶) übergeben. Der Capture-Treiber abstrahiert die WLAN-Hardware, über welche die WLAN-Nachricht dem Kommunikationsnetzwerk zur Verfügung gestellt wird.

⁶ WinPcap ist eine als Open Source nutzbare Programm-bibliothek - ULR:<http://www.wikipedia.org>.

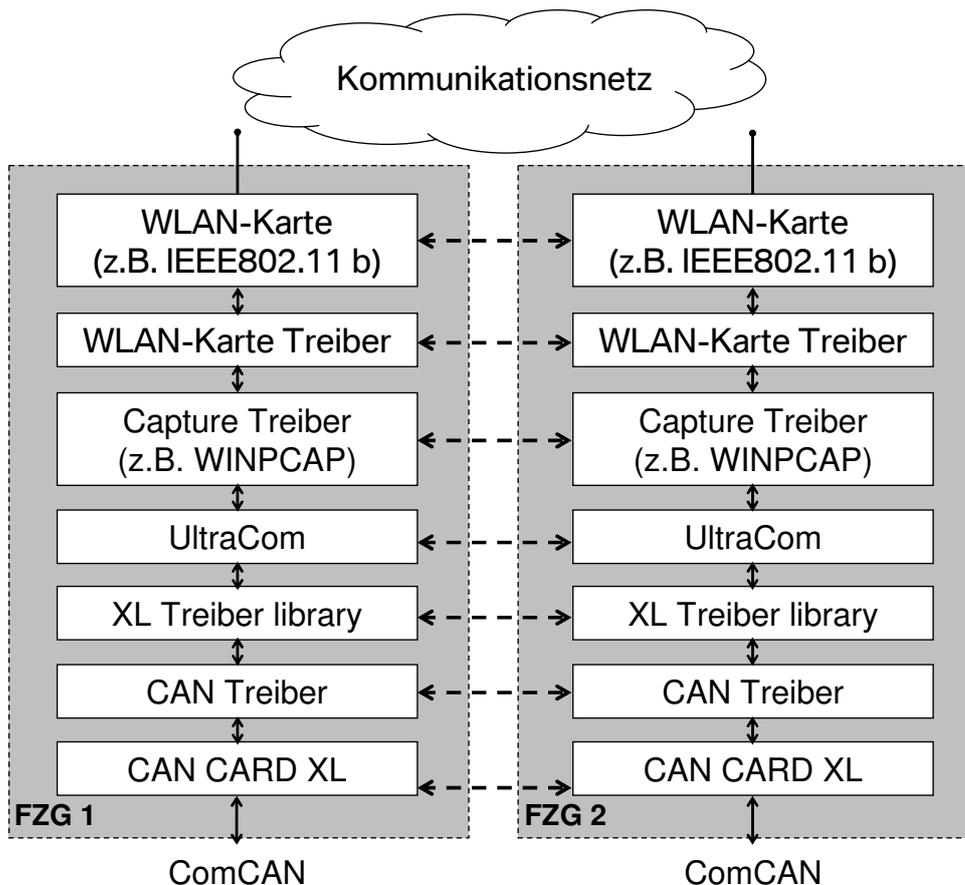


Abbildung 5.9: Abstrakter Weg vom ComCAN eines Fahrzeugs zum ComCAN eines anderen Fahrzeugs.

WLAN-Nachrichten

Der Dateninhalt der KQA-Nachrichten wird in Abb. 5.10 dargestellt. Dieser umfasst Zeit-, Positions-, Dynamik- sowie Zusatzinformationen. Die Zeitinformation basiert auf dem globalen Zeitstempel der GPS-Zeit. Neben diesen Informationen ist in jeder KQA-Nachricht eine Checksumme enthalten. Die Checksumme wird bei der Erstellung der KQA-Nachricht und bei der Decodierung im externen Steuergerät der anderen Fahrzeuge berechnet. Werden fehlerbehaftete Datenpakete festgestellt, werden diese verworfen.

Um sicherzustellen, dass die KQA-Nachrichten von ein und demselben Zeitschritt stammen, ist in jeder Nachricht ein Alive-Zähler enthalten. Um die Nachrichten einem Fahrzeug zuzuordnen, ist zusätzlich in jeder Nachricht eine TemporaryVehicleID abgespeichert. Diese permutiert über der Zeit um eine Verfolgbarkeit des Fahrzeugs aus Datenschutzgründen zu vermeiden. Zwischen den Updates der KQA-Nachrichten eines Fahrzeugs erfolgt eine Fortführung der Positionskoordinaten des Fahrzeugs auf Grundlage der übermittelten Bewegungsdaten der zuletzt empfangenen KQA-Nachrichten. Diese Fortführung ist zeitlich begrenzt, da die Zuverlässigkeit mit der Zeit sinkt.

Zeitinformationen			Positionsinformationen		
<i>Nachricht</i>	<i>Einheit</i>	<i>Größe</i>	<i>Nachricht</i>	<i>Einheit</i>	<i>Größe</i>
lokale Zeit	ms/Woche	32 Bit	Längengrad	rad	32 Bit
			Breitengrad	rad	32 Bit
			Varianz	m	10 Bit
			Qualität		12 Bit

Zusatzinformationen			Dynamikinformationen		
<i>Nachricht</i>	<i>Einheit</i>	<i>Größe</i>	<i>Nachricht</i>	<i>Einheit</i>	<i>Größe</i>
Fahrzeugtyp		4 Bit	Orientierung	°	8 Bit
Blinkerzustand		3 Bit	Geschwindigkeit	km/h	12 Bit
Bremspedal		2 Bit	Beschleunigung	m/s ²	12 Bit
Bremsdruck		2 Bit	Gierrate	1/s	12 Bit
FAS Warnung		4 Bit	Schwimmwinkel	°	8 Bit
Lenkradwinkel	°	16 Bit			
intendierte Route		6 Bit			

Abbildung 5.10: Dateninhalt der KQA-Nachricht mit Einheit und Datengröße.

Applikationsnahe Eigenschaftsanalyse

Um die Eigenschaften der verwendeten Kommunikationslösung zu analysieren, wurden Messfahrten durchgeführt. Das Ziel der Analyse bestand darin, zu ermitteln, welche Sendereichweite und Zuverlässigkeit die verwendete Kommunikationslösung gewährleistet.

Bei den Messfahrten bestand Sichtverbindung. Die WLAN-Antennen waren in der Mitte des Fahrzeugdachs angebracht. Als Messgrößen wurden die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Position der Fahrzeuge, der Kommunikationsstatus sowie die Latenzzeit verwendet. Der Kommunikationsstatus kann den Zustand „besteht“ oder „besteht nicht“ annehmen. Die Update-Rate kann den Zustand Rate von 100 ms „eingehalten“ oder „nicht eingehalten“ annehmen. Aus den Messgrößen wurde die Entfernung zwischen den Fahrzeugen bestimmt.

Wie bei den Messungen in Kap. 5.2.2 waren die Fahrzeuge zum Startzeitpunkt einer jeden Messung soweit von einander entfernt, dass sie nicht in Funkkontakt standen. Bei den Messfahrten fuhren die Fahrzeuge parallel aneinander vorbei. Die Annäherung erfolgte mit jeweils konstanter Geschwindigkeit von 60 km/h. Die Relativgeschwindigkeit betrug dementsprechend 120 km/h. Auf eine Variation der Geschwindigkeit wurde verzichtet, da bereits die in Kap. 5.2.2 aufgeführten Messfahrten keine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Leistungsfähigkeit der WLAN-Kommunikation ergaben.

In Abb. 5.11 werden die Abstände zwischen den Fahrzeugen, bei denen ein Funkkontakt bestand, dargestellt. Für diese Punkte wurde überprüft, ob die vorgegebene Update-Rate von 100 ms realisiert ist. Blau bzw. rot dargestellt sind die Zeitpunkte, an denen die Fahrzeuge aufeinander zu bzw. von einander weg fuhren.

Bis zu einer Entfernung von rund 1000 m bestand vor wie auch nach der Vorbeifahrt fast kontinuierlich Funkkontakt. Nur vereinzelt traten kurzfristig Funkaussetzer auf. Hinsichtlich der realisierten Update-Rate von 10 Hz zeigte sich, dass ab einem Abstand von 900 m die vorgegebene Update-Rate nicht eingehalten werden konnte. Bei einem Abstand weniger als 900 m traten hingegen nur vereinzelt Abweichungen von der vorgegebenen Update-Rate auf. Die Latenzzeit lag zwischen 8 und 20 ms.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Anforderungen des KQA durch das Kommunikationssystem zu einem hohen Prozentsatz erfüllt werden, wenn Sichtkontakt besteht. Im Nahbe-

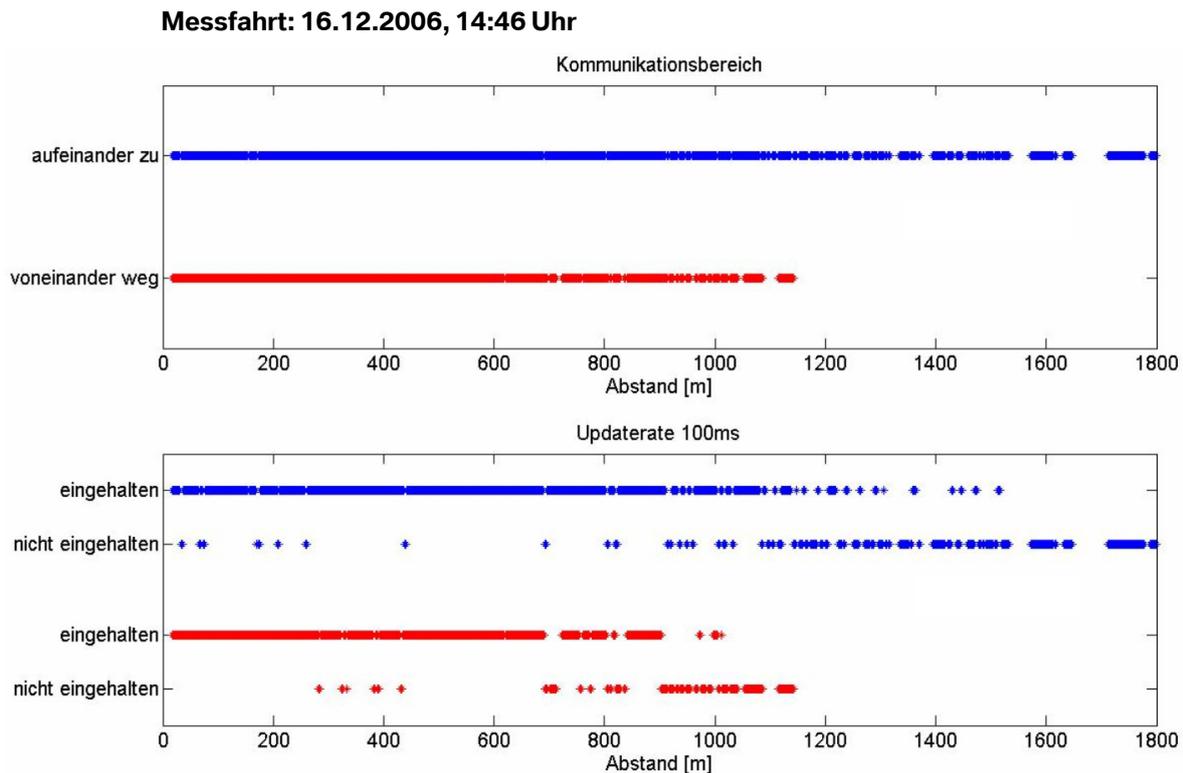


Abbildung 5.11: Ergebnis der applikationsnahen Analyse der eingesetzten Kommunikation - Kommunikationsreichweite und realisierte Update-Rate von 100 ms.

reich zeigte sich kein negativer Einfluss der Paketfehler auf die Übertragungsqualität. Die bei der Technologieanalyse bei kleinen Entfernungen zwischen den Fahrzeugen vereinzelt aufgetretenen Paketfehler sind demnach vernachlässigbar.

Weitere Messfahrten, bei denen Sichtverdeckungen vorlag, haben ergeben, dass das WLAN-Signal z.B. durch Gebäude stark gedämpft wird. Dies führt dazu, dass die gestellten Anforderungen nicht erreicht werden. Es ist daher erforderlich, in zukünftigen Kommunikationsstandards eine Lösung dieses Problems vorzusehen, um die Funktion des KQA zu gewährleisten. Eine Lösungsmöglichkeit besteht im so genannten One- oder Multi-Hop-Prinzip. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch hierauf nicht weiter eingegangen, da der Fokus auf der Applikationsentwicklung liegt.

Die Messfahrten ohne Sichtverdeckung zeigen, dass immer wieder Fehler in der Kommunikation auftreten. Um hierdurch resultierende Fehlfunktionen des KQA zu vermeiden, sind die Kommunikationsnachrichten zu plausibilisieren.

Eine Aufgabe nachfolgender Arbeiten wird darin bestehen, das Kommunikationssystem hinsichtlich seines Verhaltens bei einer großen Zahl von Kommunikationsteilnehmern zu analysieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden lediglich Messungen mit bis zu vier Fahrzeugen durchgeführt.

Um eine sichere und zuverlässige Kommunikation zwischen Fahrzeugen verschiedener Hersteller im Straßenverkehr zu ermöglichen, sind neben den bereits von der verwendeten Kommunikationslösung angegangenen Aufgaben weitere erforderlich. Zu diesen zählen:

- Vermeidung einer Überlastung des Kommunikationsnetzes bei hoher Teilnehmerzahl

(Congestion Control),

- situationsabhängige Anpassung der Sendeleistung,
- Möglichkeit des Kanalwechsels,
- Priorisierung von WLAN-Nachrichten,
- Zusammenfassung der von verschiedenen Applikationen abgesetzten Nachrichten (Message Dispatcher),
- Nachrichtenrouting mittels anderer Kommunikationspartner (Single- oder Multi-Hop),
- Schutz der Privatsphäre

Daher wird eine Erweiterung der Kommunikationslösung benötigt.

5.2.4 Zukünftige Kommunikationslösung (ACUp)

Im Rahmen des nationalen Förderprojektes AKTIV wird die Implementierung einer hoch-effizienten, offenen und flexiblen Kommunikationslösung realisiert⁷. Diese Kommunikationslösung baut auf dem aktuellen Stand des C2C-CC⁸ auf und soll die Anforderungen von Sicherheitsapplikationen wie dem KQA erfüllen. Die Lösung soll auch in Projekten wie dem Testfeld-Projekt SIM-TD zur Weiterentwicklung einer herstellerübergreifend nutzbaren, interoperablen Plattform eingebracht werden können. Die hierfür entwickelte Architektur wird in LASOWSKI⁹ und KOLLMEIER¹⁰ spezifiziert. Diese Architektur berücksichtigt die in Abschnitt 5.2.3 genannten noch zu lösende Aufgaben. Merkmale dieser Kommunikationslösung sind nach ZAHN¹¹:

- Erweiterungsfähige Architektur entsprechend aktuellem C2C-CC Diskussionsstand
- Nutzung des WLAN-Standards IEEE802.11p
- Offene modulare Struktur ermöglicht einfache Funktionserweiterung und die Integration alternativer Komponenten
- Bereitstellung eines Implementations- und Evaluierungsrahmens für die Entwicklung auf europäische Verhältnisse adaptierter Kommunikationsstandards.

Auf Grundlage dieser Kommunikationslösung wird eine herstellerübergreifende Kommunikationslösung bereitgestellt, wodurch eine Anforderung für eine Markteinführung kommunikationsbasierter Sicherheitsapplikationen gewährleistet ist.

⁷ Zahn (2007): ACUp - Aktive Communication Unit: C2C-CC konforme Kommunikationslösung für Aktive Sicherheit.

⁸ Baldessari et al. (2007): NoW - Network on Wheels Description of the Communication System Demonstrator.

⁹ Lasowski/Kollmeier (2007): AKTIV Communication Unit Documentation.

¹⁰ Kollmeier (2007): AKTIV Client API Spezifikation.

¹¹ Zahn (2007): ACUp - Aktive Communication Unit: C2C-CC konforme Kommunikationslösung für Aktive Sicherheit.

5.3 Diskussion

Das aktive Sicherheitssystem KQA stellt hohe Anforderungen an das Kommunikationssystem. Die Anforderungen für dieses System wurden definiert. Besonders große Bedeutung kommt hierbei der Datenübertragung mit einer hohen Zuverlässigkeit, geringen Latenzzeit und Überprüfbarkeit der Aktualität sowie der Bereitstellung von Informationen über etwaige Kommunikationsprobleme, zu. Wird erkannt, dass die Kommunikation nicht die gestellten Anforderungen erfüllt, wird der KQA deaktiviert. Dadurch wird verhindert, dass auf Grund fehlender oder falscher Kommunikationsdaten unnötige Assistenzmaßnahmen eingeleitet werden. Die aktuell verwendete Kommunikationslösung basiert auf dem WLAN-Standard IEEE802.11b. Durchgeführte Messfahrten haben gezeigt, dass die Anforderungen des KQA zu fast 100 % erfüllt werden, solange Sichtkontakt besteht. Liegt hingegen eine Sichtverdeckung im relevanten Wellenlängenbereich vor (z.B. durch Häuser), so ist die maximale Reichweite deutlich kürzer als gefordert. Es ist daher erforderlich, in zukünftigen Kommunikationsstandards eine Lösung für dieses Problem vorzusehen, um auch bei Sichtverdeckung die Funktion des KQA zu gewährleisten. Eine Lösungsmöglichkeit besteht im so genannten One- oder Multi-Hop-Prinzip.

6 Assistenz

Die Positions- und Fahrdynamikdaten des Eigenfahrzeugs und der Fremdfahrzeuge (siehe Kap. 3.3) stellen die Eingangsgrößen des Assistenzsystems dar. Auf Grundlage dieser Daten wird das Kollisionsrisiko bestimmt. Die genannten Daten sind mit unterschiedlichen Unschärfen behaftet. Bei der Bestimmung des Kollisionsrisikos werden Methoden aufgezeigt, diese Unschärfen zu berücksichtigen. Eine Berücksichtigung ist aber nur innerhalb bestimmter Grenzen möglich. Daher werden die Rahmenbedingungen aufgezeigt, welche für die Aktivierung des KQA erforderlich sind. Ein weiterer wichtiger Parameter ist das Fahrerverhalten, von dem abgeleitet wird, ob der Fahrer eine Assistenz benötigt. Die vollständige Assistenzstrategie sowie eine entwickelte Methodik zur Abstimmung der Parameter des Assistenzsystems werden dargestellt.

6.1 Kollisionsrisiko

Zur Beurteilung des Kollisionsrisikos sind eine räumliche und zeitliche Trajektorienprädiktion sowie die Bestimmung der Schnittpunkte der Trajektorien verschiedener Fahrzeuge erforderlich. Auf Grundlage der bestimmten Schnittpunkte wird die Kollisionswahrscheinlichkeit berechnet. Dabei ist die Unschärfe der Eingangsdaten zu berücksichtigen.

6.1.1 Räumliche und zeitliche Trajektorienprädiktion

Grundlage für die Trajektorienprädiktion sind die Positions-, Ausrichtungs- und Fahrdynamikdaten der Fahrzeuge. Da die Daten der Fremdfahrzeuge auf Grund der Update-Rate und Latenzzeit der Datenübertragung i.d.R. von einem früheren Zeitpunkt stammen als sie im Eigenfahrzeug verarbeitet werden, erfolgt eine entsprechende Fortführung der Positionsdaten bis zum aktuellen Zeitpunkt.

Bei der räumlichen Trajektorienprädiktion wird nur eine Prädiktion in der x-y-Ebene durchgeführt. Die hierfür benötigte Umrechnung der Längen- und Breitengrade der Fahrzeugpositionen wird in Kap. 4.2.1 dargestellt. Auf eine Prädiktion in der z-Richtung wird verzichtet, da die Höheninformation bei GPS-basierten Positionierungssystemen i.d.R. systembedingt eine deutlich geringere Genauigkeit aufweist als in der x-y-Ebene.¹ Durch die Beschränkung auf die x-y-Ebene resultiert aber die Problematik, dass räumlich getrennte Fahrbahnen, z.B. an einer Brücke, fälschlicherweise als Kreuzung identifiziert werden. Zur Lösung dieser Problematik wird eine digitale Karte mit der Information über den Typ einer Fahrbahnüberschneidung eingesetzt (siehe Kap. 3.2.2). Somit wird sichergestellt, dass nur an einer realen Kreuzung eine Assistenz erfolgt. Als dritte Dimension wird bei der Trajektorienprädiktion die Zeit berücksichtigt.

¹ Köhne/Wößner (2007): Navstar GPS.

Transformation - Fremdfahrzeugkoordinaten in Eigenfahrzeugkoordinatensystem

Als Grundlage für die Trajektorienprädiktion wird jedes Fahrzeug mit einem fahrzeugfesten Koordinatensystem verbunden. Die jeweilige x-Achse zeigt in Fahrzeuglängsrichtung. Der Ursprung jedes Koordinatensystems liegt im Mittelpunkt der Projektion des das Fahrzeug umschreibenden Rechtecks auf eine Ebene senkrecht zur Erdbeschleunigung.

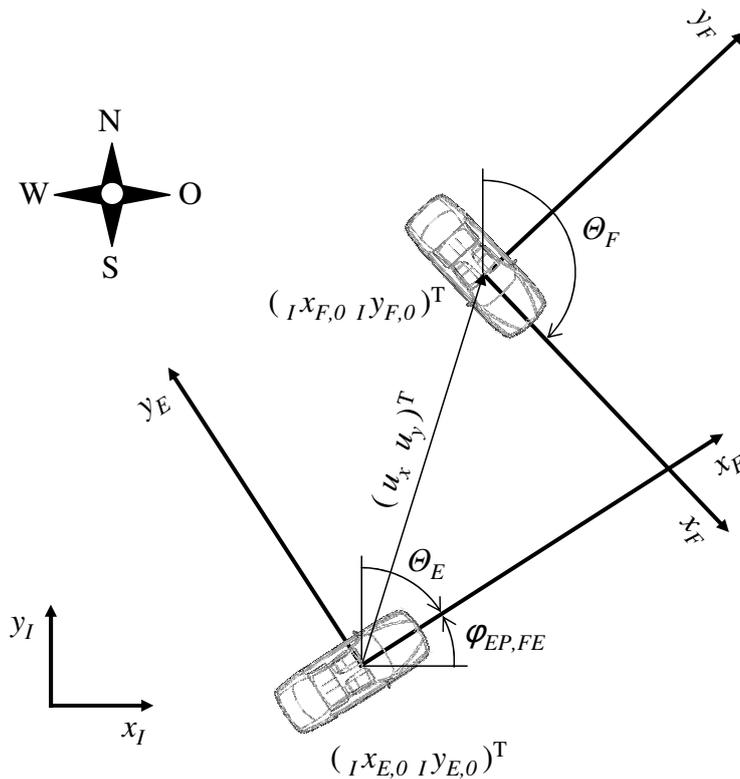


Abbildung 6.1: Darstellung des Ursprungs des Fremdfahrzeugkoordinatensystems im Eigenfahrzeugkoordinatensystem.

Als Bezugssystem für die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit wird das Eigenfahrzeugkoordinatensystem (EKS) verwendet. Daher werden die Koordinaten des Fremdfahrzeugs in das EKS transformiert (siehe Abb. 6.1). Hierzu wird der Abstandsvektor $(u_x \ u_y)^T$ zwischen den Ursprüngen des Fremdfahrzeugkoordinatensystems $(I x_{F,0} \ I y_{F,0})^T$ und des EKS $(I x_{E,0} \ I y_{E,0})^T$ auf Basis der Absolutpositionen der Fahrzeuge bestimmt. Die Vektoren $(u_x \ 0)^T$ und $(0 \ u_y)^T$ spannen ein Koordinatensystem auf, dessen Ursprung in den Ursprung des EKS gelegt wird. Dieses Koordinatensystem wird um den Winkel $\varphi_{EP,FE} = -(\Theta_E - 90^\circ)$ gedreht. Als Ergebnis liegt der Ursprung des Fremdfahrzeugkoordinatensystems (FKS) im EKS $(E x_{F,0}, E y_{F,0})$ vor:

$$\begin{pmatrix} E x_{F,0} \\ E y_{F,0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_{EP,FE}) & \sin(\varphi_{EP,FE}) \\ -\sin(\varphi_{EP,FE}) & \cos(\varphi_{EP,FE}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}$$

Definition des potentiell kritischen Bereichs

Ausgangspunkte für die Trajektorienprädiktion sind die Ursprünge der fahrzeugfesten Koordinatensysteme und die Ausrichtung der Fahrzeuge. Ein Problem bei der räumlichen Trajektorienprädiktion besteht dabei darin, dass die Ausrichtungen der Fahrzeuge für die Prädiktion der Trajektorien ggf. nicht geeignet sind. Eine solche Situation liegt beispielsweise vor, wenn ein Fahrzeug bei der Kreuzungsannäherung einem Hindernis ausweicht und damit die Fahrzeugausrichtung stark, d.h. um mehr als $\pm 5^\circ$, von der Fahrbahnausrichtung abweicht. Wie in Kap. 4.1.1 abgeschätzt, resultiert ein solcher Ausrichtungsfehler je nach Entfernung zur Kreuzung in großen resultierenden Längsrichtungsfehlern des anderen Fahrzeugs. Würde eine Trajektorienprädiktion hinsichtlich der Ausrichtung nur auf die Fahrzeugausrichtung zurückgreifen, führt dies u.U. zu einer sehr unzuverlässigen Position des Schnittpunkts der Trajektorien. Als Lösung dieser Problematik wird die Trajektorienprädiktion in zwei Phasen unterteilt:

1. Phase: Kreuzungsferner Bereich
2. Phase: Kreuzungsnaher Bereich

Die Grenze zwischen den beiden Bereichen wird durch den Parameter Entfernung zum kritischen Bereich festgesetzt. Im Fernbereich wird die Trajektorie des Fahrzeugs durch den Verlauf der Fahrbahn vorgegeben. Im Nahbereich ist die Trajektorie durch die Dynamik des Fahrzeugs gegeben. Daher wird im kreuzungsfernen Bereich die für die Prädiktion verwendete Ausrichtung rein aus einer digitalen Karte entnommen. Diese Ausrichtung entspricht dabei der Fahrbahnausrichtung. Im Nahbereich wird hingegen die vom Positionsbestimmungssystem bestimmte Ausrichtung für die Prädiktion verwendet. Zusätzlich erfolgt eine Berücksichtigung der vom Fahrzeug vorgelegten Krümmung. Grundlage hierfür ist eine Taylorreihenapproximation eines Kreises bis zum 3. Glied.

$${}_E y_E = \frac{1}{2} \cdot \kappa_E \cdot x_E^2 + \beta_E \cdot x_E \quad (6.1)$$

Es gibt zwei veränderliche Parameter: $\kappa_E(t)$ und $\beta_E(t)$, welche in jedem Zeitschritt t neu bestimmt werden. κ_E bezeichnet die vom Eigenfahrzeug aktuell vorgelegte Krümmung und β_E dessen Schwimmwinkel. Mit den entsprechenden Parametern des Fremdfahrzeugs kann auch für dieses Fahrzeug ${}_F y_F$ berechnet werden.

Bei der Trajektorienprädiktion wird zunächst der Schnittpunkt der x_F - mit der x_E -Achse bestimmt. Als Ergebnis liegt die x-Koordinate dieses Schnittpunkts ${}_F x_F$ vor (in Abb. 6.2 Punkt I). Für den Fall, dass die aktuell vom Fahrzeug vorgelegte Krümmung mit berücksichtigt wird, erfolgt nach Gleichung 6.1 die Berechnung des zugehörigen y-Werts ${}_F y_F$ (in Abb. 6.2 Punkt II). Andernfalls wird der y-Wert gleich Null gesetzt. Mit Hilfe einer Fixpunkt-Iteration² erfolgt die Bestimmung des Schnittpunkts der Trajektorien. In Abb. 6.2 wird das Vorgehen bildlich dargestellt. Im dargestellten Fall werden für beide Fahrzeuge die aktuell vorgelegten Krümmungen mit berücksichtigt.

² Bronstein et al. (2005): Taschenbuch der Mathematik - Numerische Lösung nichtlinearer Gleichungen mit einer Unbekannten S. 911.

Der Ablauf der Fixpunkt-Iteration ist:

1. Transformation der berechneten ${}^F x_F, {}^F y_F$ in das EKS,
2. Berechnung des ${}^E y_E$ -Werts auf der Trajektorie des Eigenfahrzeugs, auf Grundlage der x-Koordinate ${}^E x_E$ des Punktes $({}^F x_F, {}^F y_F)$ im EKS (in Abb. 6.2 Punkt III),
3. Transformation von ${}^E x_E$ und ${}^E y_E$ in das FKS,
4. Berechnung des ${}^F y_F$ -Wert auf der Trajektorie des Fremdfahrzeugs, auf Grundlage der x-Koordinate ${}^F x_F$ des Punktes $({}^E x_E, {}^E y_E)$ im FKS (in Abb. 6.2 Punkt IV),
5. Fortsetzung bei 1.

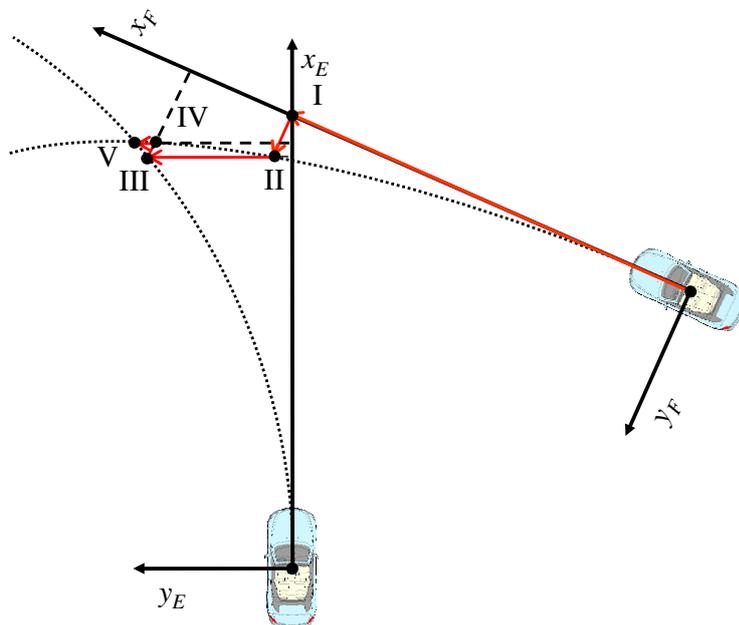


Abbildung 6.2: Fixpunkt-Iteration zur Bestimmung des Schnittpunktes der Trajektorien.

Die Iteration wird beendet, wenn der Abstand zwischen ${}^E y_E$ oder ${}^F y_F$ aus zwei aufeinander folgenden Iterationsschritten einen definierten Mindestabstand unterschreitet. Als Ergebnis liegt der Schnittpunkt der Trajektorien $({}^E x_{SP}, {}^E y_{SP})$ im EKS vor (in Abb. 6.2 Punkt V).

Um den Schnittpunkt der Trajektorien wird ein potentiell kritischer Bereich definiert (siehe Abb. 6.3). In die Größe des kritischen Bereichs fließen die Abmaße der Fahrzeuge sowie Zusatzinformationen wie z.B. das Vorhandensein eines Anhängers mit ein. Zusätzlich wird der kritische Bereich in Abhängigkeit des aktuellen Positionsfehlers vergrößert. Für das Eigenfahrzeug werden die Punkte bestimmt, an denen das Fahrzeug in den kritischen Bereich eintritt $({}^E x_{EKB, ein}, {}^E y_{EKB, ein})$ bzw. austritt $({}^E x_{EKB, aus}, {}^E y_{EKB, aus})$. Auf Grundlage dieser Punkte wird der Ein- und Austrittzeitpunkt $t_{EKB, ein}$ und $t_{EKB, aus}$ des Eigenfahrzeugs bestimmt. Es wird von $v_{x,E} = konst.$ ausgegangen.

Auf eine Berücksichtigung der Längsbeschleunigung wird verzichtet. Denn die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit stellt den Mittelweg zwischen den drei Möglichkeiten Verzögerung, Konstantfahrt und Beschleunigung dar. Auf Grundlage der Zeitpunkte

$t_{EKB, \text{ein}}$, $t_{EKB, \text{aus}}$ wird die Position des Fremdfahrzeugs zu diesen Zeitpunkten berechnet ($Fx_{F, EKB, \text{ein}}$, $Fy_{F, EKB, \text{ein}}$) und ($Fx_{F, EKB, \text{aus}}$, $Fy_{F, EKB, \text{aus}}$). Auch hierbei wird von einer konstanten Geschwindigkeit $v_{x, F}$ ausgegangen.

Der Abstand zwischen den berechneten Positionskoordinaten wird auf beiden Seiten um die Hälfte der Länge des Fremdfahrzeugs vergrößert. Die sich ergebenden Positionskoordinaten werden in das EKS transformiert: ($E^x_{F, EKB, \text{ein}}$, $E^y_{F, EKB, \text{ein}}$) und ($E^x_{F, EKB, \text{aus}}$, $E^y_{F, EKB, \text{aus}}$).

6.1.2 Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung

Neben den Positionsabweichungen, welche bereits in der Größe des kritischen Bereiches berücksichtigt sind, wird zusätzlich die Unsicherheit in der Querrichtung der prädierten Trajektorie mit berücksichtigt. Diese Unsicherheit entsteht beispielsweise durch Lenkbewegungen des Fahrers. Mit steigender Entfernung zum Fahrzeug wächst diese Unsicherheit an. Zur Modellierung dieser Unsicherheit wird ein Fahrächer verwendet. Wie in Abb. 6.3 dargestellt, hat der Fahrächer beim Fahrzeug die Breite b_{Fa} gleich Null. Mit steigender Entfernung öffnet sich der Fächer bis zu einer definierten maximalen Breite und verläuft dann schlauchförmig weiter.

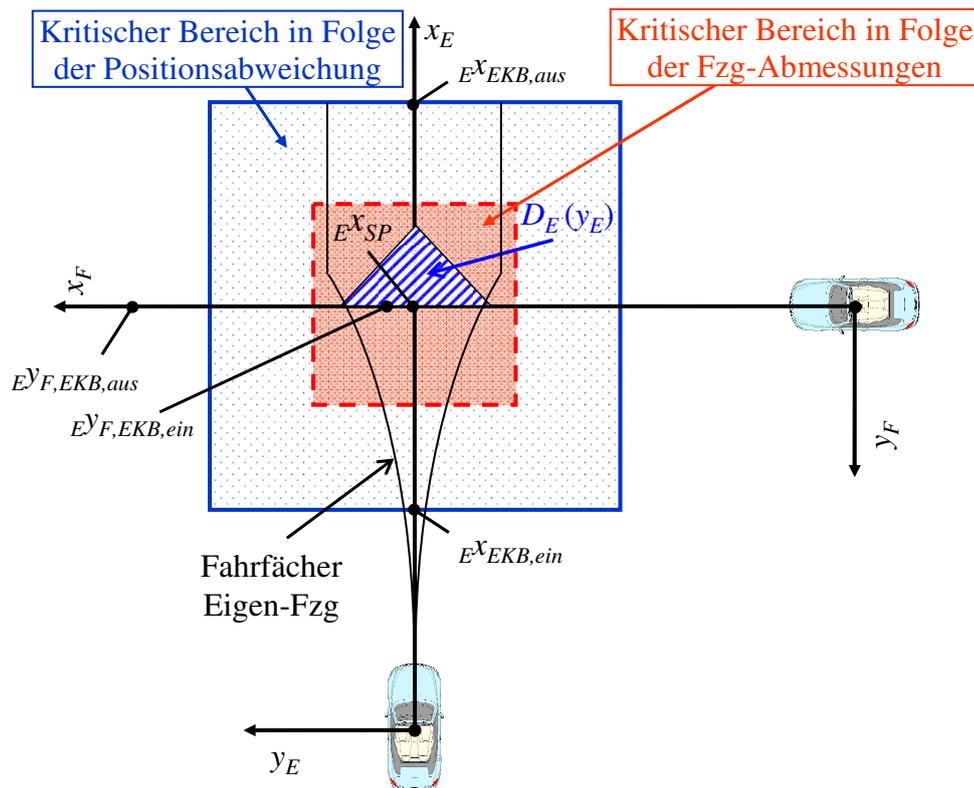


Abbildung 6.3: Beispiel für die Modellierung der Prädiktionsunsicherheit in Querrichtung des Eigenfahrzeugs durch einen Fahrächer mit Dreiecksverteilung. Darstellung der Positionen des Fremdfahrzeugs beim Ein- und Austrittszeitpunkt des Eigenfahrzeugs in den und aus dem kritischen Bereich (für $\alpha = 90^\circ$).

In die maximale Breite fließt, wenn bekannt, die Anzahl der Fahrstreifen einer Fahrtrichtung mit ein. Ansonsten wird von einem Fahrstreifen ausgegangen. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung innerhalb des Fahrfächers wird durch eine Dreiecksverteilung angenähert. Diese Modellierung der Prädiktionsunsicherheit wird für das Eigen- und Fremdfahrzeug durchgeführt.

Der Ablauf der Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

1. Auf Grundlage der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Eigenfahrzeugs in Querrichtung $D_E(y_E)$ und den Positionskordinaten des Fremdfahrzeugs beim Ein- bzw. Austritt des Eigenfahrzeugs in den bzw. aus dem kritischen Bereich ($EX_{F,EKB, ein}$, $EY_{F,EKB, ein}$ und $EX_{F,EKB, aus}$, $EY_{F,EKB, aus}$), wird in Abhängigkeit von EX_{SP} die Kollisionswahrscheinlichkeit $P(EX_{SP})$ berechnet. In Abb. 6.3 und 6.4 wird eine Kreuzungssituation beispielhaft dargestellt.

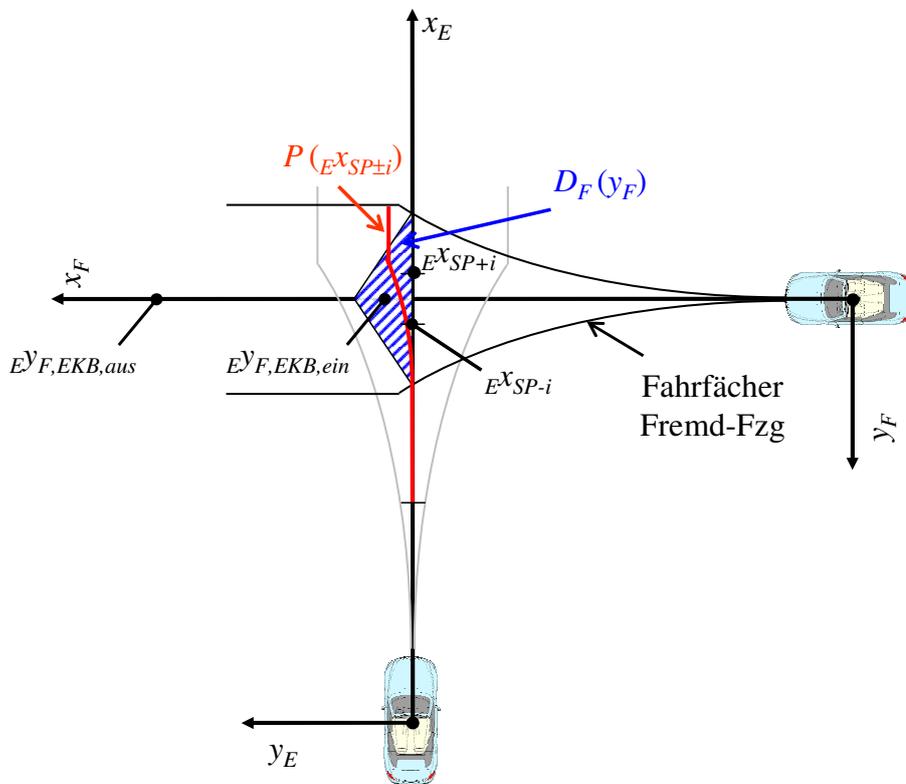


Abbildung 6.4: Beispielhafte Kreuzungssituation zur Berechnung der Gesamtkollisionswahrscheinlichkeit P_{Kol} auf Grundlage der Kollisionswahrscheinlichkeit $P(EX_{SP±i})$ und der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Fremdfahrzeugs in Querrichtung $D_F(y_F)$ auf Grund der Prädiktionsunsicherheit.

2. Die Aufenthaltsorte des Fremdfahrzeugs $EX_{F,EKB, ein}$, $EY_{F,EKB, ein}$ und $EX_{F,EKB, aus}$, $EY_{F,EKB, aus}$ werden als Integrationsgrenzen (IG) interpretiert. Der Aufenthaltsort mit dem geringeren y_E -Wert wird als untere IG_u und die andere als obere Integrationsgrenze IG_o festgelegt.

3. Integriert wird die Dreiecksverteilung für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Eigenfahrzeugs in Querrichtung. Als Ergebnis liegt die Kollisionswahrscheinlichkeit $P_{(Ex_{SP})}$ vor:

$$P_{(Ex_{SP})} = \int_{IG_u}^0 \left(\frac{y}{b_{Fa}^2(Ex_{SP})} + \frac{1}{b_{Fa}(Ex_{SP})} \right) dy + \int_0^{IG_0} \left(-\frac{y}{b_{Fa}^2(Ex_{SP})} + \frac{1}{b_{Fa}(Ex_{SP})} \right) dy \quad (6.2)$$

4. Da auch das Fremdfahrzeug eine Prädiktionsunsicherheit in Querrichtung aufweist, wird für eine definierte Anzahl von Entfernungsschritten i auf der x_E -Achse in gleicherweise die Kollisionswahrscheinlichkeit $P_{(Ex_{SP\pm i})}$ berechnet.
5. Die sich jeweils ergebende Kollisionswahrscheinlichkeit $P_{(Ex_{SP\pm i})}$ wird mit der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Fremdfahrzeugs in Querrichtung $D_F(y_F)$ an der jeweiligen Position $Ex_{SP} \pm i$ multipliziert.
6. Die Summe dieser Produkte ergibt die Gesamtkollisionswahrscheinlichkeit P_{Kol} .

6.2 Beurteilung der Rahmenbedingungen an der Kreuzung

Die zu bewertenden Rahmenbedingungen sind die Kreuzungsparameter sowie die Zustandsgrößen der Fahrzeuge. Die Bewertung dieser Rahmenbedingungen ist erforderlich, um Fehlwarnungen durch den KQA zu vermeiden, wenn eine nicht adressierte Kreuzung vorliegt bzw. die Zustandsdaten der Fahrzeuge stark fehlerbehaftet sind. Die Anforderungen an die Kreuzungsparameter und Zustandsdaten sind in Kap. 3.2.2 zusammengefasst. Im Rahmen der Beurteilung werden zunächst

1. das Vorliegen einer realen Kreuzung,
2. der Schnittwinkel der Fahrbahnen,
3. die Krümmung der Fahrbahnen sowie
4. die Verkehrsregelung

überprüft. Als Ergebnis dieser Überprüfung ist bekannt, ob eine adressierte Kreuzungsgeometrie vorliegt und ob für das Fahrzeug Wartepflicht besteht. In einem zweiten Schritt wird überprüft, ob die Anforderungen an die Positionsbestimmung und die Kommunikation sowie die mittlere Geschwindigkeit erfüllt sind. Die Anforderungen an die Positionsbestimmung werden insbesondere an den resultierenden Längsrichtungsfehler sowie die Entfernung zwischen dem wartepflichtigen Fahrzeug und der Haltelinie gestellt (siehe Kap. 4.1). Hinsichtlich der Kommunikation beziehen sich die Anforderungen insbesondere auf die Aktualität der Kommunikationsdaten. Als Ergebnis dieser Überprüfung ist bekannt, ob die aktuellen Zustandsdaten der Fahrzeuge eine zuverlässige Realisierung der Funktionen „Warnung“ oder „aktiver Eingriff“ zulassen. Die Ergebnisse der Beurteilungen werden bei der Entscheidung über die Ausgabe der Assistenz berücksichtigt.

6.3 Beurteilung des Fahrerverhaltens

Das Ziel der Beurteilung des Fahrerverhaltens besteht darin, zu erkennen, ob der wartepflichtige Fahrer die Verkehrssituation richtig einschätzt. Die Zuverlässigkeit dieser Beurteilung wird durch das instationäre Fahrverhalten des Fahrers bei der Kreuzungsannäherung erschwert.

6.3.1 Anhaltewunscherkennung

Im Rahmen der Entwicklung eines Stoppschildassistenten wurde eine Anhaltewunscherkennung entwickelt. Diese erkennt auf Grundlage der Zustandsdaten des Fahrzeugs beim letztmöglichen Warnzeitpunkt, ob der Fahrer an der Haltelinie anhalten wird oder nicht. Folgende Kriterien werden ausgewertet³:

- Geschwindigkeit sinkt: Das Kriterium ist erfüllt, wenn in einem definierten Zeitraum vor dem Warnzeitpunkt die Geschwindigkeit um einen Mindestbetrag sinkt.
- Beschleunigung negativ: Das Kriterium ist erfüllt, wenn die Beschleunigung in einem definierten Mindestzeitraum negativ ist.
- Bremspedal betätigt: Das Kriterium ist erfüllt, wenn das Bremspedal in einem definierten Betrachtungszeitraum betätigt wurde.
- Geschwindigkeit verringert: Das Kriterium ist erfüllt, wenn der Quotient aus der aktuellen Geschwindigkeit und der Maximalgeschwindigkeit in den letzten 150 m einen Schwellwert unterschreitet.
- Zuletzt Gas gegeben: Das Kriterium ist erfüllt, wenn die letzte Bremsbetätigung nach der letzten Gaspedalbetätigung erfolgt.

Diese Kriterien sind bei der Anhaltewunscherkennung des KQA noch um das Kriterium „Acceleration to Stop Line“ ($a_{x,TS}$) erweitert. Die $a_{x,TS}$ bezieht sich auf die notwendige Verzögerung, um noch vor der Haltelinie zum Stehen zu kommen:

$$a_{x,TS} = \frac{v_{x,E,0}^2}{-2 \cdot s_{E,H}} \quad (6.3)$$

Im Rahmen einer Fahrerverhaltensuntersuchung, auf die in Kap. 6.3.2 genauer eingegangen wird, wurde die $a_{x,TS}$ bei der Annäherung an Vorfahrtachten- und Rechts-vor-Links-Kreuzungen untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die $a_{x,TS}$ ein geeignetes Kriterium zur Erkennung eines Anhaltewunsches ist. Dies zeigt die kumulierte Verteilung der $a_{x,TS}$ zum letztmöglichen Warnzeitpunkt⁴ (siehe Abb. 6.5). So liegt die $a_{x,TS}$ betragsmäßig deutlich niedriger, wenn der Fahrer beabsichtigt anzuhalten.

An einem Stoppschild hat der Fahrer auf jeden Fall an der Haltelinie anzuhalten. Besteht bei einer Vorfahrtachten- oder Rechts-vor-Links-Kreuzung zwischen dem wartepflichtigen

³ Meitinger (2004): Fahrerabsichtserkennung - Beispiel Stoppschildassistent.

⁴ Annahmen zur Berechnung des letztmöglichen Warnzeitpunktes: Reaktionszeit 1 s, Bremsverzögerung des Fahrers -6 m/s^2 .

⁵ Rohrmüller (2007): Prädiktion des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Trajektorien bei der Kreuzungsassistenz.

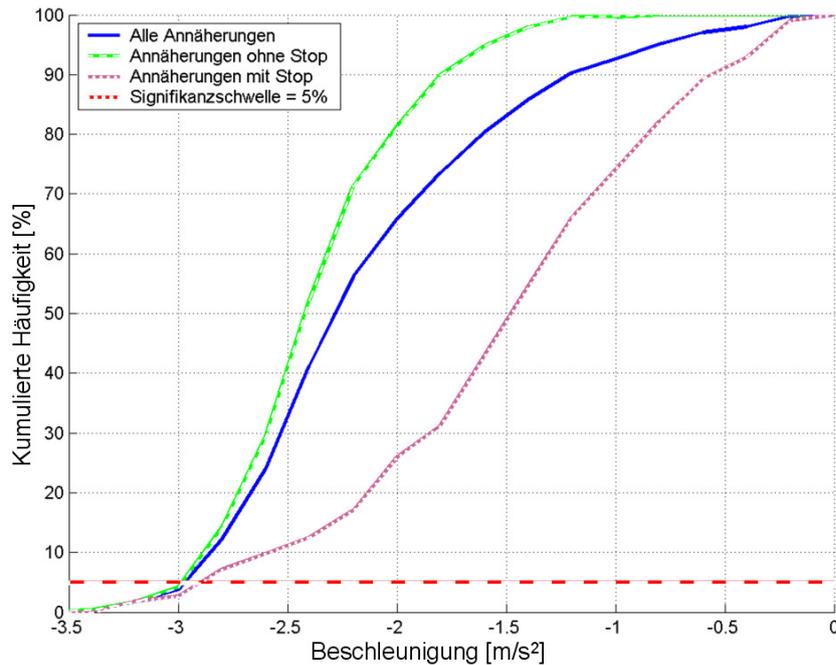


Abbildung 6.5: Kumulierte Verteilung der $a_{x,TS}$ zum letztmöglichen Warnzeitpunkt.⁵

und dem vorfahrtsberechtigten Fahrzeug am letztmöglichen Warnzeitpunkt ein hohes Kollisionsrisiko, liegt eine vergleichbare Situation wie beim Stoppschild vor. Dies bedeutet, der wartepflichtige Fahrer hat Vorfahrt zu gewähren und bei Kollisionsgefahr an der Haltelinie fast oder vollständig zum Stehen zu kommen.

Ein großer Unterschied zum Stoppschild besteht jedoch, wenn der wartepflichtige Fahrer an der Kreuzung abbiegen möchte. In diesem Fall werden das wartepflichtige und vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug u.U. nicht den gleichen Kreuzungsbereich passieren. Diese Situation liegt bei Rechtsverkehr beispielsweise vor, wenn für jede Fahrtrichtung ein eigener Fahrstreifen besteht, sich das vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug aus Sicht des wartepflichtigen Fahrzeugs von rechts annähert und das wartepflichtige Fahrzeug nach rechts abbiegen wird. In diesem Fall braucht das wartepflichtige Fahrzeug nicht an der Haltelinie zum Stehen zu kommen. Um in diesem Fall eine Fehlwarnung des KQA zu vermeiden, ist daher zusätzlich eine Abbiegewunscherkennung erforderlich.

6.3.2 Abbiegewunscherkennung

Um geeignete Kenngrößen zur Erkennung des Abbiegewunsches zu ermitteln, wurde eine Fahrerverhaltensanalyse durchgeführt. Als potentiell relevante Kenngrößen für die Erkennung eines Abbiegewunsches wurden der Zeitpunkt des Gaslösens und Bremsbeginns durch den Fahrer, Fremdeinfluss, Sichtverdeckung, Fahrertyp, Blinkerbetätigung und „Acceleration to Stop Line“ festgelegt.

Im Rahmen einer INVENT Studie über das Kreuzungsverhalten⁶, konnte gezeigt werden, dass der Zeitpunkt des Bremsbeginns vom Abbiegemanöver und der Kreuzungssituation

⁶ Vollrath et al. (2004): INVENT Kreuzungsverhalten.

abhängt. Eine Studie zum Stoppschildassistenten⁷ unterscheidet zusätzlich zwischen dem Moment des Gaslösen und dem Beginn der Bremsung. Diese Zeitpunkte werden beim KQA zur Definition des Beginns der Kreuzungsannäherung verwendet. Im Rahmen der Fahrerhaltensanalyse wurde gezielt nach einer Abhängigkeit dieser Zeitpunkte von der Art der Verkehrsregelung (Vorfahrtachten, Rechts-vor-Links), der Art des Kreuzungsknotens (X- oder T-Kreuzung) und der Art des Abbiegemanövers (Links, Kreuzen, Rechts) gesucht. Als Fremdeinfluss werden Vorderfahrzeuge, vorfahrtsberechtigter und wartepflichtiger Querverkehr sowie Fußgänger und Fahrradfahrer zusammengefasst. Der Fahrertyp wird nach sportlich, normal und passiv unterschieden.

Fahrerhaltensanalyse

Als Grundlage für die Fahrerhaltensanalyse wurden Messfahrten durchgeführt. Bei der Auswahl der Messstrecke wurde darauf geachtet, die im Rahmen der Unfallanalyse identifizierten häufigsten Unfallsituationen abzudecken (siehe Tab. 3.1). Insgesamt umfasst die Messstrecke acht Vorfahrtachten-Kreuzungen und 19 Rechts-vor-Links-Kreuzungen. Bei 13 Kreuzungen bestand eine Sichtverdeckung bis zur Haltelinie, bei acht bis 5 m vor der Kreuzung und bei jeweils drei bis 10 m bzw. 15 m vor der Kreuzung. In Summe wurde die Messstrecke von 15 Probanden befahren. Jeder Fahrertyp war vertreten. Rund die Hälfte der Strecke war den Probanden bekannt, die andere Hälfte nicht.

Es zeigte sich, dass bei Rechts-vor-Links-Kreuzungen etwa eine Sekunde später das Gas gelöst und circa eine halbe Sekunde später gebremst wurde als in Vorfahrtachten-Situationen. Bei der Betrachtung der Art des Knotens konnte kein Unterschied hinsichtlich des Zeitpunkts Gaslösen bzw. Bremsbetätigung ausgemacht werden. Hinsichtlich der Art des Abbiegemanövers zeigte sich ein späterer Annäherungsbeginn beim Kreuzen. In diesen Situationen wurde eine bis eineinhalb Sekunden später das Gas gelöst und vergleichbar später gebremst als beim Abbiegen. Bei Vorfahrtachten-Kreuzungen waren sich die Annäherungsverläufe beim Kreuzen und Abbiegen deutlich ähnlicher als die Annäherungsverläufe bei den Rechts-vor-Links-Kreuzungen.

Hinsichtlich der Blinkerbetätigung zeigte sich, dass der Blinker bei Rechts-vor-Links-Kreuzungen deutlich später gesetzt wurde. Auffällig war eine offensichtliche zeitliche Korrelation zwischen der Blinkerbetätigung und dem Bremszeitpunkt. Bei Vorfahrtachten-Kreuzungen wurde er etwa gleichzeitig mit dem Bremsbeginn gesetzt. An Rechts-vor-Links-Kreuzungen erfolgte das Setzen dagegen im Mittel zwei Sekunden später als der Bremsbeginn. Dies zeigte sich ebenfalls in der genannten INVENT Studie.

Als weiteres Ergebnis zeigte sich die Tendenz, dass der herannahende Querverkehr auf den Zeitpunkt des Gaslösen und Bremsbeginns keinen Einfluss hatte. Die vermutete Ursache besteht darin, dass zu diesen Zeitpunkten meist die Sicht zum Querverkehr noch behindert war. Hinsichtlich des Fahrertyps zeigte sich, dass der einzelne Fahrer für sich selbst im Schnitt auch kein konsistenteres Verhalten zeigt als verschiedene Fahrer untereinander.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Fahrerhaltensanalyse wurden für die Abbiegewunscherkennung die Kenngrößen Zeitpunkt des Gaslösen und Bremsbeginns, die Blinkerbetätigung sowie „Acceleration to Stop Line“ ausgewählt. Zusätzlich wird die Information des Navigationssystems hinsichtlich der empfohlenen Art des Abbiegemanövers an

⁷ Noszko (2005): Annäherung an Stoppkreuzungen S. 5ff.

der Kreuzung mit berücksichtigt. Der Einfluss von Vorderfahrzeugen wurde nicht weiter betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass sich das Fahrerverhalten in dieser Situation hauptsächlich auf eine der Kreuzung vorgelagerte Verkehrssituation bezieht. Befindet sich das Vorderfahrzeug schon in der Kreuzung, so wird davon ausgegangen, dass das Fahrerverhalten dem ohne Vorderfahrzeug gleicht. Grundlage zur Bestimmung der Kenngrößen sind die Zustandsdaten des Eigenfahrzeugs, die jedoch hinsichtlich der Bestimmung eines Abbiegewunsches eine hohe Unschärfe aufweisen. So lässt beispielsweise ein gesetzter Blinker mit großer Wahrscheinlichkeit auf einen Abbiegewunsch schließen, stellt aber keine 100 %ig zuverlässige Aussage dar. Auch das Ausbleiben des Blinkens ist kein sicheres Indiz dafür, dass nicht abgelenkt wird.

Umgang mit unscharfen Daten - Bayessches Netz

Im Umgang mit unscharfen Daten und unsicherem Wissen haben sich gerade Bayessche Netze⁸ als sehr geeignet erwiesen. Ein Bayessches Netz baut sich aus gerichteten azyklischen Graphen aus Knoten und Kanten auf. Jeder Knoten repräsentiert dabei eine Variable, die diskrete Zustände annehmen kann. Diese Zustände sind mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit behaftet. Die Kanten repräsentieren Abhängigkeiten zwischen den Knoten. Jedem Knoten ist eine Conditional Probability Table zugeordnet. Diese Tabelle beinhaltet die bedingten Wahrscheinlichkeiten, dass ein Kindknoten, abhängig vom Zustand seiner Elternknoten, einen bestimmten Zustand annimmt.

Ist der Zustand eines Knotens bekannt, so lassen sich aus ihm die bedingten Wahrscheinlichkeiten der restlichen Knoten ermitteln. Die bedingte Wahrscheinlichkeit berechnet sich nach dem *Satz von Bayes*:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (6.4)$$

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variable X eines Bayesschen Netzes berechnet sich aus:

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \text{Eltern}(X_i)) \quad (6.5)$$

Werden bei der Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeiten auch Abhängigkeiten von zeitlich vorausgegangenen Zeitschritten berücksichtigt oder sind die Eigenschaften des Netzes zeitlich veränderlich, wird von einem *Dynamischen Bayesschen Netz* gesprochen.

Vorteile Bayesscher Netze sind⁹:

- Umgang mit unsicherem Wissen:
Im Gegensatz zu einem Entscheidungsbaum, der harte ja/nein Entscheidungen fällt, trifft ein Bayessches Netz probabilistische Aussagen. Daher geht die Unsicherheit, die durch die unscharfen Eingangsgrößen gegeben ist, im Netz nicht verloren.
- Transparenz:
Im Gegensatz zu neuronalen Netzen ist beim Bayesschen Netz der aktuelle Zustand

⁸ Ein Überblick zu Bayesschen Netzen findet sich in Rüdener (2003): Einsatz probabilistischer Verfahren zur Entscheidungsfindung im RoboCup S. 7ff.

⁹ Rüdener (2003): Einsatz probabilistischer Verfahren zur Entscheidungsfindung im RoboCup S. 29f.

eines jeden Knotens jederzeit einsehbar. Dies ermöglicht eine einfachere und effektivere Analyse der Qualität bzw. Leistung des Netzes.

- Vorgabe von Startwerten für die Conditional Probability Table:
Vor dem Training lassen sich Vorgaben für die Conditional Probability Table machen und so Startwerte festlegen, die die Anzahl der benötigten Trainingsdaten reduzieren.
- Bedingte Wahrscheinlichkeit:
Bayessche Netze sind in der Lage vorwärts, d.h. vom Eltern- zum Kindknoten, wie rückwärts, d.h. vom Kind- zum Elternknoten, zu präzisieren, während beispielsweise bei neuronalen Netzen die Ein- und Ausgangsvariablen festgelegt sind.

Ein Nachteil von Bayesschen Netzen besteht darin, dass es aufwändig ist, die Struktur eines bestehenden Netzes zu ändern. Um diesen Nachteil zu beheben, kann ein *diagnostischer Ansatz* gewählt werden. Dies bedeutet, dass das Netz rückwärts modelliert wird. Hierdurch kann eine gute Erweiterbarkeit des Netzes und die Unabhängigkeit der Eingangsgrößen ermöglicht werden. Der Elternknoten wird dabei mit der zu präzisierenden Ausgangsvariablen belegt. Die Eingangsgrößen werden alle als Kindknoten der Ausgangsvariablen angelegt. Für die Kindknoten wird dabei gegenseitige Unabhängigkeit angenommen.

Prädiktion des Abbiegewunsches

Zur Prädiktion des Abbiegewunsches wurde für den KQA der diagnostische Ansatz gewählt. Die Zustandsvariable des Elternknotens ist mit dem Abbiegevorhaben belegt. Das Abbiegevorhaben kann drei verschiedene Zustände annehmen, wobei deren Wahrscheinlichkeiten im Grundzustand $\mathbf{p}_{Abb,0}$ als gleich verteilt angenommen werden:

$$\mathbf{p}_{Abb,0} = \mathbf{p} \begin{pmatrix} Links \\ Kreuzen \\ Rechts \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

Der Knotentyp der Kreuzung wird mitberücksichtigt. Liegt eine T-Kreuzung vor, wird die Wahrscheinlichkeit des nicht möglichen Abbiegemanövers auf Null gesetzt, die der anderen auf jeweils $\frac{1}{2}$. Zur Berücksichtigung der beiden adressierten Verkehrsregelungen wird der Vektor \mathbf{p}_{Abb} durch eine einfache Verdoppelung zum Vektor \mathbf{p}_{Sit} der Abbiegewahrscheinlichkeit:

$$\mathbf{p}_{Sit} = \begin{pmatrix} \mathbf{p}_{Abb,VA} \\ \mathbf{p}_{Abb,RvL} \end{pmatrix} = \mathbf{p} \begin{pmatrix} Links_{VA} \\ Kreuzen_{VA} \\ Rechts_{VA} \\ Links_{RvL} \\ Kreuzen_{RvL} \\ Rechts_{RvL} \end{pmatrix}$$

Durch eine Berücksichtigung der Verkehrsregelung fallen allerdings drei Einträge weg, weshalb sich eine Normierung des \mathbf{p}_{Sit} erübrigt. Liegt keine Kenntnis über die Verkehrsregelung vor, wird von einer Gleichverteilung für Vorfahrtachten und Rechts-vor-Links ausgegangen und \mathbf{p}_{Sit} mit $\frac{1}{2}$ multipliziert, was einer Normierung gleich kommt.

Das umgesetzte Modell des Bayesschen Netzes zur Prädiktion des Abbiegewunsches wird in Abb. 6.6 dargestellt.

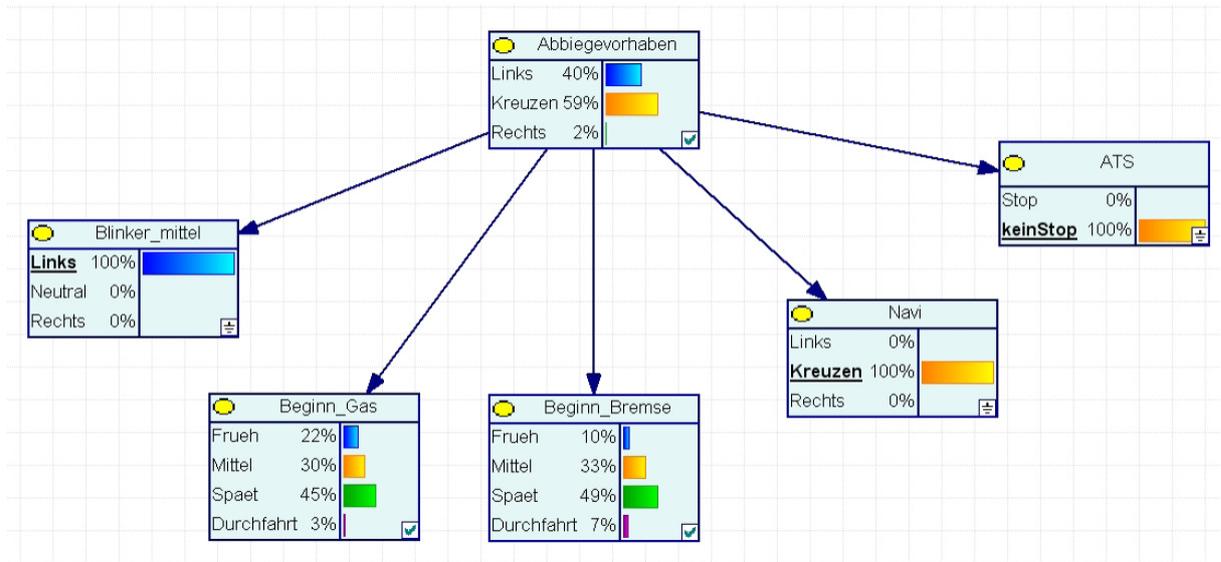


Abbildung 6.6: Modell des Bayesschen Netzes zur Prädiktion des Abbiegewunsches. Die Zustände der Kindknoten „Blinker“, „Navi“ und „ $a_{x,TS}$ “ sind in diesem Fall bekannt.

Die Kindknoten sind „Blinker“, „Beginn_Gas“, „Beginn_Bremse“, „Navi“ und „ $a_{x,TS}$ “. „Blinker“ kann die Zustände „Links“, „Neutral“ oder „Rechts“ annehmen. „Beginn_Gas“ und „Beginn_Bremse“ beziehen sich auf die Zeitpunkte an denen das Gas gelöst bzw. die Bremse betätigt wird. Sie können die Zustände „Früh“, „Mittel“, „Spät“ oder „Durchfahrt“ annehmen. „Navi“ gibt die Art des Navigationshinweises „Links“, „Kreuzen“ oder „Rechts“ für die nachfolgenden Kreuzung an. Die „ $a_{x,TS}$ “ kann die Zustände „Stop“ oder „kein Stop“ annehmen.

Grundlage für die Berechnung der Abbiegewahrscheinlichkeit p_{Sit} ist ein probabilistisches Modell. Das probabilistische Modell enthält für jeden Kindknoten eine Tabelle, die abhängig von dessen momentanen Zustand, einen Vektor \mathbf{p} mit den bedingten Wahrscheinlichkeiten des Abbiegemanövers liefert. Die Werte der Tabellen wurden aus den Daten der Messfahrten gelernt oder heuristisch festgelegt. Hierfür wurde der Wertebereich der Kindknoten in die genannten Zustände diskretisiert, wobei die Intervallzahl und Schwellwerte an Hand einer ROC-Betrachtung¹⁰ ermittelt wurden. Dies bedeutet, die Intervallzahl und Schwellwerte wurden so gewählt, dass sich die Ereignisse Abbiegen und Kreuzen bestmöglich unterscheiden lassen. Diese so generierten Tabellen dienen als Conditional Probability Table des probabilistischen Modells.

Da mit dem Beginn des Gaslösens und der Bremsung sowie der Blinkerbetätigung bekannte Zustände aus vorausgegangenen Zeitschritten mit berücksichtigt werden, handelt es sich um ein *Dynamisches Bayessches Netz*.

Ein erster Funktionstest der Abbiegewunscherkennung wurde mit fünf zusätzlichen Messfahrten durchgeführt. Der Anteil der korrekt erkannten Abbiegemanöver wird in Abb. 6.7 dargestellt.

Bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s liegt der letztmögliche Warnzeitpunkt rund 3 s

¹⁰ ROC (Relative Operating Characteristic): Misst die Fähigkeit eines Vorhersagemodells zwischen zwei verschiedenen Ereignissen zu unterscheiden - ULR:<http://www.wikipedia.org>.

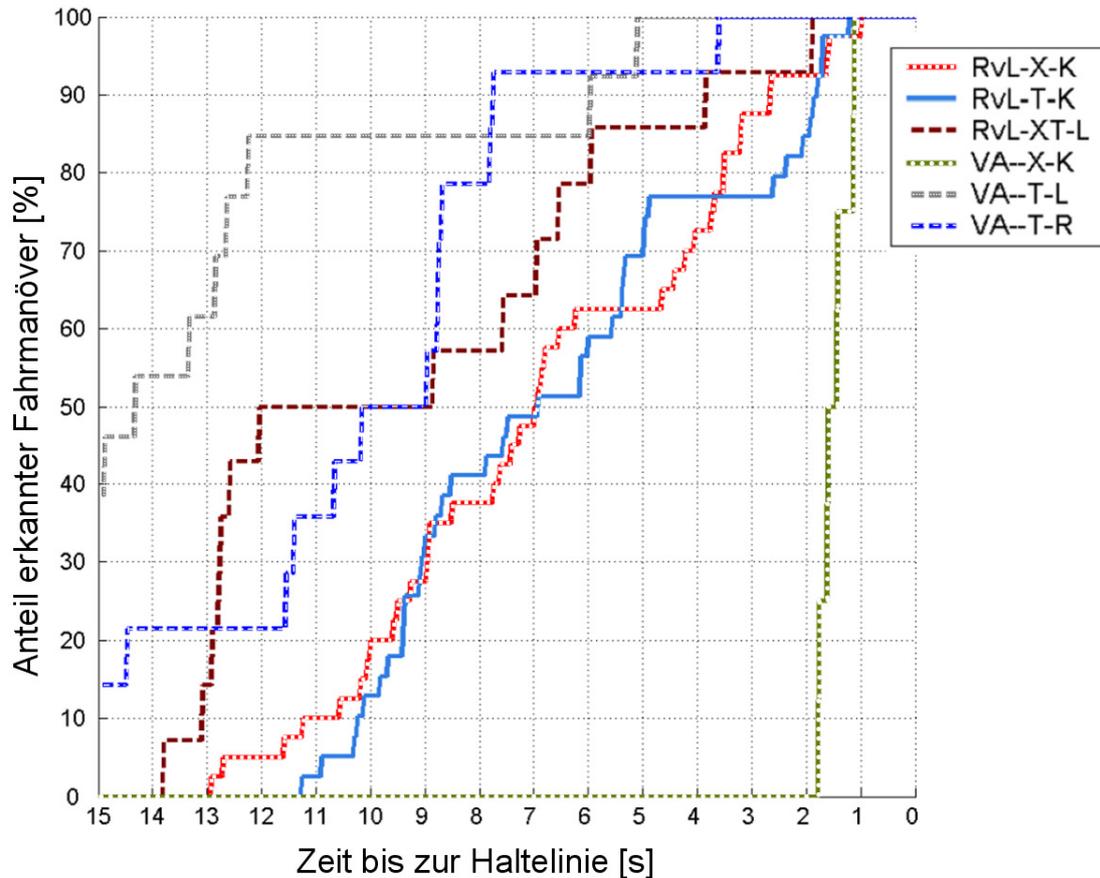


Abbildung 6.7: Kumuliert aufgetragene Anteile korrekt erkannter und nicht mehr verworfener Abbiegemanöver. RvL: Rechts-vor-Links, VA: Vorfahrtachten, X: X-Kreuzung, T: T-Kreuzung, XT: X- oder T-Kreuzung, K: Kreuzen, L: Linksabbiegen, R: Rechtsabbiegen.

vor der Haltelinie¹¹. Zu diesem Zeitpunkt wurden knapp 80 % der Kreuzenvorhaben an Rechts-vor-Links-Kreuzungen und über 90 % der Linksabbiegevorhaben richtig erkannt. An Vorfahrtachten-Kreuzungen wurden die Abbiegevorhaben zu 100 % erkannt. Sehr spät wurde „Kreuzen“ bei Vorfahrtachten-Kreuzungen erkannt. Das Ziel des KQA, Fehlwarnungen auf Grund von Rechtsabbiegevorhaben zu vermeiden, wird dadurch aber nicht beeinträchtigt. Denn für den Fall, dass fälschlicherweise beim letztmöglichen Warnzeitpunkt statt „Kreuzen“ auf einen Linksabbiegewunsch geschlossen wird, ist es erforderlich, dieselben Fremdfahrzeuge des Querverkehrs zu berücksichtigen. Sollte hingegen fälschlicherweise statt „Kreuzen“ auf einen Rechtsabbiegewunsch geschlossen werden, bleibt eine ggf. erforderliche Warnung aus. Hierdurch wird das Unfallrisiko aber nicht höher als ohne den KQA. Daraus lässt sich die Tendenz ablesen, dass durch den gewählten Ansatz der Abbiegewunscherkennung auf Grundlage eines Bayesschen Netzes ein geeigneter Ansatz zur Vermeidung von Fehlwarnungen gefunden wurde. Der Inhalt nachfolgender Arbeiten wird darin bestehen, diesen Ansatz auf weitere Kreuzungsszenarien und -geometrien zu erweitern.

¹¹ Annahmen zur Berechnung des letztmöglichen Warnzeitpunktes: Reaktionszeit 1 s, Bremsverzögerung des Fahrers -6 m/s^2 .

6.4 Assistenzstrategie

Die Assistenzstrategie des KQA leitet sich aus den in Kap 3.2.1 definierten Funktionen ab. Die Assistenz bezieht sich nur auf die Annäherungsphase an die Kreuzung. Eine Assistenz im Stillstand wird nicht behandelt. Für das wartepflichtige Fahrzeug sind drei Assistenzstufen vorgesehen:

1. Information über die Verkehrsregelung
2. Warnung vor einer potentiellen Kollision mit dem Querverkehr auf Grund einer Vorfahrtsmissachtung
3. Aktive (durch den KQA ausgelöste) Vollverzögerung, falls der wartepflichtige Fahrer auf die Warnung nicht reagiert

Information

Die Information über die Verkehrsregelung erfolgt ab ca. 150 m vor der Kreuzung.



Abbildung 6.8: Information über die Verkehrsregelung als Bestandteil des Navigationshinweises¹².

Diese Form der Assistenz erfolgt, wenn die Verkehrsregelung aus der digitalen Karte bekannt ist und sich das Fahrzeug an eine Kreuzung annähert. Als MMI wird der Navigationshinweis um die Verkehrsregelung an der Kreuzung erweitert. Dies wird in Abb. 6.8 für eine Entfernung von 100 m vor der Kreuzung und dem bildlichen Hinweis „Kreuzen“ dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass ein Fahrer, der die Kreuzung kennt, von dieser Information nicht zusätzlich abgelenkt wird. Dagegen eröffnet sich die Möglichkeit, dass ein Fahrer, der die Kreuzung nicht kennt, bereits frühzeitig über die Verkehrsregelung informiert wird und damit die Gefahr abnimmt, dass er die Verkehrsregelung falsch interpretiert.

Warnung

Eine Warnung erfolgt, wenn:

- im wartepflichtigen Fahrzeug ein hohes Kollisionsrisiko erkannt wird
- und eine adressierte Kreuzungsgeometrie vorliegt

¹² Hopstock/Thoma (2007a): D40.74 Evaluation Results Simulator.

- und die Anforderungen an die Zustandsdaten erfüllt (siehe Kap. 6.2) sind
- und der wartepflichtige Fahrer beim letztmöglichen Warnzeitpunkt die Verkehrssituation falsch einschätzt.

Dabei besteht das Ziel darin, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf das Verkehrsgeschehen zu richten.



Abbildung 6.9: Warnung vor potentieller Kollision mit einem vorfahrtsberechtigten Fahrzeug von rechts¹³.

Die Warnung soll so früh erfolgen, dass der Fahrer noch ausreichend Zeit hat, die Verkehrssituation selbst zu beurteilen und eine kollisionsvermeidende Handlung einzuleiten. Für den Sonderfall Stoppschild wurde von MEITINGER ET AL. ein Warnkonzept entwickelt, welches eben diese beiden Ziele verfolgt. Dieses Warnkonzept gibt eine visuelle und auditive Warnung an den Fahrer aus. Durch die Akustik soll die Aufmerksamkeit des Fahrers geweckt und durch das Bild die Erklärung für die Warnung gegeben werden.

Ein Grundproblem bei der Entscheidung, ob eine Warnung ausgegeben werden soll, besteht im sogenannten Warndilemma¹⁴. Das Warndilemma bezeichnet die Problematik, dass eine normale, richtige Fahrerreaktion im Extremfall erst nach dem Zeitpunkt erfolgen kann, an dem die letzte Warnmöglichkeit gegeben ist. Das Warndilemma wird durch die Nutzung unscharfer Positionsdaten verschärft, da hierdurch ggf. bei einer noch größeren Entfernung entschieden werden muss, ob der Fahrer die Verkehrssituation richtig interpretiert. In Abb. 6.10 wird das Warndilemma verdeutlicht.

Das Warndilemma wird dadurch hervorgerufen, dass sich der Anhalteweg im Falle einer Warnung um die während der Reaktionszeit zurückgelegte Strecke verlängert. Daher ist es erforderlich, den Fahrer früher zu warnen, als er eigentlich mit dem Bremsen zu beginnen hat, um noch vor der Haltelinie zum Stehen zu kommen. Ausgehend von idealen Positionsdaten konnte gezeigt werden, dass die Fahrer vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt allesamt Fahrhandlungen, z.B. Bremsbetätigungen, durchführten, die Rückschlüsse auf eine richtig erkannte Verkehrsregelung zulassen. Wird hingegen von unscharfen Positionsdaten ausgegangen, ist diese Zuordnung nicht immer zuverlässig möglich. Als Lösungsansatz bietet sich an, den Warnzeitpunkt näher an die Kreuzung zu legen. Um dies zu ermöglichen, wird beim KQA bereits während der Reaktionszeit aktiv verzögert. Als Verzögerung werden -3 m/s^2 gewählt und zwar als haptische Warnung. Dies entspricht in

¹³ Hopstock/Thoma (2007a): D40.74 Evaluation Results Simulator.

¹⁴ Meitinger/Ehmanns/Heißing (2004): Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen: Beispiel Stop-Schild-Warnung S.152.

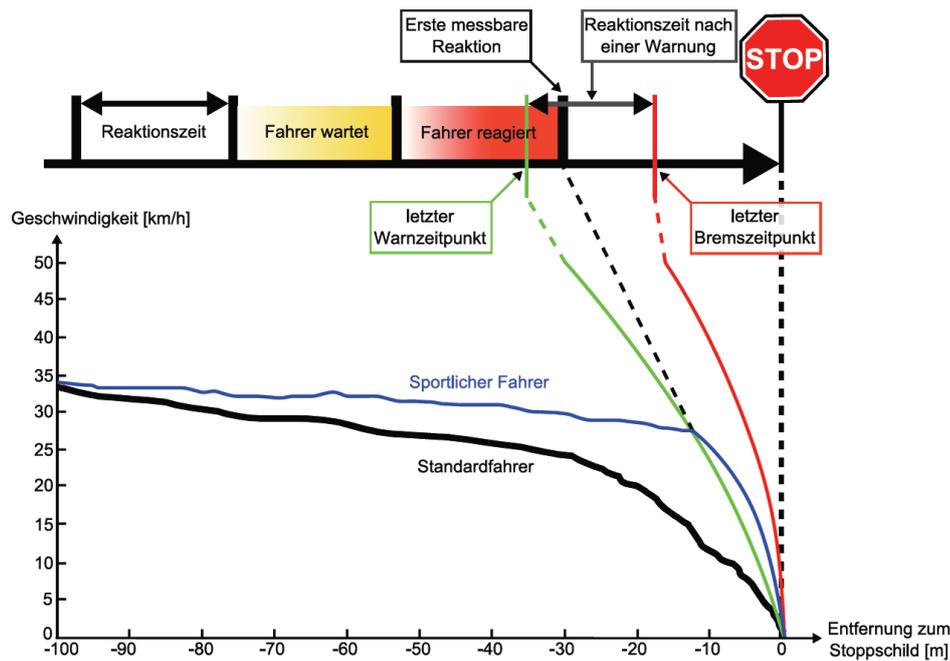


Abbildung 6.10: Warndilemma bei der Kreuzungsassistenz.

etwa einer starken ACC-Bremmung und ermöglicht beispielsweise bei $v_{x,E,0}$ gleich 20 m/s , dass der Warnzeitpunkt 10 m näher an der Kreuzung liegt.

Neben der Verkürzung des Anhalteweges kann der Fahrer den durch diese haptische Warnung erzeugten gerichteten Impuls als Aufforderung wahrnehmen, selbst zu verzögern. Entgegen der Einschätzungen von Denso (siehe Kap. 2.2.2) werden diese beiden Effekte als besondere Vorteile einer haptischen Warnung angesehen.

Das Warnsymbol wird im Head-Up Display sowie im Instrumenten-Kombi dargeboten (siehe Abb. 6.9 und 6.11). Der Navigationshinweis wird in diesem Fall ausgeblendet. Als Akustik wird ein eskalierendes Warnsignal verwendet.

Wird durch die Abbiegewunscherkennung festgestellt, dass das wartepflichtige und das vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug voraussichtlich nicht denselben Kreuzungsbereich passieren werden, wird die Warnung, die ohne Abbiegewunscherkennung erfolgt wäre, unterdrückt.

Aktive Vollverzögerung

Als dritte Stufe der Assistenz wird der Warnung eine aktive Vollverzögerung nachgelagert, falls der Fahrer auf die Warnung nicht reagiert. Durch diese Vollverzögerung soll verhindert werden, dass der Fahrer erst nach dem point-of-no-return mit der Bremsung beginnt. Es wird gefordert, dass diese aktive Vollverzögerung durch den Fahrer übersteuert werden kann. Damit wird gewährleistet, dass der Fahrer immer in der Regelschleife bleibt. In dieser Arbeit wird die Übersteuerbarkeit durch eine Betätigung des Gaspedals für eine bestimmte Zeitdauer nach der Warnung realisiert. Dies stellt nur einen ersten Schritt der Übersteuerbarkeit dar, denn BENDER ET AL.¹⁵ hat gezeigt, dass die Fahrer bei ei-

¹⁵ Bender et al.: ATZ.



Abbildung 6.11: Warnsymbol im Head-Up Display und Instrumenten-Kombi bei einer visuell-auditiv-haptischen Warnung vor einem vorfahrtsberechtigten Motorrad.

ner aktiven Vollverzögerung unbeabsichtigt in das Gaspedal fallen. Aufgabe nachfolgender Arbeiten wird es sein, die Art und Weise der Übersteuerbarkeit weiterzuentwickeln.

6.5 Methodik zur Parameterabstimmung

Beim KQA handelt es sich um ein System, welches den Fahrer dabei unterstützen soll, kritische Kreuzungssituationen zu vermeiden. Daher besteht eine wichtige Herausforderung bei der Entwicklung des KQA darin, eine Methodik zu entwickeln, mit der das Assistenzsystem auch in kritischen Kreuzungssituationen parametrierbar werden kann. Einerseits ist es erforderlich, diese Methodik so auszulegen, dass auch im Falle einer Kollision mit dem Fremdfahrzeug keine Gefahr für Mensch und Maschine besteht. Andererseits ist es für die Abstimmung des Assistenzsystems erforderlich, dass diese Methode im Fahrzeug umsetzbar ist, da hier das Feedback des Fahrzeugs am besten erfasst werden kann.

Zur Realisierung der genannten Anforderungen werden *virtuelle Fahrzeuge* genutzt. Grundlage für die *virtuellen Fahrzeuge* sind entweder reale Messdaten von vorfahrtsberechtigten Fahrzeugen oder synthetisch erzeugte Daten. Die *virtuellen Fahrzeuge* werden zur Parametrierung im Modell des KQA integriert. Ihre Funktionsweise unterteilt sich in folgende Schritte:

1. Nähert sich das Eigenfahrzeug der Kreuzung, so werden bei einer definierten Entfernung zur Haltelinie die *virtuellen Fahrzeuge* aufgesetzt.
2. Fährt das Eigenfahrzeug ab dem Aufsetzzeitpunkt mit konstanter Geschwindigkeit, so erreichen die *virtuellen Fahrzeuge* die Kreuzung gleichzeitig mit dem Eigenfahrzeug.

3. Beschleunigt bzw. verzögert das Eigenfahrzeug bei der Kreuzungsannäherung, so erreicht es die Kreuzung vor bzw. nach den *virtuellen Fahrzeugen*.
4. Darüber hinaus ist es auch möglich, die *virtuellen Fahrzeuge* so aufzusetzen, dass sie die Kreuzung in einer definierten Zeitlücke zum Eigenfahrzeug erreichen. Diese Zeitlücke wird beim Aufsetzen der *virtuellen Fahrzeuge* festgelegt und bleibt unverändert, wenn das Eigenfahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit weiterfährt.
5. Beschleunigt oder verzögert das Eigenfahrzeug hingegen, so ändert sich entsprechend die Zeitlücke.

Mit den *virtuellen Fahrzeugen* werden kritische Kreuzungssituationen mit definierten Zeitlücken zum Eigenfahrzeug realisiert. Durch die Nutzung von synthetischen Daten als Grundlage für die *virtuellen Fahrzeuge* besteht die Möglichkeit einerseits Analysen mit fehlerfreien Daten der Fremdfahrzeuge durchzuführen. Andererseits wird das Assistenzsystem auf Grundlage der *virtuellen Fahrzeuge* mit realen Messdaten unter realitätsgetreuen Bedingungen abgestimmt. Hierbei ist es zusätzlich möglich, eine Latenzzeit der Kommunikation mit abzubilden.

Neben der Realisierung der *virtuellen Fahrzeuge* im Fahrzeug wurde eine Entwicklungsumgebung in der Simulation geschaffen. In dieser erfolgte eine Abstimmung der Parameter des KQA auf Grundlage von realen Messdaten bzw. synthetischen Daten. Damit wurde die Funktionalität der Gleichungen des KQA überprüft.

6.6 Zusammenfassung

Um eine zuverlässige Assistenz zu ermöglichen, wird das Kollisionsrisiko bestimmt, die aktuell vorliegenden Rahmenbedingungen beurteilt sowie das Fahrerverhalten hinsichtlich eines Anhalte- und Abbiegewunsches analysiert. Eine Warnung erfolgt, wenn die Rahmenbedingungen die gestellten Anforderungen erfüllen, ein hohes Kollisionsrisiko vorliegt und der wartepflichtige Fahrer beim letztmöglichen Warnzeitpunkt die kritische Verkehrssituation offensichtlich falsch einschätzt. Die Entscheidung für eine Warnung wird auf Grundlage unscharfer Positions- und Kommunikationsdaten sowie dem meist instationären Fahrverhalten der Fahrer bei der Kreuzungsannäherung gefällt.

Grundlage für die Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung ist dabei eine Zeit- und Raumbetrachtung für alle relevanten, d.h. potentiell durch das Eigenfahrzeug gefährdeten Fahrzeuge. Die Betrachtung erfolgt dabei in Bezug auf einen definierten kritischen Bereich. Befinden sich die Fahrzeuge voraussichtlich gleichzeitig innerhalb dieses Bereiches, wird ein hohes Kollisionsrisiko angenommen.

Zur Berücksichtigung der Positions- und Ausrichtungsabweichungen wird die Größe des kritischen Bereiches erhöht. Die Prädiktionsfehler in Querrichtung werden durch einen Fahrfächer modelliert. Zur Abbiegewunscherkennung wurde ein Ansatz auf Grundlage eines Bayesschen Netzes entwickelt. Die grundsätzliche Funktion der Abbiegewunscherkennung konnte für Rechts-vor-Links und Vorfahrtachten-Kreuzungen aufgezeigt werden. Hinsichtlich der Beurteilung des letztmöglichen Warnzeitpunktes wurde das Warndilemma analysiert. Durch die Nutzung einer haptischen Anbremsung während der Reaktionszeit wird eine Möglichkeit eröffnet, das Warndilemma zu entschärfen.

Damit ist das Gesamtsystem des KQA dargestellt und die grundsätzliche Funktionalität im Rahmen von Simulationen sowie Messfahrten überprüft. Mit den *virtuellen Fahrzeugen* wird ein Ansatz vorgestellt, der die Abstimmung der Parameter des KQA auch in kritischen Kreuzungsszenarien ermöglicht. Im folgenden Kapitel wird die Evaluierung des KQA in realen kritischen Kreuzungssituationen beschrieben.

7 Evaluierung des KQA

Zur Evaluierung des Querverkehrsassistenzsystems bietet sich grundsätzlich der Fahrsimulator oder das Realfahrzeug an. Vorteile des Fahrsimulators bestehen:

- in den reproduzierbaren Versuchsbedingungen und
- der gefahrlosen Erprobung des Querverkehrsassistenzsystems auch in kritischen Kreuzungssituationen.

Im Rahmen des Projektes PReVENT wurde bereits ein Querverkehrsassistenzsystem auf Grundlage idealer Daten in einem dynamischen Fahrsimulator evaluiert. Dabei konnten Erkenntnisse hinsichtlich der Assistenzstrategie während der Kreuzungsannäherung und im Stillstand des wartepflichtigen Fahrzeugs gewonnen werden (siehe Kap. 2.2.2). Aufgrund der Natur der Simulatoruntersuchung zeigten sich jedoch folgende Einschränkungen¹:

- Wegen fehlender Hinweisreize zur Tiefeninformation bei der Darstellung von Querverkehrsfahrzeugen auf der Projektionsfläche des Simulators konnten einige Probanden Distanzen im Simulator nur schwer einschätzen.
- Auch die pixelbasierte Darstellung von Fahrzeugen verminderte die Authentizität der Versuche.
- Die Bildschärfe der Projektion entspricht nicht der beim Blick aus dem Realfahrzeug. Diese Unschärfe bzw. die notwendige Akkomodation, um ein Objekt scharf zu sehen, kann nicht wie in der Realität zur Entfernungsschätzung genutzt werden.

Eine weitere Beschränkung zeigte sich auch bei der kinästhetischen Rückmeldung im Falle einer länger anhaltenden Vollverzögerung des Fahrzeugs bis zum Stillstand. Hierdurch wird im Falle einer Warnung durch das Assistenzsystem und einer hierauf erfolgten Vollverzögerung des Fahrers u.U. die Beurteilung der Warnung verfälscht. Um diese Beschränkungen aufzuheben, wurde aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Simulatoruntersuchungen die Evaluierung des KQA im Realfahrzeug durchgeführt. Um möglichst realitätsnah zu sein, wurden diese Praxisversuche mit einer Stichprobe aus Laienfahrern und Testfahrern durchgeführt. Von diesen Versuchen im Realfahrzeug wird gefordert, dass sie - soweit möglich - auch die beiden genannten Vorteile des Fahrsimulators gewährleisten.

Das Ziel der Evaluierung des KQA ist die Verifizierung der in Kap. 2.3 aus der wissenschaftlichen Zielsetzung abgeleiteten existentiellen Hypothese: „Es ist möglich, einen KQA in zwei Beispielszenarien auch auf Grundlage unscharfer Realdaten im Fahrzeug umzusetzen, wenn die Anforderungen an die Positionsbestimmung und die Kommunikation erfüllt sind sowie eine adressierte Kreuzungsgeometrie vorliegt!“

¹ Krüger et al. (2006): Untersuchung des Linksabbliegeassistenten, des Querverkehrsassistenten, des Ampelassistenten und des potentiellen Nutzens eines Workload-Management-Systems.

Die Kriterien für eine hinreichende Verifikation dieser Hypothese bestehen in der:

1. Wirksamkeit zur Unfallvermeidung
2. Grundakzeptanz der Assistenz durch den Fahrer in kritischen Kreuzungssituationen

Für die Untersuchung dieser Kriterien wird jeweils ein Beispielszenario entwickelt und durchgeführt. Im Folgenden wird auf die Rahmenbedingungen der Evaluierung eingegangen. Die entwickelten Beispielszenarien sowie die Ergebnisse der Evaluierung werden dargestellt.

7.1 Rahmenbedingungen

Zur Evaluierung des KQA sind kritische Kreuzungssituationen darzustellen. Daher erfolgten die Versuchsfahrten aus Sicherheitsgründen auf einem Messgelände der BMW Group und nicht auf öffentlichen Straßen.

Versuchsträger

Als Versuchsträger dienen zwei 5er BMW und ein 3er BMW. Die Fahrzeuge sind mit jeweils einem externen Steuergerät (dSPACE Autobox), einem DGPS-Empfänger, einem Funkmodem und einem Kommunikations-PC ausgestattet. Über das externe Steuergerät wird der Zugriff auf sämtliche Daten der Fahrzeug-CAN-Busse ermöglicht. Zusätzlich ist das Steuergerät mit dem GPS-Empfänger und mit dem Kommunikations-PC verbunden. Im Kommunikations-PC ist, wie in Kap. 5.2.3 aufgeführt, die Kommunikations-Software „UltraCom“ und eine WLAN-Karte integriert. Der KQA ist in der Simulationsumgebung Matlab/Simulink umgesetzt und auf das externe Steuergerät geflasht. Die Bremsen der Fahrzeuge sind vom externen Steuergerät ansteuerbar.

Bei den Versuchsfahrten werden folgende Daten simultan aufgezeichnet:

- Position und Ausrichtung der Fahrzeuge
- Geschwindigkeit und Verzögerung der Fahrzeuge
- Gas- und Bremspedalbetätigungen durch die Fahrer
- Gaspedalstellung
- Zeitpunkte und Art der Warnung
- Alter des DGPS-Korrektursignals
- Standardabweichung der Positions- und Ausrichtungsdaten
- Positionstyp und Anzahl der Satelliten

Zusätzlich wird eine vereinfachte digitale Karte mit der Position der Haltelinie verwendet. Auf Grundlage dieser Daten kann:

- die Distanz zwischen dem wartepflichtigen Fahrzeug und der Haltelinie berechnet werden.

- der Geschwindigkeitsverlauf während der Kreuzungsannäherung, der Geschwindigkeitswert zum Zeitpunkt der Assistenzmaßnahme, der Geschwindigkeitswert zum Bremsbeginn und der Geschwindigkeitswert an der Haltelinie bestimmt werden.
- der Verzögerungsverlauf während der Kreuzungsannäherung, die durchschnittlich vom Fahrer erbrachte Verzögerung, die während der ersten Sekunde nach der Warnung durchschnittlich realisierte Verzögerung sowie der Betrag der maximalen Verzögerung bestimmt werden.
- der Reaktionszeitpunkt des Fahrers bestimmt werden.

Assistenzstrategien

Bei der Evaluierung des KQA werden drei verschiedene Assistenzstrategien untersucht (siehe Abb. 7.1):

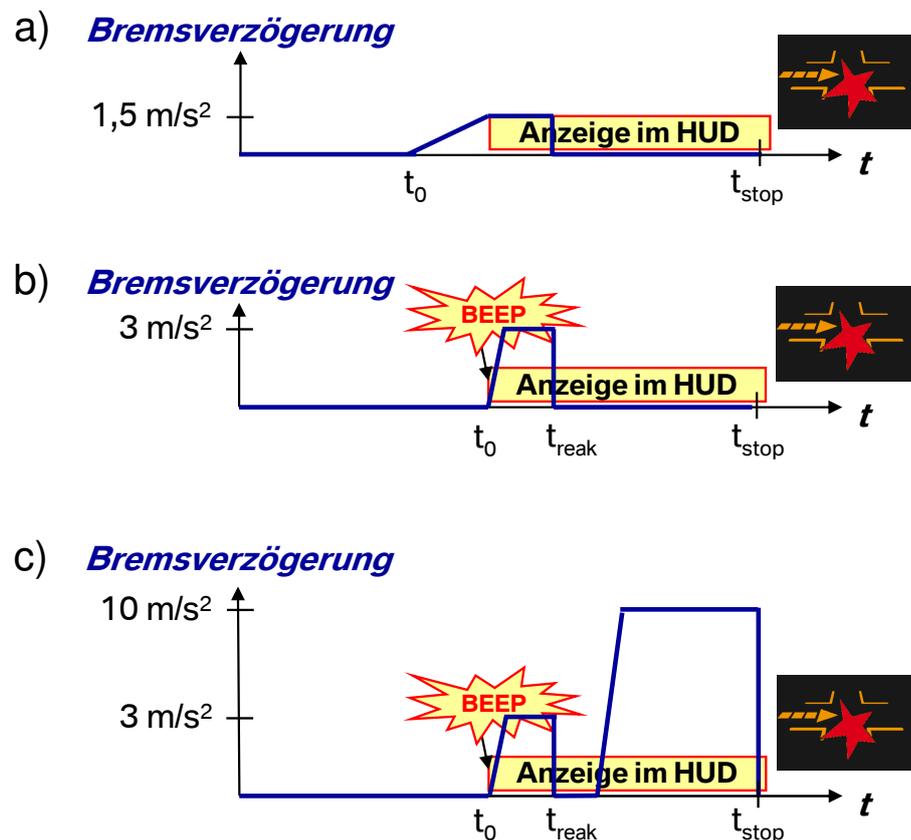


Abbildung 7.1: Im KQA realisierte Assistenzstrategien zur Bestimmung der favorisierten Assistenzstrategie.

a) Visuell-haptische Warnung mit Rampe

Bei dieser Assistenzstrategie erhält der Fahrer zunächst eine haptische Warnung mittels einer rampenförmig ansteigenden Verzögerung. Diese steigt während 1 s auf

$1,5 \text{ m/s}^2$ an und bleibt danach für 1 s konstant. Ab Beginn der konstanten Verzögerung erfolgt zusätzlich eine visuelle Warnung durch eine Anzeige im Head-Up Display.

b) Visuell-auditiv-haptische Warnung

Bei dieser Assistenzstrategie erhält der Fahrer gleichzeitig eine visuelle Warnung durch eine Anzeige im Head-Up Display, einen Warnton sowie eine haptische Anbremsung. Die haptische Anbremsung steigt sprunghaft auf rund 3 m/s^2 an. Diese Verzögerung bleibt während der angenommenen Reaktionszeit von 1 s bestehen.

c) Visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung

Bei dieser Assistenzstrategie erhält der Fahrer zunächst eine visuell-auditiv-haptische Warnung. Reagiert der Fahrer auf diese Warnung nicht, erfolgt beim letztmöglichen Bremszeitpunkt eine aktive Vollverzögerung. Der Fahrer hat die Möglichkeit diese durch eine Eingabe zu übersteuern.

Die Aufmerksamkeit des Fahrers soll insbesondere durch die haptische Anbremsung und die Akustik geweckt werden. Die Darstellung im Head-Up Display dient in erster Linie dazu, die Warnung bildlich zu erklären. Die nachgelagerte aktive Vollverzögerung soll verhindern, dass der Fahrer erst nach dem point-of-no-return mit der Bremsung beginnt. Durch die Übersteuerbarkeit soll der Fahrer in der Regelschleife bleiben. Ob dies der Fall ist, wird Inhalt nachfolgender Arbeiten sein.

Das Ziel, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die potentiell kritische Situation in der Kreuzung zu richten, ist allen drei Assistenzstrategien gemein. Hierzu nutzen die genannten Assistenzstrategien unterschiedliche Warnzeitpunkte. Im Übergang vom Informations- in den Warnbereich liegt die **visuell-haptische Warnung mit Rampe**. Diese verhältnismäßig frühe Rückmeldung an den Fahrer bietet zwei Vorteile. Zum einen wird die Gefahr möglicherweise bereits durch die haptische Anbremsung entschärft. Zum anderen wird die Warnung nur für den Fahrer offensichtlich. Schließlich wissen die Mitfahrer ja nicht, wodurch die Verzögerung zustande gekommen ist. Dieser Effekt wird bei dieser Assistenz dadurch verstärkt, dass keine Akustik zum Einsatz kommt. Diese beiden Vorteile können auch in Analogie zum Reiten eines Pferdes gesehen werden. So erkennt u.U. ein Pferd bereits vor dem Reiter eine Gefahr und beginnt deshalb die Geschwindigkeit zu verringern. Hierdurch wird zum einen bereits die Gefahr reduziert und zum anderen zusätzlich eine Rückmeldung an den Reiter gegeben. Diese Parallelen zwischen dem Reiten eines Pferdes und der Wirkungsweise von Fahrerassistenzsystemen der Zukunft adressiert die H-Metapher².

Die **visuell-auditiv-haptische Warnung** erfolgt zum letztmöglichen Warnzeitpunkt. Bei dieser Assistenzstrategie bestehen die Vorteile der haptischen Anbremsung im Beitrag zur Lösung des Warndilemmas (siehe Kap. 6.4) sowie in der kinästhetischen Rückmeldung an den Fahrer. Durch die ruckartig auftretende haptische Anbremsung und die Akustik sollen dem Fahrer die Kritikalität der Situation und die Dringlichkeit einer Reaktion verdeutlicht werden. Zur Bestimmung des letztmöglichen Warnzeitpunkts wird von einem Anhalteweg mit t_{reak} gleich 1 s, $a_{x,hap}$ gleich -3 m/s^2 und a_F gleich -6 m/s^2 ausgegangen.

Zum letztmöglichen Bremszeitpunkt wird der **visuell-auditiv-haptischen Warnung** eine **aktive Vollverzögerung nachgelagert**. Hierdurch soll verhindert werden, dass der

² Flemisch (2003): The H-metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction.

Fahrer erst so spät mit der Bremsung beginnt, dass das Fahrzeug nicht mehr vor der Kreuzung zum Stehen kommen kann. Zur Bestimmung des letztmöglichen Bremszeitpunkts wird von einer aktiven Verzögerung durch das System von 10 m/s^2 ausgegangen.

7.2 Nachweis der Wirksamkeit zur Unfallvermeidung

Die Wirksamkeit des KQA zur Unfallvermeidung hängt unmittelbar mit der gewählten Assistenzstrategie zusammen. Die Aufgabe besteht dabei darin, den Fahrer zu unterstützen, eine kritische Kreuzungssituation zu erkennen und eine kollisionsvermeidende Handlung einzuleiten. Wie in Kap. 3.2.1 gefordert, ist der KQA ein Sicherheitssystem, das den Fahrer nur in sehr kritischen und damit seltenen Kreuzungssituationen warnt. Daher ist es erforderlich, dass die Warnung vom Fahrer intuitiv verstanden wird. Es soll und darf nicht von einem Lerneffekt ausgegangen werden.

Zum Nachweis der Wirksamkeit des KQA wurde eine Methodik entwickelt, welche genau dieses intuitive Verständnis evaluiert. Im Folgenden wird auf die Anforderungen an diese Methodik, die Methodik selbst sowie die Evaluierungsergebnisse hinsichtlich des Wirksamkeitsnachweises eingegangen.

7.2.1 Anforderungen

Zum Nachweis der Wirksamkeit des KQA ist die folgende existentielle **Hypothese** zu verifizieren: „Durch eine Assistenzstrategie des KQA werden in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario signifikant mehr Kollisionen erfolgreich verhindert als ohne Assistenz!“ (siehe Kap. 2.3)

Zu diesem Wirksamkeitsnachweis wird die Assistenzstrategie visuell-auditiv-haptische Warnung zu Grunde gelegt. Eine potentielle Kollision wird als „erfolgreich verhindert“ angesehen, wenn das wartepflichtige Fahrzeug vor der Haltelinie zum Stehen kommt. Das repräsentative, kritische Beispielszenario ist dadurch gekennzeichnet, dass:

1. sich die Kreuzungsgeometrie und die Ursache für die kritische Kreuzungssituation aus der Unfallstatistik herleiten lassen und denen der häufigsten Unfallsituationen mit Querverkehr (siehe Abb. 3.4) entsprechen.
2. der wartepflichtige Fahrer überraschend in die kritische Kreuzungssituation gerät.
3. nur ein Stopp des wartepflichtigen oder vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs vor der Haltelinie die Kollision verhindert.

Grundlage dafür, dass der wartepflichtige Fahrer durch die Assistenz des KQA eine Kollision erfolgreich verhindert, sind die beiden existenziellen Hypothesen:

1. Der abgelenkte, wartepflichtige Fahrer interpretiert in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario die visuell-auditiv-haptische Warnung richtig.
2. Der abgelenkte, wartepflichtige Fahrer reagiert in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario auf die visuell-auditiv-haptische Warnung erfolgreich.

Das Kriterium für die korrekte Interpretation besteht darin, dass der wartepflichtige Fahrer im Zeitraum von 0,5 bis 1,5 s nach der Warnung reagiert. Hierauf wird im Abschnitt „Kriterien für Verwertbarkeit der Daten“ noch genauer eingegangen. Als Kriterium für eine erfolgreiche Reaktion wird eine Verzögerung durch den Fahrer bis zum Stillstand noch vor der Haltelinie erachtet.

Die Anforderungen an das Beispielszenario sind die **Vergleichbarkeit der Daten** verschiedener Versuchspersonen, die **Übertragbarkeit der Ergebnisse** auf reale Kreuzungsszenarien sowie die **Sicherheit für Mensch und Maschine**. Es ist erforderlich, die Vergleichbarkeit der Daten durch reproduzierbare Versuchsbedingungen zu gewährleisten, d.h. gleichzeitiger Warnzeitpunkt bei gleicher Geschwindigkeit des wartepflichtigen Fahrzeugs und gleiche Annäherung des vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs bei allen Versuchsfahrten. Weiter ist es erforderlich, die Übertragbarkeit der Ergebnisse durch realitätsnahe Versuchsbedingungen zu gewährleisten, d.h.:

- Die Versuchsperson darf nicht über die Funktion des KQA und das Ziel der Versuchsfahrt informiert sein.
- Die Versuchsperson wird durch die kritische Kreuzungssituation überrascht.
- Die Ursache der kritischen Kreuzungssituation basiert auf einer der häufigsten Ursachen von Unfällen mit Querverkehr (siehe Kap. 3.1).
- Die Versuchsperson wählt die Annäherungsgeschwindigkeit an die Kreuzung selbst.

Zusätzlich ist es erforderlich, die Sicherheit für Mensch und Maschine auch dann zu gewährleisten, wenn die Versuchsperson die Vorfahrt missachtet. D.h. auch in diesem Fall darf sich keine Kollision ereignen.

7.2.2 Methodik

Zur Realisierung der Anforderungen wurde eine entsprechende Methodik entwickelt. Die Gewährleistung der **Vergleichbarkeit der Daten** durch reproduzierbare Versuchsbedingungen wird auf Grundlage einer zentimetergenauen Positionsbestimmung des wartepflichtigen Fahrzeugs ermöglicht. Diese wird mit einer CPDGPS-gestützten Inertialplattform erreicht. Die Problematik einer unscharfen Warnzeitpunktbestimmung in Folge unscharfer Positionsdaten wird in Kap. 7.3 aufgegriffen. Zusätzlich wird der Abfahrtszeitpunkt des vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs in Abhängigkeit der von der Versuchsperson gewählten Geschwindigkeit getriggert. Grundlage dieser Triggerung ist die Verwendung von *virtuellen Fahrzeugen*.

Vor der Versuchsfahrt erhält jede Versuchsperson einen Einweisungsbogen (siehe Anhang 10.1) über mögliche Fahrerassistenzsysteme, die in dem Fahrzeug integriert sein können. Durch den Einweisungsbogen wird sichergestellt, dass alle Versuchspersonen die selbe Einweisung erhalten. Im Einweisungsbogen wird u.a. ein System zur Kreuzungsassistenz kurz vorgestellt. Um aber das eigentliche Versuchsziel nicht kenntlich zu machen und damit die **Übertragbarkeit der Ergebnisse** auf reale Kreuzungssituationen zu gewährleisten, sind auch andere Fahrerassistenzsysteme (z.B. Head-Up Display) beschrieben. Fragen der Versuchsperson zum Ablauf, dem Einweisungsbogen und dem Ziel der Versuchsfahrt werden nicht beantwortet.

Die Rekrutierung der Versuchspersonen erfolgt aus einem BMW-internen Probanden-Pool. Bei der Rekrutierung wird auf eine Streuung in Fahrertyp, Alter und Geschlecht geachtet.

Um eine überraschend auftretende kritische Kreuzungssituation zu provozieren, wird bei der Annäherung an die Kreuzung der Blick der Versuchsperson gezielt von der Kreuzung weggelenkt. Zusätzlich wird auf den Einsatz der Informationsstufe während der Kreuzungsannäherung verzichtet. Auf die Methodik zur gezielten Blickablenkung wird in der nachfolgenden Versuchsablaufbeschreibung näher eingegangen. Die kritische Kreuzungssituation wird mit jeder Versuchsperson nur einmal gefahren, da nur beim ersten Mal der Überraschungseffekt gegeben ist.

Zur Gewährleistung der **Sicherheit für Mensch und Maschine** wird der Sachverhalt ausgenutzt, dass der Anhalteweg umso kürzer ist, je niedriger die Geschwindigkeit ist. Das vorfahrtsberechtigten Fahrzeug nähert sich demnach der Kreuzung mit einer deutlich niedrigeren Geschwindigkeit als das wartepflichtige Fahrzeug. Die Fahrzeuge befinden sich auf Kollisionskurs. Somit ist es erforderlich, dass das wartepflichtige Fahrzeug deutlich früher als das vorfahrtsberechtigten Fahrzeug mit der Verzögerung beginnt, um noch vor der Haltelinie zum Stehen zu kommen.

Um eine Kollision auch dann zu verhindern, wenn die Versuchsperson die Vorfahrt missachtet, hält das vorfahrtsberechtigten Fahrzeug immer an der eigenen virtuellen Haltelinie an. Dies erfolgt aber erst nach dem letztmöglichen Bremszeitpunkt des wartepflichtigen Fahrzeugs.

Versuchsablauf

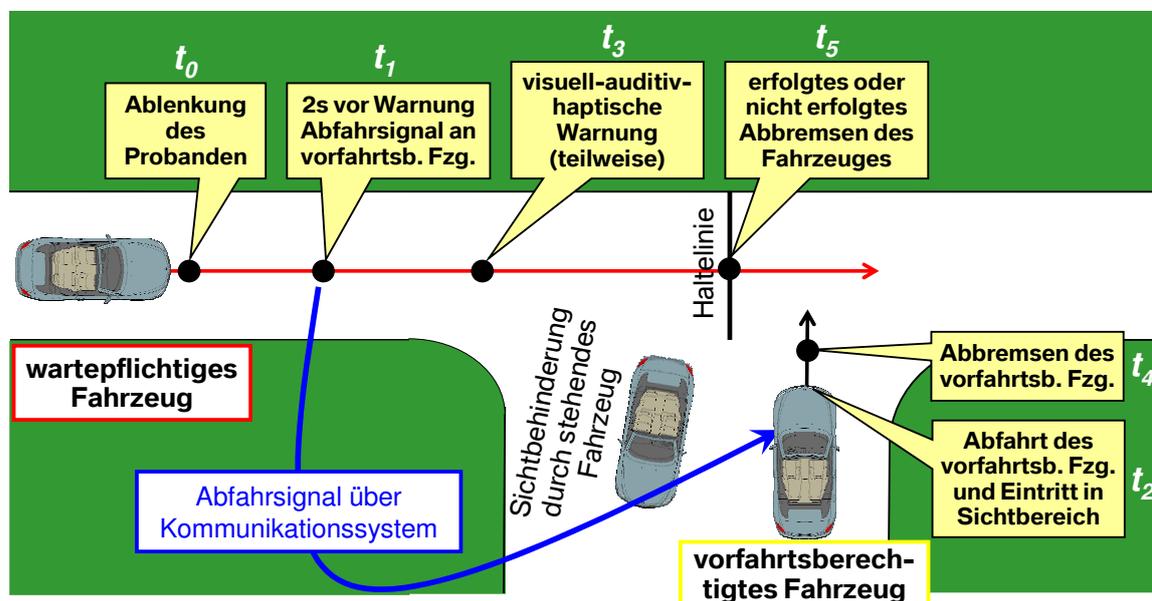


Abbildung 7.2: Kritisches Kreuzungsszenario zum Nachweis der Wirksamkeit der Assistenz zur Unfallvermeidung.

Der Ablauf der entwickelten Methodik wird in Abb. 7.2 dargestellt. Das wartepflichtige Fahrzeug nähert sich mit einer von der Versuchsperson frei gewählten Geschwindigkeit an

die Kreuzung an. Das vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug steht rund 10 m von der Kreuzung entfernt. Die Sicht auf das vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug ist durch ein parkendes Fahrzeug verdeckt. Die Front des parkenden Fahrzeugs ist von der Kreuzung weg gerichtet. Hierdurch soll dem wartepflichtigen Fahrer gezeigt werden, dass durch das parkende Fahrzeug keine Gefahr ausgeht.

Um die Abfahrt des vorfahrtsberechtigzten Fahrzeugs reproduzierbar auszulösen, wird 100 m bevor das wartepflichtige Fahrzeug die Kreuzung erreicht, eine Kolonne von sechs *virtuellen Fahrzeugen* aufgesetzt (siehe Kap. 6.5). Das Aufsetzen erfolgt so, dass mit mindestens einem der sechs virtuellen Fahrzeuge ein hohes Kollisionsrisiko besteht, wenn das wartepflichtige Fahrzeug die Warnentfernung zur Haltelinie erreicht. Basierend auf den Positions- und Fahrdynamikdaten der *virtuellen Fahrzeuge* und des wartepflichtigen Fahrzeugs wird der voraussichtliche Warnzeitpunkt bestimmt.

Rund 2,5 s bevor das vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug losfährt, wird die Versuchsperson durch den mitfahrenden Versuchsleiter aufgefordert, die Aufschrift einer Vignette (siehe Abb. 7.3) in der linken Seitenscheibe vorzulesen. Hierdurch soll eine gezielte Ablenkung des Probanden sowie die angesprochene Blickabwendung von der Kreuzung erreicht werden (t_0). Die Aufschrift wurde so gewählt, dass von einer mehrere Sekunden andauernden Ablenkung und Blickabwendung ausgegangen werden kann.

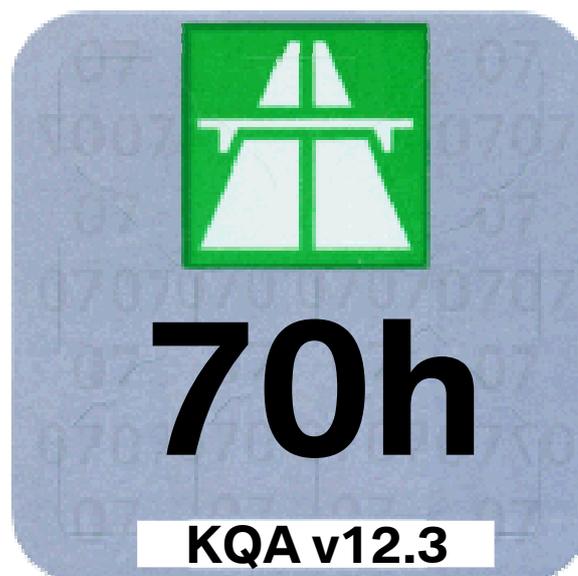


Abbildung 7.3: Vignette in der linken Seitenscheibe des wartepflichtigen Fahrzeugs, zur gezielten Ablenkung der Versuchsperson.

Zwei Sekunden bevor der wartepflichtige Fahrer den voraussichtlichen Warnzeitpunkt erreicht, wird über das Kommunikationssystem das Abfahrtsignal an das vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug gesendet (t_1). Das vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug tritt somit gut 1 s bevor das wartepflichtige Fahrzeug den Warnzeitpunkt erreicht, hinter der Sichtverdeckung hervor (t_2). Dies ist erforderlich, um ein objektives Maß dafür zu haben, ob der wartepflichtige Fahrer wirklich abgelenkt war. Hierauf wird im nachfolgenden Abschnitt „Kriterien für Verwertbarkeit der Daten“ noch genauer eingegangen.

Zum Warnzeitpunkt erhalten rund 50 % der Versuchspersonen eine visuell-auditiv-haptische Warnung (t_3). Die Warnung erfolgt, weil eine hohes Kollisionsrisiko zum vorfahrtsberechtigten Fahrzeug sowie zu *virtuellen Fahrzeugen* besteht. Hierauf bringt die Versuchsperson das Fahrzeug noch erfolgreich vor der Haltelinie zum Stehen oder nicht (t_5). Das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug bremst in jedem Fall, nachdem das wartepflichtige Fahrzeug den letztmöglichen Bremszeitpunkt überschritten hat (t_4).

Nach der kritischen Kreuzungssituation mit Warnung wird die Versuchsperson vom Versuchsleiter befragt, welche Assistenzmaßnahmen sie wahrgenommen hat. Diese Frage wird unspezifisch gestellt, d.h. verschiedene mögliche Assistenzmaßnahmen werden nicht zur Auswahl gegeben. Diese Befragung erfolgt unabhängig davon, ob die Versuchsperson das Fahrzeug erfolgreich vor der Haltelinie zum Stehen gebracht hat oder nicht.

Im wartepflichtigen sowie vorfahrtsberechtigten Fahrzeug werden alle relevanten Daten aufgezeichnet, die in Kap. 7.1 und im übernächsten Abschnitt „relevante Variablen“ spezifiziert sind.

Kriterien für die Verwertbarkeit der Daten

Der Versuchsablauf zeigt zwei Kriterien für die Verwertbarkeit der Daten auf:

1. Die Position des wartepflichtigen Fahrzeugs ist zentimetergenau bekannt.
2. Die Versuchsperson ist abgelenkt.

Nur wenn eine zentimetergenaue Positionsbestimmung gewährleistet wird, ist eine Vergleichbarkeit der Messdaten gegeben. Wird diese vom Positionsbestimmungssystem nicht bereit gestellt, wird die Messfahrt verworfen. Ebenso werden die Messdaten nur dann für weitere Auswertungen verwendet, wenn die Versuchsperson erfolgreich abgelenkt wurde. Zur Beurteilung der Ablenkung werden zwei Informationsquellen genutzt:

1. subjektive Beurteilung durch den Versuchsleiter
2. objektives Kriterium auf Grundlage der Messdaten

Nur wenn beide Beurteilungen für eine Ablenkung des wartepflichtigen Fahrers sprechen, wird auf Ablenkung entschieden. Das objektive Kriterium zur Beurteilung der Ablenkung basiert auf einer Reaktionszeitbetrachtung. Untersuchungen am Fahrsimulator haben gezeigt, dass die Reaktionszeit bei einem tendenziell erwarteten Ereignis bei mindestens 0,5 s liegt.³ In der Literatur wird häufig als durchschnittliche Reaktionszeit 1 s angegeben. Daher wird davon ausgegangen, dass die maximale Reaktionszeit bei einer Person in guter körperlicher Verfassung meist unter 1,5 s liegt. Diese Werte haben sich bereits in Vorversuchen bestätigt.

Wie bereits angesprochen, fährt das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug gut 1 s bevor das wartepflichtige Fahrzeug den Warnzeitpunkt erreicht los. Ab diesem Zeitpunkt hat der wartepflichtige Fahrer die Möglichkeit das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug zu sehen.

Die Reaktionszeitbetrachtung wird in Abb. 7.4 dargestellt. Bei 0 s liegt der Warnzeitpunkt. Beginnt der wartepflichtige Fahrer früher als 0,5 s nach dem Warnzeitpunkt mit einer Vollbremsung, wird davon ausgegangen, dass der Proband nicht abgelenkt war. Seine Reaktion lässt sich offensichtlich nicht auf die Warnung zurückführen. Vielmehr wurde vom

³ Donges (2007): Vorlesungsskript Fahrerassistenzsysteme.

Fahrer bereits vor der Warnung die kritische Kreuzungssituation erkennt. Erfolgt hingegen eine Reaktion später als 0,5s nach dem Warnzeitpunkt, wird eine erfolgreiche Ablenkung unterstellt.

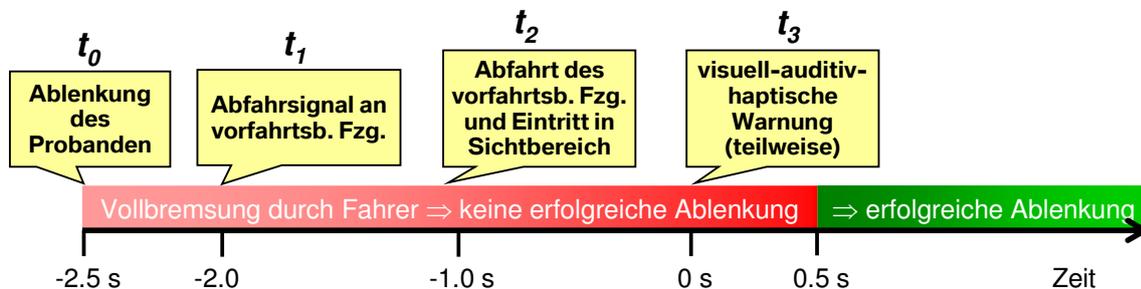


Abbildung 7.4: Reaktionszeitbetrachtung als Grundlage zur objektiven Beurteilung ob der wartepflichtige Fahrer abgelenkt war oder nicht.

Von einer erfolgreichen Interpretation der Warnung wird ausgegangen, wenn die Reaktion von 0,5 bis 1,5s nach der Warnung erfolgt.

Relevante Variablen

Der Versuchsablauf wurde bei rund der Hälfte der Versuchspersonen mit und bei der anderen Hälfte ohne Assistenz durchgeführt. Die freie Variable der Evaluierung besteht somit darin, ob eine visuell-auditiv-haptische Warnung erfolgt oder nicht.

Die abhängigen Variablen unterscheiden sich darin, ob sie durch eine objektive oder subjektive Beurteilung bestimmt werden. Objektiv beurteilte Variablen sind:

- Ablenkung der Versuchsperson
- Reaktionszeit auf die Warnung
- Position des Stillstands

Unter der Reaktionszeit auf die Warnung wird entweder die Zeit bis zur Bremspedalbetätigung oder, sofern das Bremspedal permanent betätigt wurde, die Zeit zwischen der Warnung und einem markanten Knick in der zeitlichen Verzögerungskurve verstanden. Die so ermittelte Reaktionszeit dient als Grundlage für die Beurteilung der korrekten Interpretation der Warnung. Der Position des Stillstandes dient als Grundlage zur Beurteilung der erfolgreichen Reaktion auf eine Warnung.

Subjektiv beurteilte Variablen sind:

- Einschätzung der Ablenkung der Versuchsperson durch den Versuchsleiter
- Sinneskanäle, über welche die Warnung wahrgenommen wurde
- Gründe für eine ausgebliebene Reaktion

- Maß der empfundenen Unterstützung durch die Assistenz bei der Kollisionsvermeidung

Die subjektiven Einschätzungen werden mittels eines Fragebogens direkt nach der kritischen Kreuzungssituation erfasst (siehe Anhang 10.2).

Methoden zur Auswertung

Im Rahmen der Versuchsauswertung sollen die Hypothesen zur korrekten Interpretation der Warnung und erfolgreichen Reaktion auf die Warnung sowie zum signifikanten Sicherheitsgewinn durch die Assistenz verifiziert werden. Zusätzlich ist zu analysieren, durch welche Assistenzmaßnahme die Versuchspersonen die Warnung am besten wahrgenommen haben.

Grundlage für die Verifizierung der ersten beiden Hypothesen ist die Zählung der korrekten Interpretationen sowie erfolgreichen Reaktionen auf die Warnung. Die gewonnenen Zahlen entsprechen dem Ergebnis der Entnahme einer Stichprobe aus einer Grundgesamtheit, vergleichbar mit einer Urnenziehung mit Zurücklegen. Hierbei wird eine dichtenome Variable, d.h. eine Variable mit lediglich zwei Werten, betrachtet, deren Anteil in der Grundgesamtheit mittels eines Binomialtests überprüfbar ist. Da der Binomialtest einen nicht parametrischen Test darstellt, erfordert dieser keine Annahme über die Form der zugrunde liegenden Verteilung⁴. Der Binomialtest ermöglicht so die Übertragung der beobachteten Häufigkeiten auf den Anteil in der Grundgesamtheit der Autofahrer.

Die Verifikation der Hypothese zum signifikanten Sicherheitsgewinn durch die Assistenz erfordert den Nachweis, dass der Unterschied zwischen beiden unabhängigen Stichproben nicht zufällig ist. Die eine Stichprobe besteht in den Annäherungen ohne Assistenz, die andere in den Annäherungen mit Assistenz. Dieser Nachweis stellt einen typischen Anwendungsfall für den χ^2 -Test dar⁵. Wenn auf eine relativ kleine Stichprobengröße zurückgegriffen wird, empfiehlt KRENGEL⁶ dem exakten Test nach FISHER den Vorzug zu geben. Somit wird der exakte Test nach FISHER angewendet. Da ein Irrtum bei der Verifikation der Hypothesen nicht mit fatalen Folgen verbunden ist, wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% angesetzt.

Im Folgenden wird analysiert, durch welche Assistenzmaßnahme die Versuchsperson die Warnung am besten wahrgenommen hat. Hierbei geht es darum, ob zwischen den Wahrnehmungen der einzelnen Maßnahmen ein Unterschied besteht. Ob die festgestellten Unterschiede zufällig oder signifikant sind, lässt sich mit Hilfe des WILCOXON-Test überprüfen, da es sich hier um einen Vergleich verbundener Stichproben handelt. Dieser Test setzt keine bestimmte Verteilung der Variablen voraus, sondern lediglich, dass sie geordnet werden können⁷. Diese Ordnung ist für die Assistenzmaßnahmen nach den Kategorien „wahrgenommen“ oder „nicht wahrgenommen“ gegeben.

⁴ N.N. (2007b): quantel.com.

⁵ Kregel (2000): Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik S. 186.

⁶ Kregel (2000): Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik S. 187.

⁷ Kregel (2000): Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik S. 187ff.

7.2.3 Ergebnisse

Versuchspersonen

Insgesamt wurden 45 gültige Versuchsfahrten durchgeführt. Von den Versuchspersonen sind 14 weiblich und 31 männlich. Die Altersverteilung reicht von 23 bis 59 Jahre (siehe Anhang 10.5). Der Fahrertyp ermittelt sich aus den Angaben im demographischen Fragebogen (siehe Anhang 10.3). Ein Fahrer ist einem sehr zurückhaltenden, fünf sind einem zurückhaltenden, 16 einem normalen, 21 einem sportlichen und zwei einem sehr sportlichen Fahrertyp zuzuordnen. Dies zeigt eine gewünschte Streuung der Versuchspersonen. Zwanzig Versuchspersonen wurden gewarnt und 25 nicht.

Korrekte Interpretation

Eine korrekte Interpretation der Warnung liegt vor, wenn der wartepflichtige Fahrer im Zeitraum von 0,5 bis 1,5 s nach der Warnung reagiert (siehe Kap. 7.2.1). In Abb. 7.5 wird eine Beispielreaktion einer gewarnten Versuchsperson dargestellt. Die Reaktion des Fahrers erfolgt hier knapp 1 s nach dem Warnzeitpunkt.

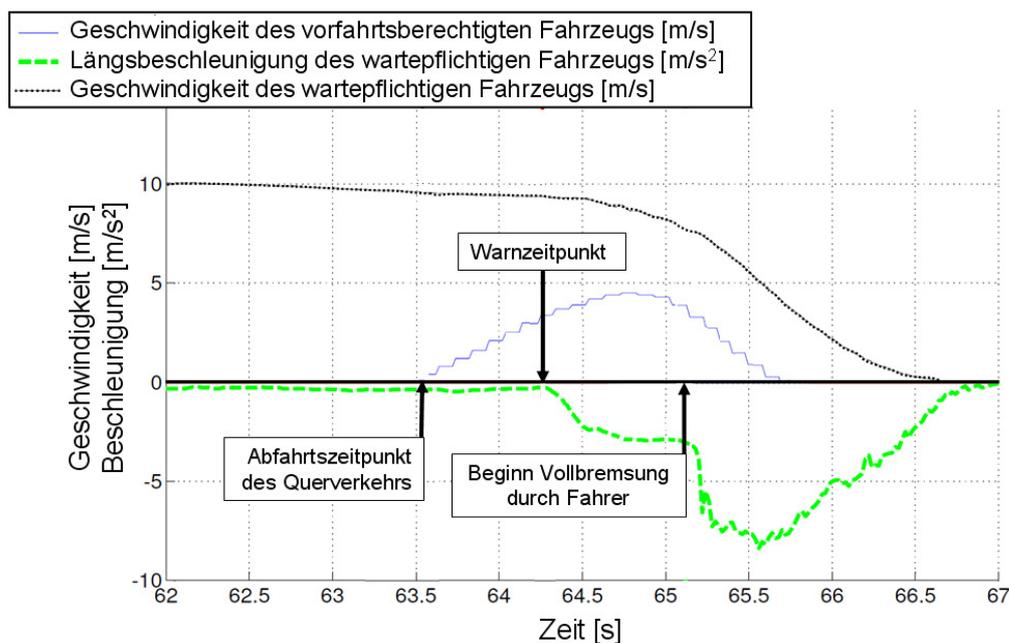


Abbildung 7.5: Beispielreaktion eines gewarnten Fahrers, der erfolgreich abgelenkt war.

Die Verzögerung während der Reaktionszeit ist durch die haptische Anbremsung gegeben. Es ist ersichtlich, dass dieser Fahrer erfolgreich abgelenkt war. Von den 20 gewarnten Fahrern haben 17 die Warnung korrekt interpretiert und drei nicht.

Der relative Anteil korrekter Interpretationen beträgt somit 85 %. Ein Binomialtest ergibt, dass bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % davon ausgegangen werden kann, dass mindestens 65 % aller gewarnten Fahrer die Warnung richtig interpretieren werden. Die Hypothese der korrekten Interpretation ist hiermit verifiziert.

Erfolgreiche Reaktion

Eine erfolgreiche Reaktion auf die Warnung liegt vor, wenn das wartepflichtige Fahrzeug vor der Haltelinie zum Stehen gebracht wird. In Abb. 7.6 wird aus der Vogelperspektive eine beispielhafte Annäherung einer Versuchsperson gezeigt, die erfolgreich auf die Warnung reagiert hat. In der Vogelperspektive sind neben den von den Fahrzeugen befahrenen Trajektorien der Mittelpunkt der Kreuzung, die Haltelinie und der Haltepunkt des wartepflichtigen Fahrzeugs eingezeichnet.

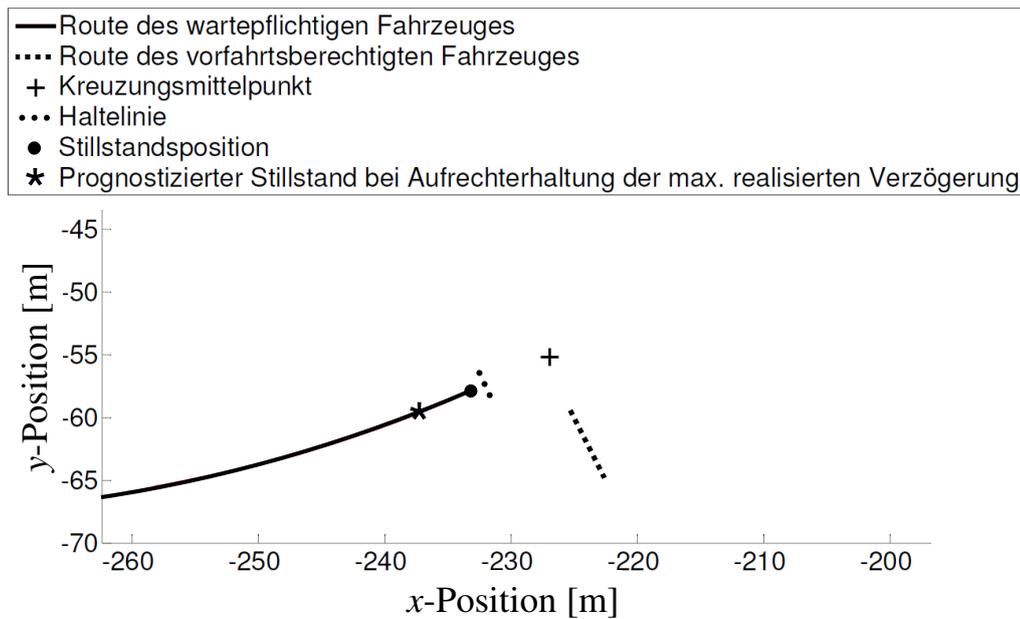


Abbildung 7.6: Vogelperspektive der Annäherung einer Versuchsperson, die erfolgreich reagiert hat.

Von den 20 gewarnten Fahrern haben 15 erfolgreich und fünf erfolglos auf die Warnung reagiert. Somit reagierten auch zwei der Fahrer mit korrekter Interpretation nicht erfolgreich. Hätten diese Fahrer jedoch die von ihnen maximal aufgebrachte Verzögerung aufrechterhalten, wäre das Fahrzeug vor der Haltelinie zum Stehen gekommen.

Ein möglicher Grund für das Lösen der Bremse besteht darin, dass die Fahrer die Verzögerung des vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs bemerkt haben. Dennoch werden diese Fahrten als nicht erfolgreiche Reaktion gewertet, da durch das kooperative Verhalten des vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs, die Wartepflicht des anderen Fahrzeugs nicht aufgehoben wird.

Als Gründe für eine nicht erfolgreiche Reaktion wurde von den Fahrern angegeben:

- Der Bezug des Warntons zur kritischen Kreuzungssituation fehlt.
- Der Warnton ist zu harmonisch.
- Von einem kooperativen Verhalten des vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs ist ausgegangen worden.

Der aufgetretene relative Anteil der erfolgreichen Reaktionen liegt bei 75 %. Ein Binomialtest ergibt, dass bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % davon ausgegangen werden kann, dass mindestens 54 % aller gewarnten Fahrer erfolgreich auf die Warnung reagieren würden. Die Hypothese zur erfolgreichen Reaktion ist hiermit verifiziert.

Signifikanter Sicherheitsgewinn

In Tab. 7.1 werden die Ergebnisse der Versuchsfahrten zum Nachweis der Wirksamkeit zur Unfallvermeidung dargestellt.

Tabelle 7.1: Verteilung der erfolglosen und erfolgreichen Reaktionen im Falle einer kritischen Kreuzungssituation ohne bzw. mit Warnung.

	erfolglose Reaktion	erfolgreiche Reaktion	gesamt [Anzahl]
ohne Warnung	92%	8%	25
mit Warnung	25%	75%	20
gesamt [Anzahl]	28	17	45

Fünfzehn der 20 Versuchspersonen, die eine Warnung erhalten hatten, reagierten erfolgreich auf die Warnung. Im Vergleich dazu haben nur zwei der 25 Versuchspersonen (8%), die keine Warnung erhalten hatten, das Fahrzeug erfolgreich vor der Haltelinie zum Stehen gebracht.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird zur Verifizierung der Hypothese: „Durch die Assistenz des KQA werden in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario signifikant mehr Kollisionen erfolgreich verhindert als ohne Assistenz!“ der exakte Test nach FISHER angewendet. Als Ergebnis zeigt sich eine Verifikation mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als ein Promille. Dies deckt sich auch mit den Aussagen von 14 der 15 erfolgreich gewarteten Versuchspersonen, die Warnung habe dazu geführt, dass sie schneller auf die Gefahr aufmerksam wurden. Die hochsignifikante Wirksamkeit des KQA zur Unfallvermeidung ist somit nachgewiesen.

Wahrgenommene Assistenzmaßnahmen

Die Assistenzstrategie „visuell-auditiv-haptische Warnung“ baut sich aus drei Assistenzmaßnahmen auf (siehe Kap. 7.3.2):

1. Anzeige im Head-Up Display
2. akustisches Warnsignal
3. haptische Anbremsung mit -3 m/s^2 während der Reaktionszeit

Im Anschluss an die kritische Kreuzungssituation wurde den Versuchspersonen folgende offene Frage gestellt: „Wie wurden Sie vor der potentiellen Kollision gewarnt?“. Das Ziel dieser Frage besteht darin, zu bestimmen, welche der drei Assistenzmaßnahmen vom gewarteten Fahrer in einer kritischen Kreuzungssituation am besten wahrgenommen wird. Die Ergebnisse der Befragung sind in Tab. 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2: Von den Versuchspersonen wahrgenommene Art der Assistenz im ersten Beispielszenario.

Assistenzmaßnahme	wahrgenommen
visuell	8
auditiv	20
haptisch	12

Von allen Fahrern wurde die auditive Warnung wahrgenommen, von zwölfen die haptische und von acht die visuelle Warnung. Ein WILCOXON-Test liefert für alle drei möglichen Paare der drei Sinneskanäle zu den Alternativen „wahrgenommen“, „nicht wahrgenommen“ eine zweiseitige asymptotische Signifikanz (siehe Tab. 7.3).

Tabelle 7.3: WILCOXON-Test zur Beurteilung des Unterschieds hinsichtlich der Wahrnehmung der drei Assistenzmaßnahmen in einem realen kritischen Kreuzungsszenario.

Paarung Assistenzmaßnahmen	Signifikanz aus WILCOXON-Test
visuell-auditiv	0,001
auditiv-haptisch	0,005
visuell-haptisch	0,248

Es zeigt sich, dass die auditive Warnung hoch signifikant besser wahrgenommen wird als die haptische und visuelle. Zwischen der visuellen und haptischen Warnung besteht kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Wahrnehmung. Mit gut 50 % haben im Vergleich zur auditiven Warnung wenige Versuchspersonen die haptische wahrgenommen. Ein möglicher Grund hierfür besteht darin, dass die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen sehr stark durch die Wahrnehmung der kritischen Kreuzungssituation sowie durch die kollisionsvermeidende Bremsung gebunden war. So zeigte sich im Rahmen des nachfolgenden Beispielszenarios, das für den Nachweis der Grundakzeptanz verwendet wird, dass fast alle Versuchspersonen, die im ersten Beispielszenario die haptische Anbremsung nicht bemerkt hatten, nach einigen weiteren Annäherungen mit dieser Assistenzstrategie diese bemerkten. Häufig wurde hierauf von der Versuchsperson der Gedankengang geäußert, dass wahrscheinlich im ersten Beispielszenario die haptische Anbremsung durch ihren gerichteten Impuls dazu geführt hat, die Dringlichkeit einer Verzögerung zu verdeutlichen, jedoch auf Grund der genannten Aspekte das Erkennen der haptischen Anbremsung nicht bis auf die kognitive Ebene gelangt ist. Hieraus lässt sich folgern, dass die haptische Anbremsung doch eine höhere Bedeutung hat als das Ergebnis der offenen Frage vermuten lässt.

Von den fünf Versuchspersonen, bei denen keine erfolgreiche Reaktion auf die Warnung stattgefunden hat, wurden verschiedene Gründe für die ausgebliebene Reaktion genannt. So gingen drei von einem kooperativen Verhalten des anderen Fahrers aus. Ein weiterer genannter Grund bestand darin, dass zwei Versuchspersonen der Bezug zwischen dem Warnton und der Situation fehlte.

7.3 Nachweis der Grundakzeptanz der Assistenz und favorisierte Assistenzstrategie

Der KQA soll den wartepflichtigen Fahrer rechtzeitig warnen. Die Grundakzeptanz der Assistenz hängt daher davon ab, in wie weit die Warnung zum richtigen Zeitpunkt erfolgt.

Die Qualität des Warnzeitpunktes wird durch die Unschärfe der Fahrzeugpositionsdaten beeinträchtigt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der wartepflichtige Fahrer eine gewisse Schwankung des Warnzeitpunktes akzeptiert bzw. nicht registriert.

Zum Nachweis der Grundakzeptanz wurde eine Methodik entwickelt, welche genau die Akzeptanz eines variierenden Warnzeitpunktes evaluiert. Zusätzlich werden verschiedene Assistenzstrategien bewertet. Hierdurch soll auf der einen Seite den Versuchspersonen die Möglichkeit der Vergleichbarkeit verschiedener Assistenzstrategien gegeben und auf der anderen Seite eine durch die Versuchsperson favorisierte Assistenzstrategie bestimmt werden. Eine Untersuchung des Einflusses von Fehlwarnungen erfolgt nicht im Rahmen dieser Arbeit.

7.3.1 Anforderungen

Zum Nachweis der Grundakzeptanz der Assistenz des KQA sind nachfolgende existentielle **Hypothesen** zu verifizieren:

- Durch Probandenversuche gelingt es, an einer repräsentativen Kreuzung einerseits einen akzeptierten Korridor für den resultierenden Längsrichtungsfehler und andererseits einen Bereich, in dem keine Akzeptanz mehr vorliegt, zu ermitteln.
- Durch Probandenversuche gelingt es, an einer repräsentativen Kreuzung eine vom Fahrer des wartepflichtigen Fahrzeugs favorisierte Assistenzstrategie abzuleiten.

Das Kriterium für den akzeptierten Korridor besteht darin, dass die wartepflichtigen Fahrer innerhalb eines Korridors den Warnzeitpunkt mit „eher zu spät“, „genau rechtzeitig“ oder „eher zu früh“ bewerten. Diese Kriterien leiten sich aus der Überlegung ab, dass einerseits Vorversuche gezeigt haben, dass den Versuchspersonen die Bewertungen des „genau richtigen“ Warnzeitpunktes schwer fällt. Auf der anderen Seite werden von den Versuchspersonen die Beurteilungen „eher zu spät“ und „eher zu früh“ noch als akzeptabel betrachtet, wohingegen die Beurteilungen „viel zu spät“ und „viel zu früh“ die Nichtakzeptanz ausdrücken.

Die theoretische Untergrenze des akzeptierten Korridors leitet sich aus Fahrerverhaltensuntersuchungen ab und wird auf einen Bremsweg mit einer Verzögerung von $-3,1 \text{ m/s}^2$ festgelegt. Als theoretische Obergrenze wird ein Bremsweg mit $-8,8 \text{ m/s}^2$ festgelegt (siehe Kap. 4.1.2).

Die Anforderungen an das Beispielszenario sind die **Variation der Assistenzstrategien**, die **Variation des Warnzeitpunktes**, die **Übertragbarkeit der Ergebnisse** auf reale Kreuzungsszenarien sowie die **Vergleichbarkeit der Daten** zwischen verschiedenen Versuchspersonen und **Sicherheit für Mensch und Maschine**. Die Variation der Assistenzstrategien soll zur relativen Bewertung der verschiedenen Strategien dienen. Die Variation des Warnzeitpunktes soll im Bereich des voraussichtlich akzeptierten Korridors des resultierenden Längsrichtungsfehlers erfolgen. Dabei sind auch gezielt Warnzeitpunkte im voraussichtlich nicht akzeptierten Bereich zu untersuchen, um eine Bestimmung der

Grenze zwischen „akzeptiert“ und „nicht akzeptiert“ zu ermöglichen. Es ist erforderlich eine Übertragbarkeit der Ergebnisse durch realitätsnahe Versuchsbedingungen zu gewährleisten, d.h.:

- Die Versuchsperson darf zwar über den KQA informiert sein, jedoch nicht über das Ziel der Versuchsfahrt.
- Reihenfolgeeffekte sowie Monotonie sind zu vermeiden.
- Die Geometrie der Beispielfahrt basiert auf den Ergebnissen der Unfallanalyse und ist identisch mit der Kreuzungsgeometrie in Beispielszenario eins für den Nachweis der Wirksamkeit.
- Die Adressierung von zwei Geschwindigkeitsbereichen (innerorts und außerorts) ist vorzusehen.
- Eine Streuung von Fahrertyp, Alter und Geschlecht ist erforderlich.

7.3.2 Methodik

Die Gewährleistung der **Vergleichbarkeit der Daten** durch reproduzierbare Versuchsbedingungen sowie die **Sicherheit für Mensch und Maschine** werden wie im Abschnitt „Nachweis der Wirksamkeit“ beschrieben, realisiert.

Zur **Variation der Assistenzstrategie** werden drei verschiedene Assistenzstrategien verwendet (siehe Abb. 7.1):

- visuell-haptische Warnung mit Rampe
- visuell-auditiv-haptische Warnung
- visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung

Auch in diesem Beispielszenario wird auf die Informationsstufe der Assistenz verzichtet, weil der Fokus der Untersuchung auf der Beurteilung unterschiedlicher Warnzeitpunkte und -strategien liegt.

Zur **Variation des Warnzeitpunktes** erfolgt die Addition bzw. Subtraktion eines zeitlichen Offsets auf einen definierten Ausgangs-Warnzeitpunkt. Dem zeitlichen Offset wird gegenüber einem räumlichen Offset der Vorzug gegeben, da hierdurch auch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten vergleichbare Warnzeitpunkte realisiert werden. Auf Grundlage von Vorversuchen werden für die Versuchsfahrten die in Abb. 7.7 dargestellten Warnzeitpunkte gewählt.

Wie aus Abb. 7.7 ersichtlich, unterscheiden sich die Warnzeitpunkte in Hinblick auf Assistenzstrategie und Geschwindigkeitsbereich. Darüber hinaus sind sie auch innerhalb der gleichen Assistenzstrategie und des gleichen Geschwindigkeitsbereichs geschwindigkeitsabhängig (gestrichelte Linien). Ihre Zeitabstände in Relation zum jeweiligen Ausgangs-Warnzeitpunkt sind aus dem Versuchsleiterprotokoll im Anhang 10.2 zu erkennen.

Um die **Übertragbarkeit der Ergebnisse** zu gewährleisten, werden zwei verschiedene Geschwindigkeitsbereiche untersucht. Diese liegen bei 40 ± 10 und 60 ± 10 km/h. Mit einer Geschwindigkeit von 30 bis 50 km/h wird eine typische Annäherungsgeschwindigkeit des Fahrzeugs an eine Kreuzung innerorts und von 50 bis 70 km/h außerorts gewählt. Durch

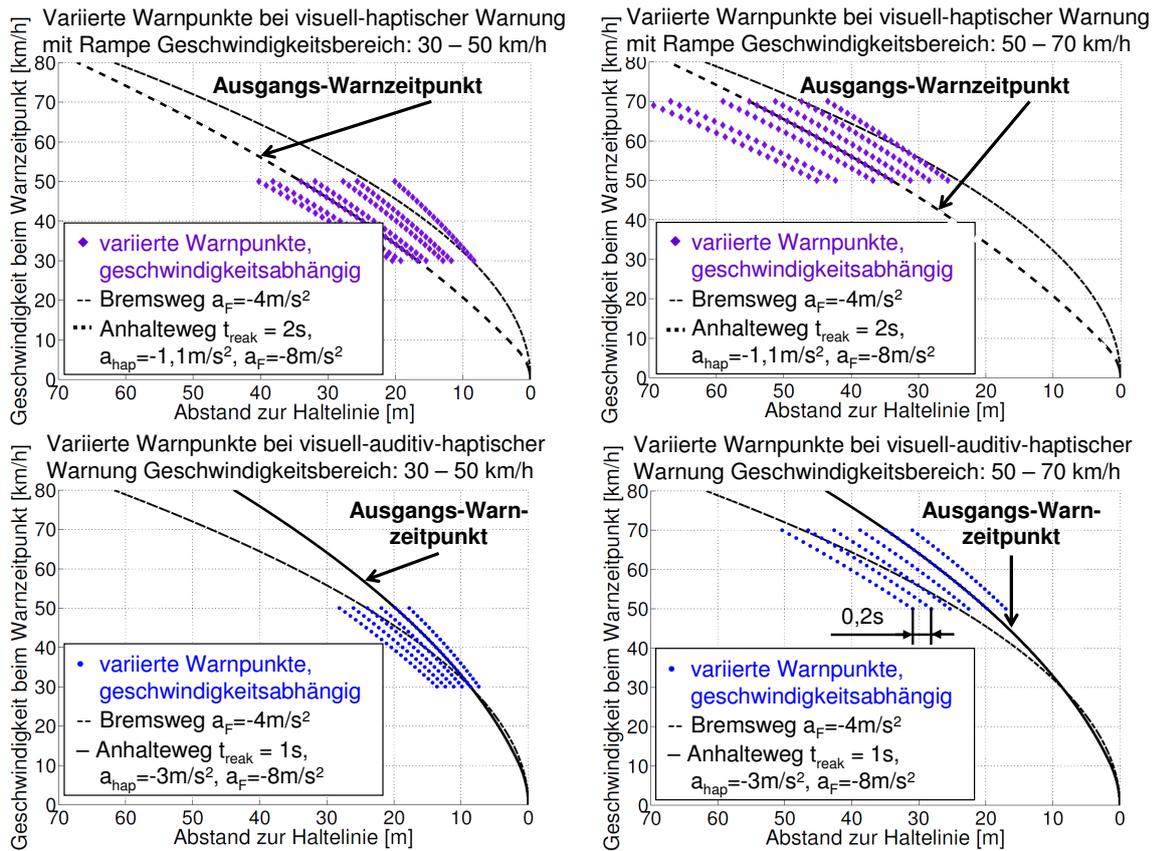


Abbildung 7.7: Variierte Warnzeitpunkte bei den beiden Warnstrategien visuell-haptische Warnung mit Rampe und visuell-auditiv-haptische Warnung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zum Warnzeitpunkt - beispielhaft ein Variationsschritt von 0,2s.

den Versuchsleiter erhalten die Versuchspersonen vor diesem Versuchsteil eine kurze theoretische Einführung über das Ziel, die Funktion und den technischen Aufbau des KQA. Um Reihenfolgenefekte zu vermeiden, erfolgt eine Randomisierung der Assistenzstrategien und Geschwindigkeiten zwischen den Versuchspersonen. Zur Vermeidung von Monotonie unterhält sich der Versuchsleiter mit den Versuchspersonen über allgemeine Themen. Fragen zum Ziel dieser Messfahrten werden nicht beantwortet. Zusätzlich erfolgt eine Kombination aus Fahrten mit und ohne Warnung. Die Fahrten ohne Warnung werden als Baseline-Annäherungen bezeichnet und dienen dazu, den Gewöhnungseffekt, den diese Versuchsfahrten ggf. mit sich bringen, möglichst gering zu halten.

Wie in Abb. 7.8 dargestellt, liegt eine rechtwinklige Vorfahrtachten-Kreuzung vor. Die Fahrbahnen weisen keine Krümmung auf. Ein kleiner Hügel verdeckt während der Annäherung vorübergehend die Sicht zum vorfahrtsberechtigten Fahrzeug. Hierdurch sollen möglichst realitätsnahe Versuchsbedingungen auf dem Messgelände geschaffen werden.

Versuchsablauf

Das wartepflichtige Fahrzeug nähert sich der Kreuzung mit einer vom Versuchsleiter vorgegebenen Geschwindigkeit. Die Annäherungsgeschwindigkeit des vorfahrtsberechtigten

Fahrzeugs beträgt rund die halbe Geschwindigkeit des wartepflichtigen Fahrzeugs. Die Annäherung des vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs erfolgt so, dass ein hohes Kollisionsrisiko zwischen den beiden Fahrzeugen besteht.

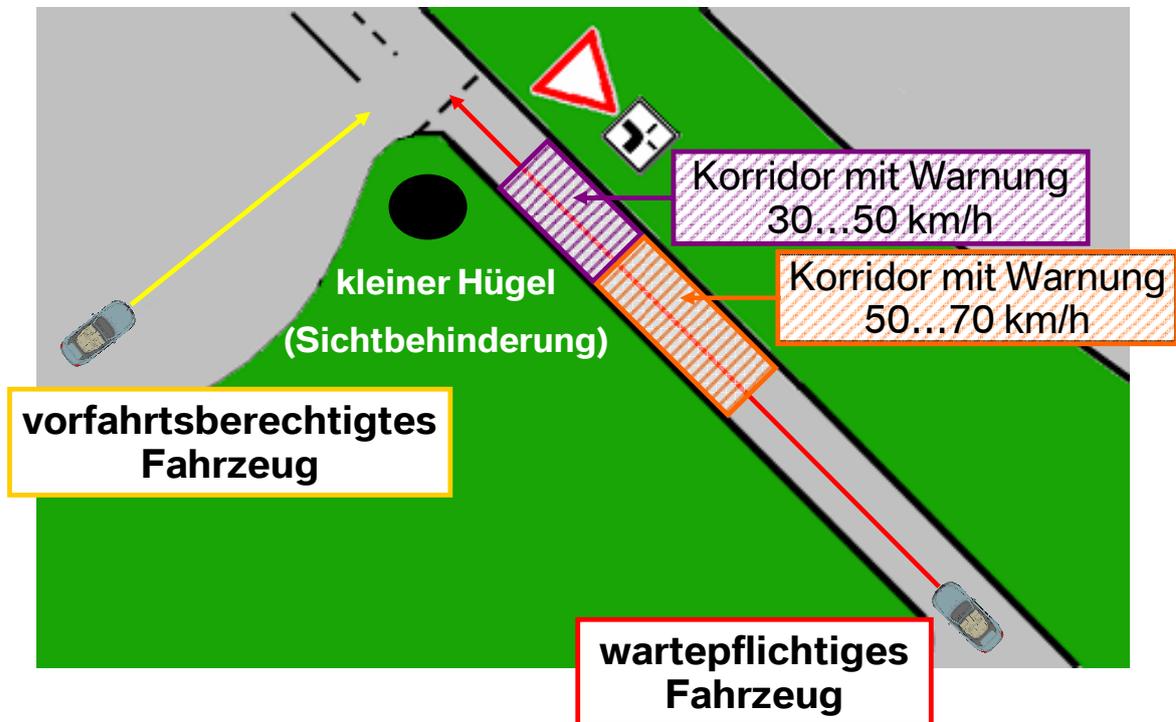


Abbildung 7.8: Kritische Kreuzungssituation zum Nachweis der Grundakzeptanz der Assistenz.

In diesem Beispielszenario wird auf die Nutzung *virtueller Fahrzeuge* verzichtet, da die Annäherungsgeschwindigkeit des wartepflichtigen Fahrzeugs bekannt ist. Der Start des vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs basiert rein auf räumlichen Punkten. So befindet sich der Startpunkt des vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs 50 m vor der Kreuzung. Überfährt das wartepflichtige Fahrzeug bei der Annäherung an die Kreuzung die 100 m Grenze, wird über das Kommunikationssystem ein Abfahrtssignal an das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug gesendet. Der vorfahrtsberechtigte Fahrer setzt hierauf das Fahrzeug in Bewegung. Nachdem das wartepflichtige Fahrzeug den letztmöglichen Bremszeitpunkt passiert hat, verzögert das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug und hält an seiner virtuellen Haltelinie an.

Insgesamt besteht das zweite Beispielszenario aus fünf Blöcken:

- Block 1 und 2: visuell-haptische Warnung mit Rampe in den Bereichen 40 und 60 km/h
- Block 3 und 4: visuell-auditiv-haptische Warnung in den Bereichen 40 und 60 km/h
- Block 5: visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung im Bereich 60 km/h.

Pro Block und Fahrer werden etwa acht Kreuzungsannäherungen durchgeführt. Die erste und letzte Annäherung werden je als eine Baseline-Annäherung, d.h. Annäherung mit Stopp an der Haltelinie ohne Warnung, durchgeführt. Die Versuchsperson wird hierüber

vom Versuchsleiter entsprechend informiert. Bei den anderen Annäherungen wird die Versuchsperson aufgefordert, erst zu verzögern, wenn eine Warnung erfolgt. Bei diesen Fahrten wird jeweils ein anderer zeitlicher Offset vom Versuchsleiter eingestellt. Die Versuchsperson weiß über den Offset nicht Bescheid. Zwischen den Versuchspersonen werden in jedem Block die zeitlichen Offsets sowie die einzelnen Blöcke zueinander randomisiert. Von der Randomisierung ausgenommen ist Block 5. Dieser wird immer als letzter Block angefahren und die Versuchsperson ist instruiert, das Assistenzsystem selbst verzögern zu lassen. Dies ist erforderlich, da die Versuchspersonen bei diesem Beispielszenario nicht von der kritischen Kreuzungssituation überrascht werden und somit keine so lange Reaktionszeit zeigen würden, dass die aktive Vollverzögerung aktiv werden würde. Wie im Rahmen des ersten Beispielszenarios ermittelt, zeigen auch im unerwartet kritischen Kreuzungsszenario fast alle gewarnten Fahrer eine so schnelle Reaktion, dass keine potentiell nachgelagerte aktive Vollverzögerung eintritt.

In Block 5 wird nur ein Warnzeitpunkt angefahren, da davon ausgegangen wird, dass die Versuchsperson eine aktive Vollverzögerung nur akzeptiert, wenn das Fahrzeug nahe der Haltelinie zum Stehen kommt. Es ist erforderlich, dies bei einer Realisierung des aktiven Eingriffs hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit der Positionsbestimmung mit zu berücksichtigen.

Im Rahmen der Evaluierung der Grundakzeptanz der Assistenz soll der Versuchsperson mittels Block 5 auch der physikalisch letztmögliche Warnzeitpunkt aufgezeigt werden. Dies wird für eine ganzheitliche Bewertung der Assistenz als hilfreich angesehen.

Nach jeder Annäherung an die Kreuzung mit einer Assistenz wird die Versuchsperson nach der Bewertung des Warnzeitpunktes befragt. Hierfür stehen die fünf Stufen „viel zu spät“, „eher zu spät“, „genau rechtzeitig“, „eher zu früh“, „viel zu früh“ zur Verfügung, siehe Anhang 10.2.

Die erste Fahrt mit Assistenz in einem Block wird von den Versuchspersonen als Eingewöhnungsfahrt/Vergleichsfahrt gewertet. Nach dem 5. Block befragt der Versuchsleiter die Versuchsperson zu folgenden Aspekten (siehe Anhang 10.2):

- Die Assistenz vermittelt klar, wie zu reagieren ist.
- Die Assistenz ist komfortabel.
- Die Assistenz ist gefährlich.
- Ich würde mir die Assistenz im eigenen Fahrzeug wünschen.

Im Anschluss an die Versuchsfahrt wird der Versuchsperson ein Fragebogen zur „Beurteilung des Gesamtsystems“ zum Ausfüllen vorgelegt.

Kriterien für Verwertbarkeit der Daten

Zur Verwertbarkeit der Daten gibt es zwei Kriterien:

1. Die Position des wartepflichtigen Fahrzeugs ist zentimetergenau bekannt.
2. Bei der Versuchsperson ist grundsätzlich die Fähigkeit und ernsthafte Bereitschaft zu einer Beurteilung der Warnzeitpunkte vorhanden.

Hinsichtlich der Positionsgenauigkeit gilt dasselbe Kriterium wie im ersten Beispielszenario. Zur Beurteilung des zweiten Kriteriums wird zusätzlich für jeden einzelnen Block der Zusammenhang zwischen der zeitlichen Verschiebung und den jeweiligen Urteilen zur Rechtzeitigkeit analysiert. Hierzu wird der τ_B -Korrelationskoeffizient nach KENDALL berechnet. Ist dieser positiv, so kann von einem fundierten Urteil in Bezug auf die Rechtzeitigkeit ausgegangen werden.⁸

Relevante Variablen

Der Ablauf des Versuches ist grundsätzlich bei allen Versuchspersonen der Gleiche. Die freien Variablen sind:

- Assistenzmaßnahme
- Geschwindigkeit
- Zeitlicher Offset des Warnzeitpunktes

Die abhängigen Variablen werden von der Versuchsperson subjektiv beurteilt. Diese sind:

- Bewertung des Warnzeitpunktes in Bezug auf Rechtzeitigkeit
- Bewertung der Assistenzstrategie in Bezug auf:
 - Klarheit der Handlungsanweisung
 - Gefahr
 - Komfort
 - Wunsch im eigenen Fahrzeug

Die subjektiven Einschätzungen werden mittels Fragebögen (siehe Anhang 10.2) direkt nach jeder Annäherung und am Ende der gesamten Versuchsfahrten ermittelt. Am Ende der Versuchsfahrten wird von der Versuchsperson ein Fragebogen zur Beurteilung des Gesamtsystems ausgefüllt (siehe Anhang 10.4).

Methoden zur Auswertung

Im Rahmen der Versuchsauswertung sollen die Hypothesen zum akzeptierten Korridor des resultierenden Längsrichtungsfehlers und zur favorisierten Assistenzstrategie verifiziert werden. Grundlage für die Verifikation der ersten Hypothese ist eine Zählung der Bewertungen verschiedener Warnzeitpunkte innerhalb eines definierten Korridors. Die gewonnenen Anzahlen entsprechen dem Ergebnis der Entnahme einer Stichprobe aus einer Grundgesamtheit, vergleichbar mit einer Urnenziehung mit Zurücklegen. Die Bewertungen innerhalb des Bereiches werden in die Kategorien „akzeptiert“, „nicht akzeptiert“ unterteilt. Somit liegt eine dictionome Variable vor, deren Anteil in der Grundgesamtheit mittels eines Binomialtests überprüft wird.

Die Verifikation der Hypothese zur favorisierten Assistenzstrategie erfolgt auf Grundlage der Bewertungen der Assistenzstrategie anhand eines Fragebogens. Um zu überprüfen, ob der Unterschied in der Bewertung der Assistenzstrategien zufällig oder signifikant ist, wird der WILCOXON-Test angewandt. In Kap. 7.2.2 wurde bereits genauer auf diese beiden Test eingegangen.

⁸ Döllerer (2007): Einführung in die Biometrie.

7.3.3 Ergebnisse

Versuchspersonen

Das zweite Beispielszenario schließt sich direkt an das erste Beispielszenario an. Insgesamt haben an diesem Versuchsteil 37 Versuchspersonen teilgenommen. Von den Versuchspersonen sind 14 weiblich und 23 männlich. Die Altersverteilung reicht von 23 bis 59 Jahre, siehe Anhang 10.5. Kein Fahrer ist einem sehr zurückhaltenden Fahrertyp zuzuordnen, fünf einem zurückhaltenden, 13 einem normalen, 16 einem sportlichen und drei einem sehr sportlichen. Dies zeigt die gewünschte Streuung der Versuchspersonen.

Analyse der Kriterien für Verwertbarkeit der Daten

Von den über 1000 Annäherungen war in elf Fällen die geforderte Positionsgenauigkeit nicht gegeben. Grundlage für diese Einschätzung stellen die vier Kenngrößen Standardabweichung der Position, Satellitenanzahl, Positionstyp und Alter der Korrekturdaten dar.

Zur Analyse der grundsätzlichen Fähigkeit und Ernsthaftigkeit der Versuchsperson zu einer Beurteilung der Warnzeitpunkte wurde der τ_B -Korrelationskoeffizient nach KENDALL berechnet. Bei allen Annäherungsblöcken ist der τ_B -Korrelationskoeffizient nach KENDALL zweimal nicht positiv. Diese beiden Fälle sowie die elf oben genannten Annäherungen werden für die weitere Auswertung nicht verwendet.

Akzeptierter Korridor des resultierenden Längsrichtungsfehlers

Ein akzeptierter Korridor liegt vor, wenn der wartepflichtige Fahrer innerhalb eines Korridors verschiedene Warnzeitpunkte mit „eher zu spät“, „genau rechtzeitig“ oder „eher zu früh“ bewertet und in diesem Korridor nur eine geringe Anzahl von Warnzeitpunkten mit der Bewertung „viel zu spät“ und „viel zu früh“ liegen. Für die Irrtumswahrscheinlichkeit wird 5% angenommen, da ein Irrtum nicht mit fatalen Folgen verbunden ist.

Die folgenden Betrachtungen basieren auf der Annahme, dass die Bewertung der Akzeptanz des Warnzeitpunktes durch den Fahrer hauptsächlich von der von ihm aufgebrauchten Verzögerung sowie dem daraus resultierenden Haltepunkt des Fahrzeugs relativ zur Haltelinie abhängt. Der Haltepunkt relativ zur Haltelinie wird maßgeblich durch die Reaktionszeit und die aufgebrauchte Verzögerung beeinflusst.

Ein grundsätzliches Problem dieses Beispielszenarios besteht darin, dass der wartepflichtige Fahrer von der kritischen Kreuzungssituation nicht überrascht wird. Daher ist zu erwarten, dass der Fahrer eine deutlich kürzere Reaktionszeit zeigt als bei einer realen, plötzlich auftretenden kritischen Kreuzungssituation. Um die unrealistisch kurze Reaktionszeit auf die Warnung zu eliminieren, wird bei der Auswertung als Bezugspunkt nicht der Warnzeitpunkt betrachtet, sondern der Bremsbeginn des Fahrers. Auf Grundlage dieses Bezugspunktes wird die vom Fahrer aufzubringende Verzögerung, mit der das Fahrzeug noch an der Haltelinie zum Stehen gebracht werden kann, berechnet.

In Abb. 7.9 und 7.10 wird für die beiden Assistenzstrategien die vom Fahrer erforderliche Verzögerung ab Bremsbeginn für einen Stopp an der Haltelinie als Funktion der Geschwindigkeit zu Bremsbeginn dargestellt.

Die Unterschiede bei den erforderlichen Verzögerungen ergeben sich aus den variierten Warnzeitpunkten. Für jede erforderliche Verzögerung wird die Bewertung des Fahrers angegeben.

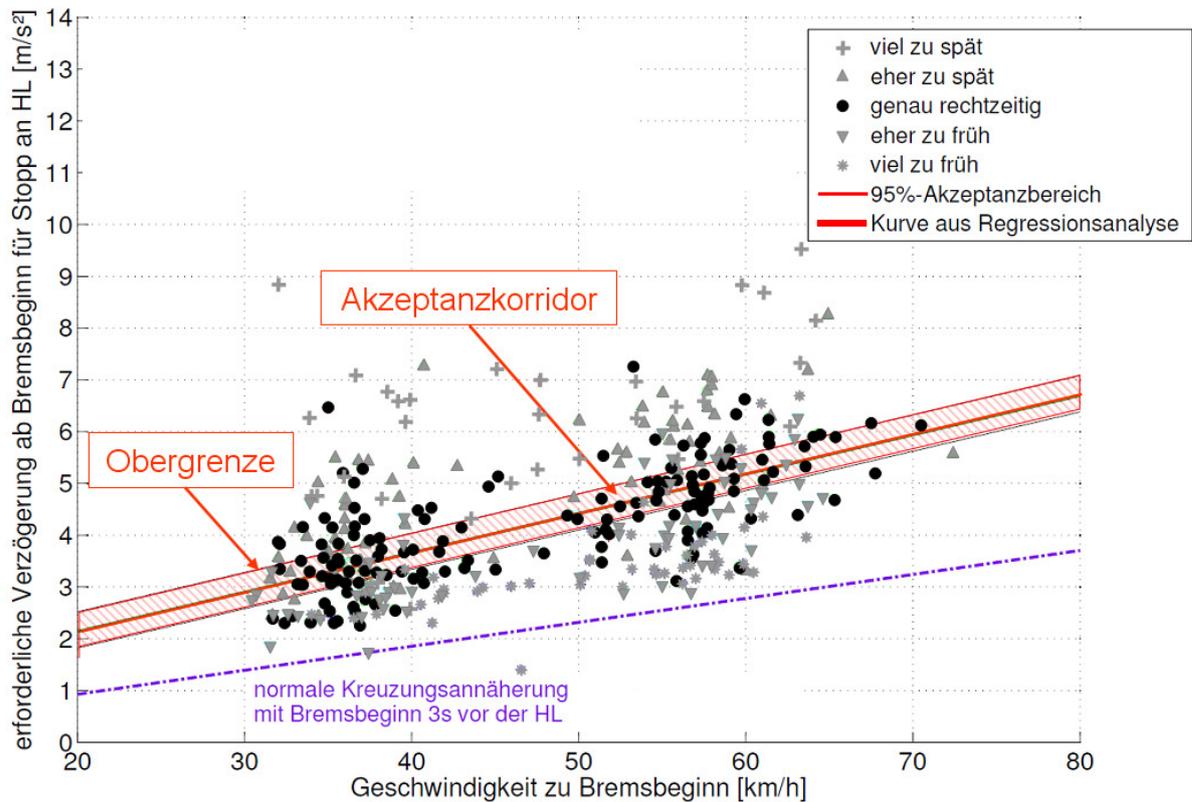


Abbildung 7.9: Akzeptanz der Warnzeitpunkte bei der visuell-haptischen Warnung mit Rampe (Verzögerungen als Betrag).

Nach VAN DER HORST⁹ ist bei einer konfliktfreien Kreuzungsannäherung der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit zu Bremsbeginn v_x und der erforderlichen Verzögerung $a_{x,erf}$ linear. So konnte VAN DER HORST im Rahmen einer Kreuzungsbeobachtung zeigen, dass der Bremsbeginn bei einer konfliktfreien Kreuzungsannäherung relativ konstant bei 3s bevor das Fahrzeug ohne Bremsung die Kreuzung erreicht hätte liegt. Ein Grund hierfür besteht darin, dass sich der Fahrer in seinem Verhalten bei der Kreuzungsannäherung vorwiegend an zeitlichen Größen orientiert. Für den Bremsweg gilt daher:

$$\text{Bremsweg} = v \cdot t = \frac{v^2}{2 \cdot |a|} \quad (7.1)$$

Die sich hieraus ergebende Geradengleichung für die Bremsverzögerung lautet:

$$\frac{|a_{x,erf}|}{\text{m/s}^2} = 0,046 \cdot \frac{v_x}{\text{km/h}} \quad (7.2)$$

Diese Gerade ist in den Abb. 7.9 und 7.10 ebenfalls dargestellt.

Zur Ableitung der vom Fahrer favorisierten erforderlichen Verzögerung wird eine Regressionsanalyse durchgeführt. Auf Grund der Ergebnisse von VAN DER HORST wird von einer Geraden ausgegangen. Grundlage für die Regressionsgerade sind die erforderlichen

⁹ van der Horst (1990): A Time-based Analysis of Road User Behaviour at Intersections S. 13.

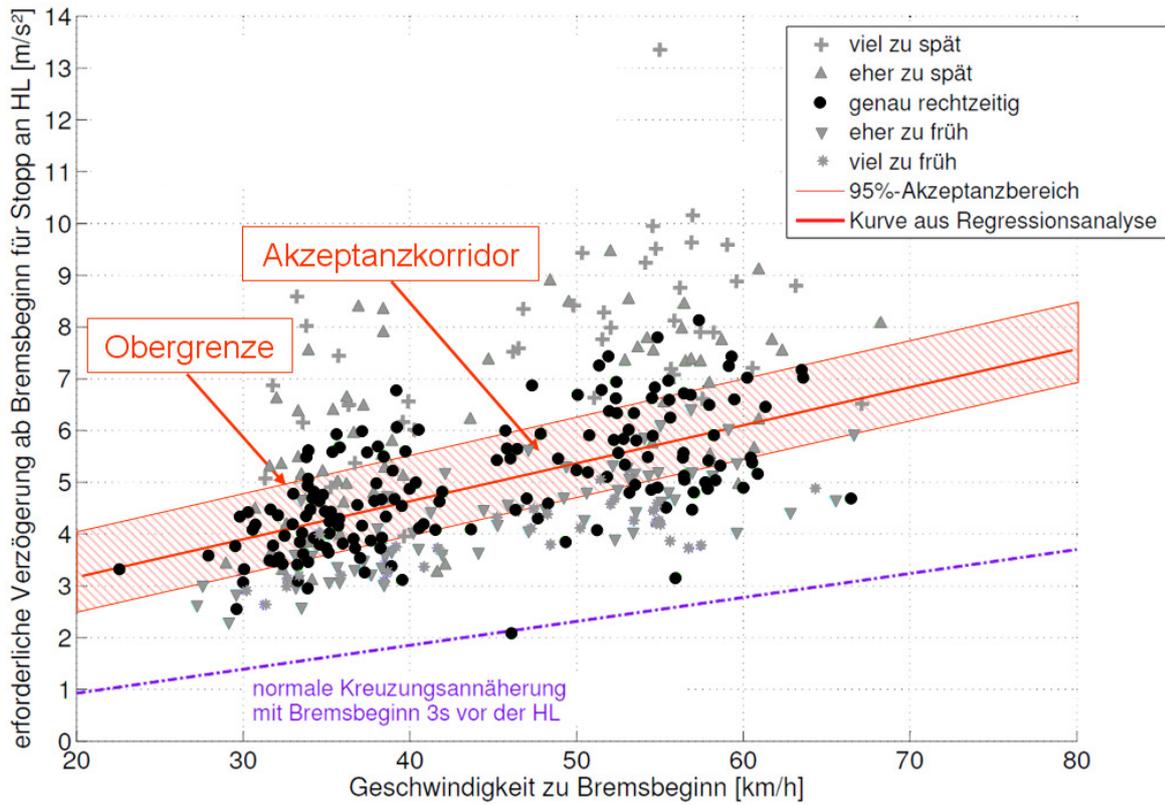


Abbildung 7.10: Akzeptanz der Warnzeitpunkte bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung (Verzögerungen als Betrag).

Verzögerungen, welche von den Fahrern als „genau rechtzeitig“ beurteilt wurden. Die Bestimmung der Regressionsgeraden basiert auf der „Methode der kleinsten Quadrate“^{10,11}. Die numerischen Werte für die Regressionsgerade lauten für die visuell-haptische Warnung mit Rampe

$$\frac{|a_{x,erf}|}{\text{m/s}^2} = 0,6 + 0,076 \cdot \frac{v_x}{\text{km/h}} \quad (7.3)$$

und für die visuell-auditiv-haptische Warnung

$$\frac{|a_{x,erf}|}{\text{m/s}^2} = 1,7 + 0,074 \cdot \frac{v_x}{\text{km/h}} \quad (7.4)$$

Für beide Assistenzstrategien weisen die Regressionsgeraden sowie die Gerade nach VAN DER HORST eine positive Steigung auf. Dies zeigt, dass der Fahrer sowohl bei einer konfliktfreien Kreuzungsannäherung als auch im Falle einer Warnung mit steigender Geschwindigkeit die Erfordernis einer höheren Verzögerung akzeptiert.

Zur Bestimmung des akzeptierten Korridors der Warnzeitpunkte, also dem empirisch ermittelten Akzeptanzkorridor (Abb. 7.9 und 7.10), wird um die Regressionsgerade ein Korridor dergestalt definiert, dass mindestens 95% aller eingeschlossenen Punkte die Be-

¹⁰ Bronstein et al. (2005): Taschenbuch der Mathematik S. 803f.

¹¹ Kregel (2000): Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik S. 168f.

wertung „eher zu spät“, „genau rechtzeitig“ oder „eher zu früh“ aufweisen. Die Grenzen des Korridors werden parallel zur Regressionsgeraden gelegt.

Bei der visuell-haptischen Warnung mit Rampe wurden von insgesamt 396 Verzögerungswerten 301 mit „eher zu spät“, „genau rechtzeitig“ oder „eher zu früh“ bewertet. Innerhalb des Korridors wurden 90 der 94 eingeschlossenen Verzögerungswerte so beurteilt. Bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung wurden von insgesamt 392 Verzögerungswerten 314 mit „eher zu spät“, „genau rechtzeitig“ oder „eher zu früh“ beurteilt. Innerhalb des Korridors wurden 160 der 168 eingeschlossenen Verzögerungswerte so beurteilt.

Der Binomialtest ergibt, dass bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % davon ausgegangen werden kann, dass mindestens 89 % aller gewarnten Fahrer eine visuell-haptische Warnung mit Rampe bzw. 90 % eine visuell-auditiv-haptische Warnung innerhalb des jeweils bestimmten Korridors akzeptieren. Damit ist die Hypothese zur Existenz eines akzeptierten Korridors des resultierenden Längsrichtungsfehlers verifiziert.

Die räumliche Größe des Akzeptanzkorridors wird auf Grundlage der erforderlichen Verzögerungswerte $a_{erf,u}$ und $a_{erf,o}$ auf den Randgeraden des Korridors berechnet. Für die visuell-haptische Warnung mit Rampe ergibt sich bei 40 km/h eine erforderliche Verzögerung im Bereich von $-3,3 \text{ m/s}^2$ bis $-4,0 \text{ m/s}^2$ und bei 60 km/h von $-4,9$ bis $-5,6 \text{ m/s}^2$. Bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung ergeben sich entsprechend $-4,0$ bis $-5,6 \text{ m/s}^2$ und $-5,4$ bis $-7,0 \text{ m/s}^2$. Die Breite des Korridors b_{Kor} berechnet sich nach:

$$b_{Kor} = \left| \frac{v_x^2}{-2 \cdot a_{x,erf,u}} - \frac{v_x^2}{-2 \cdot a_{x,erf,o}} \right| \quad (7.5)$$

Somit beträgt die Breite des Korridors bei der visuell-haptischen Warnung mit Rampe 3,3 m bei 40 km/h und 3,5 m bei 60 km/h. Bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung liegt die Breite entsprechend bei 4,4 m und 5,9 m. Die Entfernung bei Warnung, die als „genau rechtzeitig“ beurteilt wurde, liegt etwa in der Mitte des Korridors. Die benötigten Verzögerungen außerhalb dieses Korridors werden dem nicht akzeptierten Korridor zugeordnet.

Als weiteres Ergebnis zeigt sich in beiden Abbildungen, dass die erforderliche Verzögerung bei der visuell-haptischen Warnung mit Rampe betragsmäßig rund $1,0 \text{ m/s}^2$ niedriger liegt als bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung. Dies zeigt, dass der systemseitig als früher vorgesehene Warnzeitpunkt von den Fahrern als solcher auch gefordert wird. Denn wie in Kap. 7.3.2 erläutert, liegt der Beginn der visuell-haptischen Warnung mit Rampe im Übergangsbereich von der Information zur Warnung. Der Beginn der visuell-auditiv-haptischen Warnung fällt hingegen mit dem letztmöglichen Warnzeitpunkt zusammen.

Favorisierte Assistenzstrategie

Als Kriterien zur Beurteilung der favorisierten Assistenzstrategie dienen die Fragen zur **Klarheit der Handlungsanweisung**, zur **Gefahr** und zum **Komfort der Assistenz** sowie zum **Wunsch der Assistenz im eigenen Fahrzeug**. Zu jedem dieser Kriterien liegen die Beurteilungen mit den fünf Kategorien „trifft nicht zu“, „trifft eher nicht zu“, „weder noch“, „trifft eher zu“ und „trifft voll zu“ vor.

Zur Ermittlung der Unterschiede zwischen den Akzeptanzen der verschiedenen Assistenzstrategien wird auf Grund des ordinalen Messniveaus und der vorliegenden verbundenen Stichprobe ein WILCOXON-Test angewendet. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wird auf Grund der harmlosen Folgen eines Irrtums auf 5 % gesetzt.

Klarheit der Handlungsanweisung

Das Ziel der ersten Frage besteht darin, die Klarheit der Handlungsanweisung sowohl der visuell-haptischen Warnung mit Rampe als auch der visuell-auditiv-haptischen Warnung zu ermitteln. Im Falle der Assistenz mit der nachgelagerten aktiven Vollverzögerung wird diese Frage nicht gestellt, weil durch diese Vollverzögerung keine zusätzliche Handlungsanweisung gegeben werden soll. Denn wie in Kap. 6.4 angesprochen, besteht die Aufgabe der aktiven Vollverzögerung nur darin, sicherzustellen, dass mit der kollisionsvermeidenden Verzögerung des Fahrzeugs vor dem Erreichen des point-of-no-return begonnen wird.

Für die Auswertung liegen 36 Beurteilungen vor. Die Ergebnisse der Befragung sind in Tab. 7.4 dargestellt.

Tabelle 7.4: Beurteilung der Klarheit der Handlungsanweisungen der visuell-haptischen Warnung mit Rampe und der visuell-auditiv-haptischen Warnung durch die Versuchspersonen.

Assistenzmaßnahme	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	weder noch	trifft eher zu	trifft voll zu
visuell-haptische Warnung mit Rampe	2	5	7	17	5
visuell-auditiv-haptische Warnung	0	1	0	3	32

Es bewerteten 61 bzw. 97 % der Versuchspersonen die Handlungsanweisungen der visuell-haptischen Warnung mit Rampe bzw. der visuell-auditiv-haptischen Warnung als klar. Ein WILCOXON-Test liefert die in Tab. 7.5 dargestellte zweiseitige asymptotische Signifikanz.

Tabelle 7.5: WILCOXON-Test zur Bewertung des Unterschieds der beiden Assistenzstrategien bezüglich der Klarheit der Handlungsanweisung.

Paarung Assistenzmaßnahmen	Signifikanz aus WILCOXON-Test
visuell-auditiv-haptische Warnung/ visuell-haptische Warnung mit Rampe	< 0,001

Es zeigt sich, dass die Klarheit der Handlungsanweisung bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung im Vergleich zur visuell-haptischen Warnung mit Rampe als hochsignifikant größer eingestuft wird. Die meisten Versuchspersonen geben als Begründung an, dass durch die visuell-auditiv-haptische Warnung viel deutlicher wird, wie zu reagieren ist. Die Hauptursache sehen sie dabei darin, dass insbesondere das akustische Signal die Kritikalität sowie die Dringlichkeit einer Reaktion des Fahrers verdeutlicht. Auch die haptische Anbremsung bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung wird als sehr guter gerichteter Impuls gesehen, selbst zu verzögern. Die haptische Anbremsung bei der nur visuell-haptischen Warnung mit Rampe wird hingegen als zu schwach beurteilt.

Gefahr der Assistenz

Das Ziel der zweiten Frage besteht in der Klärung, in wieweit die Versuchspersonen befürchten, dass durch die Assistenz eine Gefahr ausgeht. Für die Auswertung liegen 33 Beurteilungen vor. Die Ergebnisse der Befragung sind in Tab. 7.6 dargestellt.

Tabelle 7.6: Beurteilung ob von der Assistenz eine Gefahr ausgeht.

Assistenzmaßnahme	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	weder noch	trifft eher zu	trifft voll zu
visuell-haptische Warnung mit Rampe	24	6	1	1	1
visuell-auditiv-haptische Warnung	26	5	1	1	0
visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung	18	10	1	3	1

Es zeigt sich, dass bei einer visuell-haptischen Warnung mit Rampe 90 % der Versuchspersonen, bei einer visuell-auditiv-haptischen Warnung 93 % und mit einer zusätzlich nachgelagerten aktiven Vollverzögerung 84 % eine geringe Gefahr durch die Assistenz sehen. Ein WILCOXON-Test für alle drei möglichen Assistenzstrategiepaare liefert die in Tab. 7.7 dargestellte zweiseitige asymptotische Signifikanz.

Tabelle 7.7: WILCOXON-Test zur Beurteilung des Gefahrunterschieds zwischen den einzelnen Assistenzstrategien.

Paarung Assistenzmaßnahmen	Signifikanz aus WILCOXON-Test
visuell-auditiv-haptische Warnung/ visuell-haptische Warnung mit Rampe	0,476
visuell-auditiv-haptische Warnung ohne/mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung	0,026
visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung/ visuell-haptische Warnung mit Rampe	0,148

Zwischen der visuell-haptischen Warnung mit Rampe und der visuell-auditiv-haptischen Warnung besteht kein signifikanter Unterschied in der Beurteilung der Gefahr. Ein signifikanter Unterschied besteht jedoch zwischen der visuell-auditiv-haptischen Warnung mit und ohne nachgelagerter aktiver Vollverzögerung. Als Begründung gaben die Versuchspersonen vorwiegend die im Falle der aktiven Vollverzögerung ggf. induzierte Gefahr von Auffahrunfällen an.

Komfort der Assistenz

Das Ziel der dritten Frage besteht darin, den Komfort der Assistenz zu beurteilen. Für die Auswertung liegen 33 Beurteilungen vor. Die Ergebnisse der Befragung sind in Tab. 7.8 dargestellt.

Tabelle 7.8: Beurteilung des Komforts der Assistenz.

Assistenzmaßnahme	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	weder noch	trifft eher zu	trifft voll zu
visuell-haptische Warnung mit Rampe	2	2	7	12	10
visuell-auditiv-haptische Warnung	1	0	0	8	24
visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung	2	5	1	6	19

Es zeigt sich, dass der höchste Komfort (96%) bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung und der zweithöchste bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung gesehen wird. Ein WILCOXON-Test liefert die in Tab. 7.9 dargestellte zweiseitige asymptotische Signifikanz.

Tabelle 7.9: WILCOXON-Test zur Beurteilung des Komfortunterschieds zwischen den einzelnen Assistenzstrategien.

Paarung Assistenzmaßnahmen	Signifikanz aus WILCOXON-Test
visuell-auditiv-haptische Warnung/ visuell-haptische Warnung mit Rampe	0,002
visuell-auditiv-haptische Warnung ohne/mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung	0,317
visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung/ visuell-haptische Warnung mit Rampe	0,040

Die visuell-auditiv-haptische Warnung ohne und mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung wird als signifikant komfortabler empfunden als die visuell-haptische Warnung mit Rampe. Als Begründung gaben die meisten Versuchspersonen an, dass sie beim KQA den Komfort durch die Assistenz insbesondere im Sicherheitsgewinn sehen. Der Sicherheitsgewinn wird bei der visuell-haptischen Warnung mit Rampe am geringsten eingeschätzt, weil die Klarheit der Handlungsanweisung, wie bereits genannt, von den Versuchspersonen als gering angesehen wird.

Wunsch der Assistenz im eigenen Fahrzeug

Das Ziel der vierten Frage besteht in der Klärung, welche Assistenz sich die Versuchspersonen im eigenen Fahrzeug wünschen würden. Für die Auswertung liegen 32 Bewertungen vor. Die Ergebnisse der Befragung sind in Tab. 7.10 dargestellt.

Tabelle 7.10: Beurteilung des Wunsches, eine der Assistenzstrategien im eigenen Fahrzeug zu haben.

Assistenzmaßnahme	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	weder noch	trifft eher zu	trifft voll zu
visuell-haptische Warnung mit Rampe	9	2	7	11	3
visuell-auditiv-haptische Warnung	0	2	0	7	23
visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung	1	4	4	9	14

Ein WILCOXON-Test liefert die in Tab. 7.11 dargestellte zweiseitige asymptotische Signifikanz.

Tabelle 7.11: WILCOXON-Test zur Beurteilung des Unterschieds im Wunsch, eine der Assistenzstrategien im eigenen Fahrzeug zu haben.

Paarung Assistenzmaßnahmen	Signifikanz aus WILCOXON-Test
visuell-auditiv-haptische Warnung/ visuell-haptische Warnung mit Rampe	< 0,001
visuell-auditiv-haptische Warnung ohne/mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung	0,014
visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung/ visuell-haptische Warnung mit Rampe	0,005

Ein hochsignifikanter Unterschied zeigt sich zwischen der visuell-auditiv-haptischen Warnung mit bzw. ohne nachgelagerter aktiver Vollverzögerung einerseits und der visuell-haptischen Warnung mit Rampe andererseits. Ein signifikanter Unterschied besteht zwischen der visuell-auditiv-haptischen Warnung mit und ohne nachgelagerter aktiver Vollverzögerung. So ergibt sich in Bezug auf den Wunsch im eigenen Fahrzeug die Rangfolge:

1. visuell-auditiv-haptische Warnung
2. visuell-auditiv-haptische Warnung mit nachgelagerter aktiver Vollverzögerung
3. visuell-haptische Warnung mit Rampe

Unter der Berücksichtigung aller vier Kriterien erweist sich die visuell-auditiv-haptische Warnung als die signifikant favorisierte Assistenzstrategie. Der Nachweis, dass eine favorisierte Assistenzstrategie existiert ist hiermit erbracht.

Die Frage, ob sich die Versuchspersonen den KQA im eigenen Fahrzeug wünschen, beantworteten 35 Versuchspersonen mit ja (94%) und zwei mit nein (6%). Dies zeigt eine sehr

hohe Akzeptanz des KQA. Als Voraussetzung für diese hohe Akzeptanz sehen die Versuchspersonen die Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit, die Übersteuerbarkeit sowie die Möglichkeit einer Aktivierung/Deaktivierung.

Hieraus wird bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % durch einen einseitigen Binomialtest gefolgert, dass sich mindestens 83 % aller Fahrer den KQA im eigenen Fahrzeug wünschen.

7.4 Diskussion

Das Ziel der Evaluierung des KQA besteht in der Verifizierung der existentiellen Hypothese: „Es ist möglich einen KQA in zwei Beispielszenarien auch auf Grundlage unscharfer Realdaten im Fahrzeug umzusetzen, wenn die Anforderungen an die Positionsbestimmung und die Kommunikation erfüllt sind sowie eine adressierte Kreuzungsgeometrie vorliegt!“

Um diese Verifikation durchführen zu können wurde eine Methodik zur Evaluierung des KQA in realen kritischen Kreuzungsszenarien entwickelt. Die Methodik erlaubt eine gefahrlose Erprobung des KQA in kritischen Kreuzungssituationen und reproduzierbare Versuchsbedingungen ohne die Nachteile eines Simulators.

Die reproduzierbaren Versuchsbedingungen werden durch eine hochgenaue Positionierung des wartepflichtigen Fahrzeugs, die Triggerung des vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs auf Grundlage virtueller Fahrzeuge sowie die gezielte Ablenkung des wartepflichtigen Fahrers erreicht. Eine gefahrlose Erprobung des KQA in kritischen Kreuzungssituationen wird dadurch ermöglicht, dass das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug sich zunächst so annähert, dass eine hohe Kollisionsgefahr zwischen den beiden Fahrzeugen besteht. Nachdem das wartepflichtige Fahrzeug den letztmöglichen Bremszeitpunkt passiert hat, verzögert das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug aus Sicherheitsgründen in jedem Fall und kommt an seiner virtuellen Haltelinie zum Stehen.

Der Nachweis der Wirksamkeit des KQA zur Unfallvermeidung konnte erbracht werden. Der relative Anteil der Fahrer mit einer korrekten Interpretation der Warnung beträgt 85 % und der mit einer erfolgreichen Reaktion auf die Warnung 75 %. Damit kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % davon ausgegangen werden, dass mindestens 65 % der gewarnten Fahrer die Warnung richtig interpretieren und 54 % erfolgreich auf die Warnung reagieren. Die Hypothese: „Durch die Assistenz des KQA werden in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario signifikant mehr Kollisionen erfolgreich verhindert als ohne Assistenz!“ ist damit mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als ein Promille verifiziert!

Dieses Ergebnis zeigt einerseits, dass es nicht erforderlich ist, der visuell-auditiv-haptischen Warnung eine aktive Vollverzögerung nachzulagern, um im Vergleich ohne Assistenz durch den KQA die Kreuzungssicherheit signifikant zu erhöhen. Dies ist insofern auch plausibel, da die Möglichkeit besteht, auf Grund der Kommunikation bereits so früh mit der Situationsinterpretation zu beginnen, dass die Grundlage für eine rechtzeitige Warnung gegeben ist. Andererseits zeigt das Ergebnis, dass 25 % der gewarnten Fahrer nicht erfolgreich auf die Warnung reagiert haben. Diesen Anteil zu senken, stellt eine Herausforderung für nachfolgende Arbeiten dar. Ein Ansatzpunkt besteht dabei darin, durch Weiterentwicklung des MMI dem Fahrer die Dringlichkeit einer kollisionsvermeidenden Handlung noch deutlicher zu vermitteln.

Auch der Nachweis der Grundakzeptanz der Assistenz ist erbracht worden. So wird ein Akzeptanzkorridor für den resultierenden Längsrichtungsfehler bestimmt, in dem 95 %

der Warnzeitpunkte von den Versuchspersonen akzeptiert werden. Damit kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % davon ausgegangen werden, dass mindestens 89 % aller gewarnten Fahrer eine visuell-haptische Warnung mit Rampe, bzw. 90 % eine visuell-auditiv-haptische Warnung innerhalb des jeweils bestimmten Korridors akzeptieren.

Als favorisierte Assistenzstrategie konnte die visuell-auditiv-haptische Warnung identifiziert werden. Voraussetzung dieser Verifikation sind die Beurteilungen hinsichtlich der Klarheit der Handlungsanweisung, der Gefahr und dem Komfort der Assistenz sowie der Wunsch der Assistenz im eigenen Fahrzeug. Es ist erforderlich, in nachfolgenden Arbeiten gezielt auch die Akzeptanz sowie das Fahrerverhalten im Falle von Fehlwarnungen zu analysieren.

Abb. 7.11 ermöglicht einen Vergleich des vom KQA umgesetzten Unschärfekorridors mit dem aus den Versuchsfahrten ermittelten Akzeptanzkorridor. Der Unschärfekorridor des KQA ist bereits in Kap. 4.4 und Abb. 4.15 beschrieben und dargestellt. Der Akzeptanzkorridor ergibt sich aus Abb. 7.10 durch Umrechnung der erforderlichen Verzögerungen in entsprechende Bremswege und gilt für die favorisierte Assistenzstrategie visuell-auditiv-haptische Warnung.

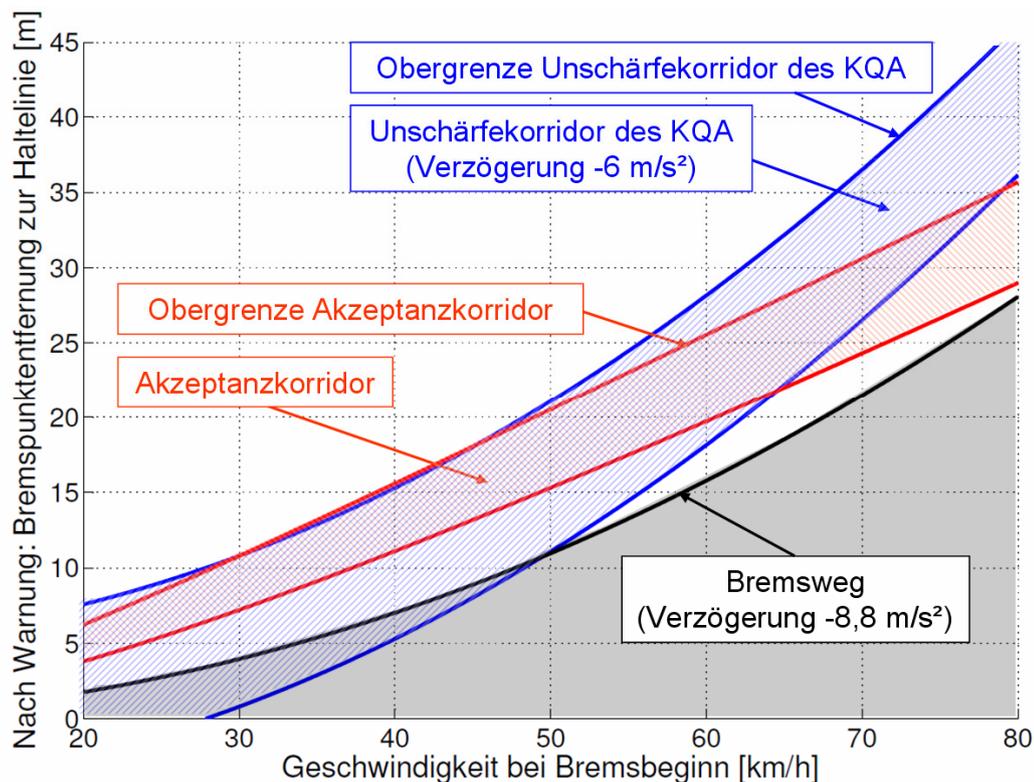


Abbildung 7.11: Unschärfekorridor des KQA mit einer Korridorbreite von ± 5 m und Akzeptanzkorridor, für Assistenzstrategie visuell-auditiv-haptische Warnung.

Als Ergebnis zeigt sich, dass der Akzeptanzkorridor im gesamten betrachteten Geschwindigkeitsbereich eine geringere Breite aufweist als der Unschärfekorridor des KQA. Zudem liegt die Obergrenze des Unschärfekorridors ab 50 km/h vor der Obergrenze des Akzeptanzkorridors. Ab dieser Geschwindigkeit kann daher in Folge unscharfer Daten die Situation auftreten, dass die KQA-Warnung vom Fahrer als zu früh empfunden wird. Um diesen

Nachteil zu beseitigen, erscheint es sinnvoll, die Obergrenze des Unschärfekorridor an die Obergrenze des Akzeptanzkorridors anzupassen. Diese Anpassung ist durch das Gleichsetzen der oberen Grenze des Unschärfekorridors mit der des Akzeptanzkorridors in Abb. 7.12) vorgenommen. Die untere Grenze des Unschärfekorridors ist durch seine Breite festgelegt. In Abb. 7.12 sind beispielhaft drei verschiedene Korridorbreiten dargestellt. Die Korridorbreiten ergeben sich aus der jeweils angenommenen Abweichung der Haltelinienposition und der Abweichung der Fahrzeugposition als Folge der jeweils angenommenen kumulierten Häufigkeit gemäß Abb. 4.13.

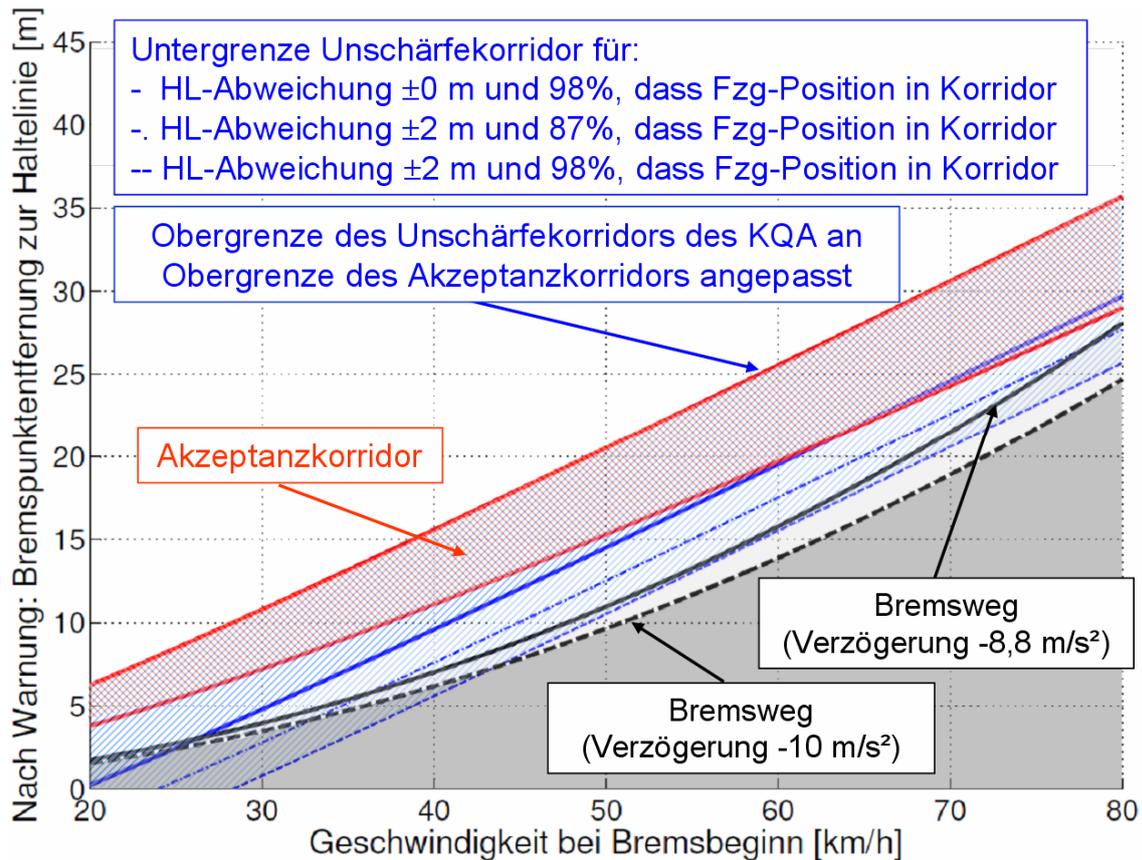


Abbildung 7.12: Anpassung des Unschärfekorridors des KQA an den Akzeptanzkorridor für die Assistenzstrategie visuell-auditiv-haptische Warnung.

Unter der Annahme:

- einer Haltelinienabweichung (HL-Abweichung) von ± 0 m und einer 98 % kumulierten Häufigkeit (entspricht ± 3 m), dass die Fahrzeugposition innerhalb des Korridors liegt, ergibt sich eine Korridorbreite von 6 m,
- einer Haltelinienabweichung von ± 2 m und einer 87% kumulierten Häufigkeit (entspricht ± 2 m), dass die Fahrzeugposition innerhalb des Korridors liegt, ergibt sich eine Korridorbreite von 8 m,
- einer Haltelinienabweichung von ± 2 m und einer 98 % kumulierten Häufigkeit (entspricht ± 3 m), dass die Fahrzeugposition innerhalb des Korridors liegt, ergibt sich eine Korridorbreite von 10 m.

Im betrachteten Geschwindigkeitsbereich schneidet die Untergrenze des Korridors mit 6 m Breite die des Akzeptanzkorridors bei 63 km/h. Die beiden anderen Grenzkurven schneiden im betrachteten Geschwindigkeitsbereich nie.

Die Kurve des physikalisch kürzesten Bremswegs (Verzögerung 10 m/s^2) schneiden die unteren Grenzen der Unschärfekorridore bei 25 km/h, 33 km/h bzw. 43 km/h. Dieses Ergebnis zeigt auf der einen Seite, dass nur bei einer Geschwindigkeit bei Bremsbeginn von über 63 km/h und einer Korridorbreite von 6 m der Unschärfekorridor des KQA mit dem Akzeptanzkorridor vollständig zur Deckung gebracht wird. Beträgt die Geschwindigkeit nur 30 km/h überdeckt der Akzeptanzkorridor 60 % des Unschärfekorridors. Andererseits besteht sogar bei einer Korridorbreite von 10 m ab einer Geschwindigkeit bei Bremsbeginn von 43 km/h die Möglichkeit, das Fahrzeug noch vor der Haltelinie zum Stehen zu bringen. Jedoch wird bei dieser Geschwindigkeit nur knapp die Hälfte der Korridorbreite von 10 m durch den Akzeptanzkorridor überdeckt. Somit muss offensichtlich davon ausgegangen werden, dass in rund 50 % der Warnungen die Bremspunktentfernung zur Haltelinie geringer ist als vom Fahrer akzeptiert. Um dennoch auch in diesen Fällen eine Kollision zu verhindern, wird vorgeschlagen, dass der KQA bereits frühzeitig Informationen über eine bevorstehende und eine ausgegebene Warnung an den Bremsassistenten übermittelt. Damit soll erreicht werden, dass die zur Kollisionsvermeidung erforderliche Bremsverzögerung mit Sicherheit erreicht wird. Hierdurch wird die Erkennung der kritischen Kreuzungssituation für den Bremsassistenten vereinfacht und die Effizienz der Unterstützung möglicherweise gesteigert. Dies zu untersuchen zählt zu den möglichen Inhalten nachfolgender Arbeiten.

Somit besteht die Möglichkeit, ab den drei genannten Geschwindigkeiten bei Bremsbeginn den gesamten Akzeptanzkorridor abzudecken und sogar bei Bremspunktentfernungen die dem physikalisch kürzesten Bremsweg entsprechen eine Kollision zu vermeiden. Im unteren Unschärfekorridor besteht zwar eine Kollisionsgefahr, allerdings bei bereits reduzierter Fahrzeuggeschwindigkeit, da in Folge der haptischen Anbremsung und gegebenenfalls auch wegen der Bremsung durch den Fahrer als Reaktion auf die Warnung, kinetische Energie abgebaut wurde.

Hinsichtlich des Gesamtsystems wünschen sich 94 % der Versuchspersonen den KQA im eigenen Fahrzeug. Hiernach kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % davon ausgegangen werden, dass mindestens 83 % der Fahrer den KQA im eigenen Fahrzeug haben wollen.

Durch den Nachweis der Wirksamkeit und der Grundakzeptanz der Assistenz ist die existentielle Hypothese zur Umsetzbarkeit des KQA auch auf Grundlage unscharfer Realdaten verifiziert.

8 Qualität der erzielten Ergebnisse und Ausblick auf weiterführende Arbeiten

Zur Bewertung der Qualität der im Rahmen der Evaluierung gewonnenen Ergebnisse werden diese im Folgenden in Hinblick auf ihre Objektivität, Reliabilität und Validität untersucht. Unter **Objektivität** wird hierbei die Unabhängigkeit der Ergebnisse vom Beobachter und Manipulationsfreiheit der Rahmenbedingungen, der Datenerfassung und der Datenauswertung verstanden. Die **Reliabilität** gibt die Wiederholbarkeit und Zuverlässigkeit der gewonnenen Ergebnisse wieder. Sie resultiert aus der Vermeidung von Zufallsfehlern und systematischen Fehlern. Mit **Validität** wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse und Schlussfolgerungen auf das reale Verkehrsgeschehen verstanden. Basierend auf dieser Qualitätsbetrachtung wird ein Ausblick auf **weiterführende Arbeiten** zur Entwicklung des KQA gegeben.

8.1 Wirksamkeit des KQA zur Unfallvermeidung

Die wichtigsten **Ergebnisse** der Evaluierungstests lauten: Durch die vom KQA ausgegebene Assistenz werden in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario hoch signifikant mehr Kollisionen erfolgreich verhindert als ohne Assistenz. Zudem wird bei einer visuell-auditiv-haptischen Warnung die auditive Komponente der Assistenzmaßnahme hoch signifikant besser wahrgenommen als die visuelle und die haptische.

Die **Objektivität** dieser Ergebnisse gründet auf einem objektiven Testverfahren: Die Auswahl der Versuchspersonen erfolgte zufällig, aber unter Berücksichtigung, dass sowohl Männer als auch Frauen aus unterschiedlichen Altersgruppen und mit unterschiedlichem Verhalten von sehr zurückhaltend bis sehr sportlich vertreten waren.

Die Feststellung, ob eine Versuchsperson bei der Kreuzungsannäherung tatsächlich abgelenkt war, erfolgte anhand einer objektiven Reaktionszeitbetrachtung. Für die Auswertung wurden nur solche Kreuzungsannäherungen verwendet, bei denen die Versuchspersonen erfolgreich abgelenkt waren und eine zentimetergenaue Positionierung des wartepflichtigen Fahrzeugs vorlag.

Zum Nachweis der Wirksamkeit zur Unfallvermeidung dienten zwei Kriterien, deren Erfüllung objektiv anhand der Messdaten „Reaktionszeit auf die Warnung“ und „Position des Stillstands“ bestimmt wurden.

Die Beurteilung der Wahrnehmbarkeit der einzelnen Assistenzmaßnahmen der visuell-auditiv-haptischen Warnung durch die Versuchspersonen wurde anhand von einfach und eindeutig zu beantwortenden Standardfragen vorgenommen.

Die Bestimmung der **Reliabilität** erfolgte über Signifikanzbetrachtungen, und zwar mit einem exakten Test nach FISHER für die Wirksamkeit zur Unfallvermeidung und einem WILCOXON-Test für die Wahrnehmbarkeit der einzelnen Assistenzmaßnahmen. Als Ergebnis zeigt sich ein hoch signifikanter Unterschied zwischen der Unfallvermeidung mit und ohne Assistenz. Die Irrtumswahrscheinlichkeit ist $< 0,1\%$. Bei allen Annäherungen lag eine

zentimetergenaue Positionsbestimmung des wartepflichtigen Fahrzeugs vor. Ebenso zeigt sich hoch signifikant, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\leq 0,5\%$, dass die auditive Komponente der Assistenzmaßnahme häufiger wahrgenommen wird als die visuelle und haptische.

Zur Erreichung einer hohen **Validität** erfolgte die Durchführung der Versuche an einer 90°-Winkel Kreuzung mit keiner oder mit nur schwacher Krümmung der Fahrbahnen. Bei dieser Kreuzungsgeometrie geschehen im realen Unfallgeschehen die meisten Querverkehrsunfälle. Durch die gezielte Ablenkung des Fahrers wird das Fahrerfehlverhalten „Unaufmerksamkeit“ provoziert. Sie ist der häufigste Fehler bei Querverkehrsunfällen. Ebenso ist die im Versuchsablauf installierte Sichtverdeckung eine typische Ursache bei Unfällen mit Querverkehr.

Die bewusste Diversivität der Versuchspersonen in Hinblick auf Alter, Geschlecht und Verhalten ist ebenfalls eine Voraussetzung für eine hohe Validität. Die Versuchspersonen wurden überraschend der kritischen Kreuzungssituation ausgesetzt, da davon ausgegangen wird, dass auch in der Praxis der wartepflichtige Fahrer überraschend in eine kritische Verkehrssituation gerät. Es erfolgte vorab auch keine Information der Versuchspersonen über die Funktion des KQA, da im realen Verkehr kritische Situationen mit dem Querverkehr nicht regelmäßig auftreten und damit eine Warnung des KQA voraussichtlich nur selten ausgegeben wird. Somit kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Fahrer die Funktionsweise des KQA trainiert. Vielmehr ist es erforderlich, dass der Fahrer bereits bei einer ersten Warnung richtig reagiert.

Eine Aufgabe **weiterführender Arbeiten** besteht in diesem Zusammenhang darin, zu überprüfen, welche Auswirkungen Fehlwarnungen auf die Wirksamkeit und Akzeptanz beim Fahrer haben. Des Weiteren ist es erforderlich, die Wirksamkeit bei müden Fahrern nachzuweisen, da davon auszugehen ist, dass hierdurch z.B. die Reaktionszeit verlängert wird. Die Annäherungsgeschwindigkeit an die Kreuzung wurde von den Versuchspersonen selbst gewählt, da auch in der Praxis der wartepflichtige Fahrer diese selbst festlegt. Bei den Versuchen traten Annäherungsgeschwindigkeiten bis zu 60 km/h auf. Die Wirksamkeit bei höheren Geschwindigkeiten ist im Rahmen weiterführender Arbeiten nachzuweisen.

Bei der Verzögerung wurden die Versuchspersonen zwar durch eine haptische Anbremsung vom KQA unterstützt, jedoch waren diese gehalten, das Fahrzeug selbst zum Stillstand zu bringen. Damit wurde sichergestellt, dass der Fahrer in der Regelschleife blieb. Durch einen Binomialtest konnte nachgewiesen werden, dass mindestens 54% der gewarnen Fahrer erfolgreich auf die Warnung reagieren. Um diesen Anteil zu erhöhen, ist es erforderlich, den KQA weiterzuentwickeln. Dabei bietet es sich an, dies durch eine Verbesserung der Warneffektivität mittels einer Optimierung des MMI oder einer der Warnung nachgelagerten aktiven Vollverzögerung zu erzielen. In diesem Zusammenhang sind allerdings auch die Risiken einer Vollverzögerung zu untersuchen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ausschließlich die Assistenz im wartepflichtigen Fahrzeug entwickelt und analysiert. Zur weiteren Erhöhung der Wirksamkeit bietet es sich an, auch eine Assistenz im vorfahrtsberechtigten Fahrzeug zu realisieren. Diese besteht beispielsweise in einer Warnung oder einer Wahrnehmbarkeitserhöhung beim vorfahrtsberechtigten Fahrzeug. So kann insbesondere bei Motorrädern eine Wahrnehmbarkeitserhöhung durch aktives Blinken und Hupen im Fall einer voraussichtlichen Vorfahrtsmissachtung durch ein wartepflichtiges Fahrzeug ein großer Sicherheitsgewinn sein. Unfallanalysen zeigen, dass das Übersehen von vorfahrtsberechtigten Motorrädern die häufigste Ursache bei Kreuzungsunfällen mit Motorradbeteiligung ist. Entsprechende erste Versuche mit dem

im Rahmen dieser Arbeit entwickelten KQA zeigen, dass dieser die hierfür erforderlichen Funktionalitäten vom Grundsatz her bereits abdeckt.

8.2 Grundakzeptanz der Assistenz und favorisierte Assistenzstrategie

Die wichtigsten Ergebnisse des Evaluierungstests lauten: In einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario existiert ein Korridor, innerhalb dessen eine Variation des Warnzeitpunktes akzeptiert wird. Die Breite des Korridors ist geschwindigkeitsabhängig. Zudem wird die visuell-auditiv-haptische Warnung gegenüber einer visuell-haptische Warnung mit Rampe sowie einer nachgelagerten aktiven Vollverzögerung favorisiert.

Vergleichbar mit der Wirksamkeit zur Unfallvermeidung ist auch hier die **Objektivität** der Ergebnisse durch ein objektives Testverfahren gegeben. Auch die Auswahl der Versuchspersonen geschah in gleicher Weise. Es erfolgte eine mehrmalige Annäherung mit einer Assistenzstrategie (visuell-haptische Warnung mit Rampe oder visuell-auditiv-haptische Warnung) bei einem Geschwindigkeitsbereich (30 bis 50 km/h oder 50 bis 70 km/h). Zwischen den Annäherungen wurde der Warnzeitpunkt zufällig variiert. Zusätzlich erfolgte eine Permutation der Kombinationen aus Assistenzstrategie und Geschwindigkeitsbereich zwischen den Versuchspersonen. Die Beurteilung der verschiedenen Warnzeitpunkte wurde von den Versuchspersonen mit Hilfe einer Standardskala vorgenommen. Für die Beurteilung der verschiedenen Assistenzstrategien gab es einfach und eindeutig zu beantwortende Standardfragen.

Zur Bestimmung der **Reliabilität** der Akzeptanz wurde für jede Kombination aus Assistenzstrategie und Geschwindigkeitsbereich der τ_B -Korrelationskoeffizient berechnet. Dieser gibt an, ob von einem fundierten Urteil in Bezug auf die Rechtzeitigkeit ausgegangen werden kann. Dies war nur bei zwei von 148 Fällen nicht gewährleistet. Die bereits angesprochene zufällige Reihenfolge der Warnzeitpunkte und die Permutation dienten auch zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten bei der Bewertung.

Im Rahmen einer Signifikanzbetrachtung ergab sich, dass mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % davon ausgegangen werden kann, dass mindestens 89 % aller gewarnten Fahrer eine visuell-haptische Warnung mit Rampe bzw. 90 % eine visuell-auditiv-haptische Warnung innerhalb des jeweils bestimmten Korridors akzeptieren.

Die Bestimmung der Reliabilität der Aussage zur favorisierten Assistenzstrategie erfolgte mit Hilfe eines WILCOXON-Tests. Die Irrtumswahrscheinlichkeit der Aussage, dass sich die visuell-auditiv-haptische Warnung als favorisierte Assistenzstrategie ergibt, liegt je nach Beurteilungsgesichtspunkt bei < 0,1 % bis 47,6 %. Bei drei Gesichtspunkten ergibt sich hohe Signifikanz, bei zwei Gesichtspunkten eine Signifikanz und bei zwei Gesichtspunkten keine Signifikanz.

Zur Erreichung einer hohen **Validität** wurde die gleiche Kreuzungsgeometrie wie beim Nachweis der Wirksamkeit ausgewählt. Die bewusste Streuung der Versuchspersonen in Hinblick auf Alter, Geschlecht und Verhalten ist auch hier eine Voraussetzung für eine hohe Validität.

Die Beurteilung der verschiedenen Warnzeitpunkte und Assistenzstrategien erfolgte im Fahrzeug in einer realen kritischen Kreuzungssituation. Die Variation der Warnzeitpunkte trägt ebenfalls zur Übertragbarkeit der Ergebnisse bei, da auch in der Praxis der Warnzeit-

punkt abhängig von den Positionsabweichungen variiert. Mit dem betrachteten Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 70 km/h wurde ein für Kreuzungen typischer Bereich gewählt.

Eine Aufgabe **weiterführender Arbeiten** besteht darin, diesen Bereich bis zur maximal zulässigen Geschwindigkeit an Kreuzungen von 100 km/h zu erweitern.

Da die Versuchspersonen bei diesen Kreuzungsannäherungen über die auftretende kritische Kreuzungssituation sowie das Erfolgen einer Warnung Bescheid wussten, war die Reaktionszeit unrealistisch kurz. Um dennoch einen übertragbaren Bezug zwischen dem Warnzeitpunkt und der Beurteilung herstellen zu können, erfolgte eine Eliminierung der Reaktionszeit bei der Auswertung.

Weitere Aufgaben für nachfolgende Entwicklungsarbeiten sind:

- Anpassung der KQA-Auslegung an den ermittelten Akzeptanzkorridor
- Erhöhung der Akzeptanz durch eine Verringerung der Datenunschärfe
- Nutznachweis einer Kopplung des KQA mit dem Bremsassistenten
- Erprobung des KQA mit ACUp insbesondere bei Sichtverdeckungen zwischen den Fahrzeugen und bei einer hohen Teilnehmerzahl

9 Zusammenfassung

Die Unfallstatistiken hochindustrialisierter Länder weisen den Kreuzungsbereich als einen Unfallschwerpunkt aus. Die meisten Unfälle ereignen sich hierbei mit querendem Verkehr. Die beiden häufigsten Ursachen sind Unaufmerksamkeit und Fehleinschätzung. Dies legt nahe, den Fahrer durch Assistenzmaßnahmen zu unterstützen. Bisher prototypisch entwickelte Querverkehrsassistenzsysteme beschränken sich auf die Demonstration synthetischer Kreuzungsszenarien ohne eine Auseinandersetzung mit unscharfen Realdaten. Die Unschärfe wird durch Messfehler bei der Positionsbestimmung und durch Latenzzeiten bei der Fzg-Fzg-Kommunikation hervorgerufen.

Als Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit im Kreuzungsbereich setzt sich diese Arbeit das Ziel, einen fahrzeugtauglichen KQA zu entwickeln, auf Funktionalität zu überprüfen und im Rahmen von Praxisversuchen den wissenschaftlichen Nachweis zu erbringen, dass dieser KQA tatsächlich ein Unfallvermeidungspotential in realen kritischen Kreuzungssituationen besitzt und dass eine Akzeptanz der Assistenz auch bei unscharfen Daten gegeben ist.

Der Hauptwirkungsbereich des KQA leitet sich aus der Unfallstatistik ab. Die relevanten Kreuzungsszenarien sind anhand unterschiedlicher Ausprägungen kategorisiert. Das realisierte Grundkonzept basiert auf drei Teilsystemen: Der Positionsbestimmung, der Kommunikation und der Assistenz. Messsysteme, die bereits repräsentativ für eine spätere Serientechnik sind, liefern die Eingangsdaten zur Positionsbestimmung und Kommunikation.

Für die **Positionsbestimmung** wird die Fusion von DGPS- mit Fahrdynamikdaten in einem Kalman-Filter mit einer vorgelagerten Plausibilisierung der Eingangsdaten verwendet. Die Analyse des Kalman-Filters auf einem exemplarischen Rundkurs in München zeigt, dass die gestellten Anforderungen an die Erfassungsgenauigkeit zu mehr als 93 % erfüllt sind.

Für die **Kommunikation** wird aktuell der WLAN-Standard IEEE802.11b (2.4 GHz) eingesetzt. Bei Sichtkontakt werden die gestellten Anforderungen an die Mindestreichweite zu fast 100 % erfüllt. Besteht hingegen eine Sichtverdeckung aus stark dämpfenden Hindernissen, z.B. Häusern, so liegt die maximale Reichweite weit unter den Anforderungen. Um auch bei Sichtverdeckung die Funktion des KQA zu gewährleisten, ist es erforderlich, eine Lösung dieses Problems in zukünftigen Kommunikationsstandards vorzusehen.

Die entwickelte Architektur des **Assistenzsystems** gliedert sich in Algorithmen zur Bestimmung der Kreuzungsgeometrie und Vorfahrtssituation, zur Beurteilung des Fahrerverhaltens sowie zur Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung. Letztere basiert auf Algorithmen zur Prädiktion der Trajektorien der Fahrzeuge und zur Ermittlung desjenigen Kreuzungsbereiches, der vom Eigenfahrzeug und vom Fremdfahrzeug passiert wird. Das Ziel der Trajektorienprädiktion besteht darin, auf Grundlage des instationären Fahrverhaltens sowie weiterer Aspekte wie z.B. Blinkerbetätigung an Kreuzungen zu bestimmen, wann die Kreuzung erreicht und wieder verlassen wird sowie in welche Richtung die Kreuzung verlassen wird. Hierzu erfolgt der Einsatz von Bayesschen Netzen, die sich bereits in anderen Bereichen (z.B. künstlicher Intelligenz) bei der Entscheidungsfindung auf Grund-

lage unscharfer Daten etabliert haben.

Der KQA ist gegenwärtig auf Kreuzungsgeometrien ausgelegt, an denen sich typischerweise Unfälle mit Querverkehr ereignen. Die Kreuzungsgeometrien sind charakterisiert durch einen Schnittwinkel der Fahrbahnen zwischen 45° und 135° sowie durch keine oder nur eine schwache Krümmung der Fahrbahnen für beide Fahrzeuge. Bei anderen Kreuzungsgeometrien wird der KQA deaktiviert, um Fehlwarnungen zu vermeiden. Die Entscheidung für Assistenzmaßnahmen basiert auf der vom KQA ermittelten Kollisionswahrscheinlichkeit, Fahrerverhaltensbeurteilung und Verkehrsregelung. Eine Assistenz erfolgt nur im wartepflichtigen Fahrzeug. Die Assistenzstrategie besteht aus einer Information über die Verkehrsregelung ohne Berücksichtigung des Querverkehrs und einer Warnung unter Berücksichtigung des Querverkehrs und des Fahrerverhaltens im Eigenfahrzeug.

Die **Funktionalität** des entwickelten KQA wurde im Rahmen von Simulationen und Fahrversuchen überprüft. Dabei zeigte sich, dass beim Einsatz von digitalen Karten mit hochgenauen Haltelinienpositionen eine Gesamtpositionsabweichung von ± 3 m auftritt. Ist die Haltelinie mit einer Abweichung von ± 2 m bekannt, dann tritt für 87 % der Fälle eine Positionsunschärfe von ± 4 m und für 98 % eine Positionsunschärfe von ± 5 m auf.

Zum Nachweis der **Wirksamkeit** des KQA zur Unfallvermeidung wurde eine Methode entwickelt und eingesetzt, die den Fahrer über die mögliche Ausstattung des Testfahrzeuges in Unwissenheit lässt. Die Versuchspersonen werden gezielt abgelenkt, geraten daher überraschend in die kritische Kreuzungssituation und versuchen gemäß ihrer Fähigkeiten und ggf. mit Hilfe der KQA-Assistenz die kritische Situation zu meistern. Bei den Versuchen zeigte sich, dass von den Fahrern die eine KQA-Assistenz erhalten haben 85 % die Warnung richtig interpretierten und 75 % auch erfolgreich reagierten. Diese Fahrer haben die kritische Kreuzungssituation erfolgreich entschärft. Ohne KQA-Assistenz reagierten nur 8 % der Fahrer erfolgreich. Das heißt 92 % wären in eine Kollision verwickelt worden, hätte das vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug nicht verzögert. Damit ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 0,1 %, also hoch signifikant, der Nachweis erbracht, dass mit dem KQA in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario mehr Kollisionen erfolgreich verhindert werden als ohne.

Zum Nachweis der **Akzeptanz** der Assistenz wurde eine weitere Methode entwickelt und eingesetzt. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass die Fahrer über das Vorhandensein des KQA Bescheid wissen und darüber, dass sie in eine kritische Kreuzungssituation geraten werden. Bei jeder Versuchsfahrt wird der Warnzeitpunkt zufällig variiert und damit die reale Positionsunschärfe nachgebildet. Die Auswertung der Versuche ergibt einen Korridor, in dem 95 % der Warnzeitpunkte von den Versuchspersonen akzeptiert werden. Damit kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % davon ausgegangen werden, dass mindestens 89 % aller gewarnten Fahrer eine visuell-haptische Warnung mit Rampe und 90 % eine visuell-auditiv-haptische Warnung im jeweiligen Korridor akzeptieren. Dabei erweist sich die visuell-auditiv-haptische Warnung als die klar favorisierte Assistenzstrategie.

Darüber hinaus ergibt sich, dass der vom KQA umgesetzte Unschärfekorridor vom Akzeptanzkorridor abweicht und damit die Gefahr von Fehlwarnungen besteht. Um dies zu vermeiden, wird der Unschärfekorridor unter Beibehaltung der festgestellten Korridorbreiten soweit wie möglich an den Akzeptanzkorridor angepasst. Damit ergibt sich eine gute Teilabdeckung und für die Option „genaue Kenntnis der Position der Haltelinie“ ab 63 km/h bei Bremsbeginn sogar eine vollständige Überdeckung von Unschärfe- und Akzeptanzkorridor. Eine Teilüberdeckung bedeutet nicht, dass keine Akzeptanz gegeben ist, sondern dass die Häufigkeit der Akzeptanz reduziert ist. So ergibt sich beispielsweise bei der Op-

tion „genaue Haltelinie“ bei 30 km/h noch in 60 % der Fälle eine Akzeptanz und damit ein entsprechend großes Potential zur Kollisionsvermeidung.

Um auch bei Teilabdeckung das größtmögliche Potential zur Unfallvermeidung zu erreichen, wird vorgeschlagen, durch die **Koppelung** des **KQA** mit dem **Bremsassistenten** dessen Ansprechgeschwindigkeit und Assistenzwirkung derart zu erhöhen, dass die erforderliche Bremsverzögerung gegebenenfalls bis zum Maximalwert gesteigert wird. Grundsätzlich bewirkt der KQA in Fällen einer zu späten Warnung zumindest eine Reduktion der Fahrzeuggeschwindigkeit und besitzt damit ein Potential zur Reduktion der Unfallschwere. Dies geschieht durch die haptische Anbremsung und gegebenenfalls zusätzlich durch die Bremsbetätigung des Fahrers nach einer Warnung.

Der Nachweis der Funktionalität „aktive Vollverzögerung nach einer visuell-auditiv-haptischen Warnung“ wird ebenfalls erbracht. Bei dieser besteht allerdings die Gefahr, dass durch Positionsabweichungen unerwartete aktive Vollverzögerungen mit entsprechenden Gefahren im realen Straßenverkehr hervorgerufen werden. Zur Klärung dieser Problematik sind weitergehende Untersuchungen erforderlich.

Eine abschließende Befragung der Versuchspersonen ergab, dass 97% die Handlungsanweisung der visuell-auditiv-haptischen Warnung als klar bewerten, 93 % keine Gefahr durch die Assistenz sehen, 96 % den Komfort der Assistenz als hoch ansehen und 94 % der Fahrer sich den KQA im eigenen Fahrzeug wünschen.

Die verwendeten Test- und Beurteilungsmethoden sind streng nach Gesichtspunkten der Objektivität entwickelt. Sie berücksichtigen die typische Kreuzungsgeometrie mit der größten Unfallhäufigkeit sowie die Fahrerunachtsamkeit und die Sichtverdeckung als besonders häufige Unfallursachen. Damit ist sichergestellt, dass die gewonnenen Ergebnisse einen hohen Grad an Objektivität und Validität aufweisen. Darüber hinaus wird über Signifikanzbetrachtungen nachgewiesen, dass sich die Ergebnisse auch durch eine hohe Reliabilität auszeichnen.

Mit dieser Arbeit ist es erstmalig gelungen, einen für den realen Fahrbetrieb tauglichen KQA zu entwickeln und mit Hilfe von Probandenversuchen in einer repräsentativen kritischen Kreuzungssituation das hohe Unfallvermeidungspotenzial sowie die Akzeptanz der Assistenz auch bei unscharfen Daten nachzuweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählte KQA Architektur ein viel versprechendes Konzept für die Erhöhung der Kreuzungssicherheit darstellt. Für die Markteinführung des KQA ist es allerdings erforderlich, eine herstellerübergreifende Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu realisieren. Darüber hinaus muss der KQA in einem realen Testfeld weiter erprobt und durch die Fusion von fahrzeugautarken und kooperativen Sensordaten die Umfelderkennung weiter verbessert werden. Durch die Integration mit anderen möglichen Kreuzungsassistenzsystemen lässt sich dann ein ganzheitliches System zur umfassenden Erhöhung der Kreuzungssicherheit schaffen.

10 Anhang

10.1 Einweisungsbogen

Editionen + Pakete	
Paketkombination Innovation + Ultra	3.040,00 EUR
Sonderausstattungen	
<input checked="" type="checkbox"/> Adaptives Kurvenlicht	0,00 EUR
<input checked="" type="checkbox"/> Fernlichtassistent	0,00 EUR
<input checked="" type="checkbox"/> Head-Up Display	0,00 EUR
<input checked="" type="checkbox"/> Kreuzungsassistent	0,00 EUR
<input checked="" type="checkbox"/> Klimaautomatik	0,00 EUR
<input checked="" type="checkbox"/> Scheinwerfer-Waschanlage	0,00 EUR

Adaptives Kurvenlicht (S0524)

Beim adaptiven Kurvenlicht wird durch schwenkbare Scheinwerfer in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Lenkeinschlag der Fahrbahnbereich ausgeleuchtet, den der Fahrer bei Kurvenfahrten einsehen muss. Hierdurch wird bei Dunkelheit und schlechten Lichtverhältnissen ein bis zu 90 % bessere Fahrbahnausleuchtung gegenüber herkömmlichen Scheinwerfern erreicht und somit die aktive Fahrsicherheit in Ihrem BMW erhöht.

Ihre Vorteile:

- Steigerung der aktiven Fahrsicherheit durch bessere Fahrbahnausleuchtung



Fernlichtassistent (S05AC)

Der einzigartige Fernlichtassistent verhindert durch das automatische Auf- und Abblenden eine Behinderung des vorausfahrenden- und entgegenkommenden Verkehrs.

Ihre Vorteile:

- Es kann ohne manuelles Eingreifen und ohne Ablenkung immer eine optimale Leuchtweite auch bei stärker befahrenen Straßen erreicht werden.

Head-Up Display (S0610)

Mit dem Head-Up Display setzt BMW neue Maßstäbe beim Thema Sicherheit und Komfort. So werden über eine Projektionseinheit, die unter der Instrumententafel sitzt, wichtige Informationen an einer ergonomisch günstigen Position auf die Frontscheibe projiziert. Diese Informationen umfassen die aktuell gefahrene Geschwindigkeit, Informationen zur aktiven Geschwindigkeitsregelung, Navigationshinweise sowie Hinweise der Check-Control.

Ihre Vorteile:

- Steigerung der Fahrsicherheit durch geringere Ablenkung vom Straßenverkehr – Der Blick des Fahrers kann stets auf die Straße gerichtet bleiben
- Erhöhung des Fahrkomforts und ermüdungsfreieres Fahren



Kreuzungsassistent (S70h)

Mit der vorausschauenden Kreuzungsassistenten verstärkt BMW sein Engagement auf dem Gebiet der Unfallvermeidung. So ermöglicht es der Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen, dass kritische Verkehrssituationen im Kreuzungsbereich bereits frühzeitig erkannt werden. Wird diese vom Fahrer nicht wahrgenommen oder falsch interpretiert, unterstützt das System den Fahrer beim Erkennen und Bewältigen dieser kritischen Situation. Die Assistenz erfolgt visuell, auditiv und haptisch.

Auf Grundlage des Datenaustausches zwischen Lichtsignalanlagen und dem Fahrzeug wird es ermöglicht dem Fahrer bereits frühzeitig Informationen über die Ampelschaltung bereit zu stellen. Das System gibt bereits bei der Annäherung an die Ampel Aufschluss darüber, ob die Ampel noch bei grün passiert werden kann oder nicht. Dies ermöglicht dem Fahrer einen noch souveräneren Umgang mit dem Verkehrsgeschehen. Das System unterstützt den Fahrer zusätzlich bei der Vermeidung von Rotlichtüberfahrten.

Ihre Vorteile:

- Erhöhung der Sicherheit an Kreuzungen durch die Unterstützung des Fahrers bei der Unfallvermeidung
- Erhöhung des Komforts durch eine Voranzeige der Ampelphasen



Klimaautomatik (S0455)

Die Klimaautomatik ermöglicht eine für die Fahrer-/Beifahrerseite individuell einstellbare Temperatur und Luftmengenregelung. Die Luft für den Fondraum kann über Düsen in der Mittelkonsole temperiert werden. Außerdem steht ein temperiertes Ablagefach zur Verfügung. Über Tasten lassen sich maximale Kühlung und Restwärmenutzung einschalten. Die automatische Umluft-Control (AUC) erkennt durch Sensoren Gerüche und Schadstoffe in der Außenluft und sperrt die Zufuhr von Außenluft. Mikro- und Aktivkohlefilter sorgen für die Reinigung der

Außenluft von Pollen, Staubpartikeln und Schadstoffen. Im Umfang ist „Armauflage vorn“ (SA 473) enthalten.

Ihre Vorteile:

- Getrennt regelbare Bereiche für Fahrer und Beifahrer
- Individuelle Temperatschichtung für Oberkörper und Fußraum
- Mikro und Aktivkohlefilter



Scheinwerfer-Waschanlage (S0502)

Die Scheinwerfer werden bei eingeschaltetem Licht und Betätigung der Frontscheiben-Waschdüsen durch eine Hockdruckanlage selbsttätig gereinigt.

Ihre Vorteile:

- Bestmögliche Sichtverhältnisse und maximale Leuchtkraft durch saubere Scheinwerfer bei schlechter Witterung
- Erhöhter Komfort durch automatische Reinigung (kein Aussteigen zur Reinigung verschmutzter Scheinwerfer)



Alle Inhalte dieser Informationsbroschüre wurden mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Dennoch kann die BMW AG für die Richtigkeit aller enthaltenen Informationen keinerlei Haftung übernehmen.

10.2 Versuchsleiterprotokoll

VP-Code:

Datum:

Uhrzeit:

Wetter:

Evaluierung KQA – Kommunikationsbasierter Querverkehrsassistent

1. Beispielszenario:

Korrekte Interpretation und Reaktion auf die visuell-auditiv-haptische
Warnung

Versuchsleiterprotokoll

Assistenz fand statt:

ja nein

Proband kam rechtzeitig zum Stehen:

ja nein

Bemerkungen:

Anschließend: Fragen an gewarnte bzw. nicht gewarnte Versuchsperson

VP-Code:

Datum:

Uhrzeit:

Wetter:

Fragen an gewarnte Versuchsperson – Beurteilung der Warnstrategie

Wie wurden Sie vor der potenziellen Kollision gewarnt?

Beschreiben Sie kurz die Anzeige im Head-Up-Display.

(Frage nur stellen, wenn von der Versuchsperson die Anzeige im Head-Up-Display wahrgenommen wurde!)

Fall A: Sie haben das Fahrzeug ausreichend verzögert!

Hat die Warnung dazu geführt, dass Sie schneller auf die Gefahr aufmerksam wurden?

Fall B: Sie haben das Fahrzeug nicht ausreichend verzögert!

Warum haben Sie das Fahrzeug in dieser Situation nicht ausreichend verzögert?

VP-Code:

Datum:

Uhrzeit:

Wetter:

Fragen an nicht gewarnte Versuchsperson – Begründung der gezeigten Reaktion

Fall A: Sie haben das Fahrzeug ausreichend verzögert!

Warum haben Sie das Fahrzeug in dieser Situation verzögert?

Fall B: Sie haben das Fahrzeug nicht ausreichend verzögert!

Warum haben Sie das Fahrzeug in dieser Situation nicht ausreichend verzögert?

2. Beispielszenario:**Beurteilung der Warnzeitpunkte innerhalb eines Korridors**

1	2	3	4	5
viel zu spät	eher zu spät	genau rechtzeitig	eher zu früh	viel zu früh

Folgende vier Blöcke sind entsprechend der Permutationsliste randomisiert durchzuführen, Proband ist über die Rahmenbedingungen (Assistenz & Geschwindigkeit) zuvor zu informieren:

1. Block: **visuell-auditiv-haptische Warnung** bei **40 km/h**, Lfd. Nr. _____

Zeit der Messung: _____

a. / d. Keine Assistenz (Baseline):

vorher:

nachher:

b. Vergleichsfahrt:

offset_zeitlich	Urteil
300 ms	

c. Folgende sechs Zeitpunkte sind entsprechend der Permutationsliste randomisiert durchzuführen, keine Information der Probanden:

Offset Nr.	offset_zeitlich	Lfd. Nr.	Urteil
1	-150 ms		
2	0 ms		
3	150 ms		
4	300 ms		
5	450 ms		
6	600 ms		

2. Block: **visuell-auditiv-haptische Warnung** bei **60** km/h, Lfd. Nr. _____

Zeit der Messung: _____

a. / d. Keine Assistenz (Baseline):

vorher: nachher:

b. Vergleichsfahrt:

offset_zeitlich	Urteil
200 ms	

c. Folgende sechs Zeitpunkte sind entsprechend der Permutationsliste randomisiert durchzuführen (Probanden über Permutation nicht informieren):

Offset Nr.	offset_zeitlich	Lfd. Nr.	Urteil
1	-200 ms		
2	0 ms		
3	200 ms		
4	400 ms		
5	600 ms		
6	800 ms		

3. Block: **visuell-haptische Warnung** mit **Rampe** bei **40** km/h, Lfd. Nr. _____

Zeit der Messung: _____

a. / d. Keine Assistenz (Baseline):

vorher:

nachher:

b. Vergleichsfahrt:

offset_zeitlich	Urteil
-150 ms	

c. Folgende sieben Zeitpunkte sind entsprechend der Permutationsliste randomisiert durchzuführen (Probanden über Permutation nicht informieren):

Offset Nr.	offset_zeitlich	Lfd. Nr.	Urteil
1	-1000 ms		
2	-600 ms		
3	-450 ms		
4	-150 ms		
5	0 ms		
6	300 ms		
7	450 ms		

4. Block: **visuell-haptische Warnung** mit **Rampe** bei **60 km/h**, Lfd. Nr. _____

Zeit der Messung: _____

a. / d. Keine Assistenz (Baseline):

vorher:

nachher:

b. Vergleichsfahrt:

offset_zeitlich	Urteil
-200 ms	

c. Folgende sieben Zeitpunkte sind entsprechend der Permutationsliste randomisiert durchzuführen (Probanden über Permutation nicht informieren):

Offset Nr.	offset_zeitlich	Lfd. Nr.	Urteil
1	-600 ms		
2	-400 ms		
3	-200 ms		
4	0 ms		
5	200 ms		
6	600 ms		
7	800 ms		

VP-Code:

Datum:

Uhrzeit:

Wetter:

5. Block: **visuell-auditiv-haptische Warnung** mit **nachgelagerter aktiver Vollverzögerung** bei **60** km/h, Lfd. Nr. _____

Zeit der Messung: _____

Folgender Zeitpunkt ist anzufahren:

Offset Nr.	offset_zeitlich	Lfd. Nr.	Urteil
1	0 ms	1	

Anschließend: Fragen an Versuchsperson

VP-Code:

Datum:

Uhrzeit:

Wetter:

Fragen an Versuchsperson

Beurteilung der Assistenzen

Die Assistenz vermittelt klar, wie zu reagieren ist.

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	weder noch	trifft eher zu	trifft voll zu
visuell- auditiv- haptisch					
visuell- haptisch (Rampe)					

Evtl. Gründe/Erläuterungen:

Die Assistenz ist komfortabel.

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	weder noch	trifft eher zu	trifft voll zu
visuell- auditiv- haptisch					
visuell- haptisch (Rampe)					
aktive Vollverzögerung (nachgelagert)					

Evtl. Gründe/Erläuterungen:

Die Assistenz ist gefährlich.

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	weder noch	trifft eher zu	trifft voll zu
visuell-auditiv-haptisch					
visuell-haptisch (Rampe)					
aktive Vollverzögerung (nachgelagert)					

Evtl. Gründe/Erläuterungen:

Ich würde mir die Assistenz im eigenen Fahrzeug wünschen.

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	weder noch	trifft eher zu	trifft voll zu
visuell-auditiv-haptisch					
visuell-haptisch (Rampe)					
aktive Vollverzögerung (nachgelagert)					

Evtl. Gründe/Erläuterungen:

Abschließend: Demografischer Fragebogen und weitere Detailfragen

10.3 Demografischer Fragebogen

VP-Code:

Datum:

Uhrzeit:

Evaluierung KQA – Kommunikationsbasierter Querverkehrsassistent Demographischer Fragebogen

Bitte beantworten Sie die Fragen möglichst spontan und ohne großes Nachdenken.
Alle Daten werden vertraulich behandelt.

Alter: _____

Geschlecht: männlich weiblich

Beruf: _____

Führerscheinbesitz: seit _____ Jahren

Wie würden Sie Ihren eigenen Fahrstil einschätzen?

Sehr zurückhaltend Sehr sportlich

Ich benötige eine Brille...

- zum Autofahren: Ja Nein
- zum Lesen: Ja Nein

Wie viele km fahren Sie durchschnittlich in einem Jahr?

Weniger als			Mehr als
5.000 km	5.000-10.000 km	10.000-20.000 km	20.000 km
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

...davon hauptsächlich:

Stadtfahrten Überlandfahrten Autobahnfahrten

VP-Code:

Datum:

Uhrzeit:

Beschreiben Sie eine kritische Situation mit Querverkehr, die Sie selbst erlebt haben.

Vielen Dank für Ihre Auskunft!

10.4 Fragebogen: Beurteilung Gesamtsystem

Evaluierung KQA – Kommunikationsbasierter Querverkehrsassistent

Fragebogen zur Beurteilung des Gesamtsystems



(Symbolik HUD))

Wie beurteilen Sie diese Grafik?

- äußerst unverständlich
- eher unverständlich
- durchschnittlich
- verständlich
- äußerst verständlich

Worin sehen Sie den Hauptnutzen des Systems?

Welche Komfortbeeinträchtigungen, Belästigungen oder Gefahren könnte das System mit sich bringen?

VP-Code:

Datum:

Uhrzeit:

Was muss beim System demnach unbedingt gewährleistet sein?

**Würden Sie sich generell einen Querverkehrsassistenten
in Ihrem Fahrzeug wünschen?**

ja

nein

10.5 Altersverteilungen bei der Evaluierung des KQA

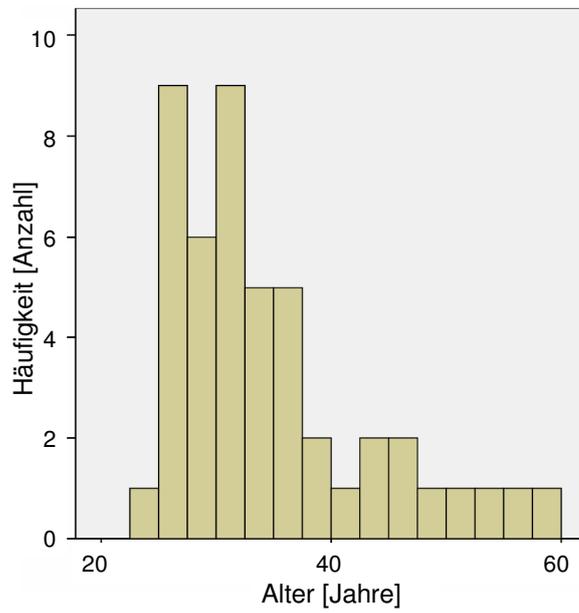


Abbildung 10.1: Altersverteilung der Versuchspersonen beim ersten Beispielszenario.

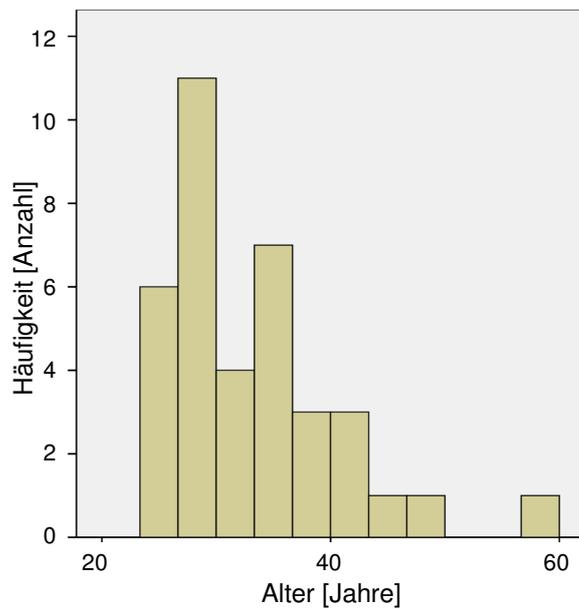


Abbildung 10.2: Altersverteilung der Versuchspersonen beim zweiten Beispielszenario.

Literaturverzeichnis

- Baldessari, R. et al.:** NoW - Network on Wheels Description of the Communication System Demonstrator. NoW Project, May 2007 (Version 1.4). – Techreport 63
- Bender, Eva et al.:** Antikollisionssystem Proreta - Der Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug - Teil 2. ATZ Ausgabe Nr.: 2007-05 81
- BMW:** Aktiv - gemeinsam die Zukunft erfahren. Kirchheim unter Teck: Aktiv-Büro, September 2006 54
- Brammer, Karl/Siffling, Gerhard:** Kalman-Bucy-Filter. 4. Auflage. München, Wien: Oldenbourg, 1994, ISBN 3486227793 43
- Breuel, Gabi/Ehmanns, Dirk/Arbitmann, Maxim:** AKTIV: Vorhabensbeschreibung Teilprojekt Kreuzungsassistenz -KAS. Februar 2006 – Technischer Bericht 5
- Bronstein, Ilja et al.:** Taschenbuch der Mathematik. Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 2005, ISBN 3817120060 67, 108
- Bundesamt, Statistisches:** Strukturdaten, <http://www.destatis.de>. Wiesbaden, 2007 – Technischer Bericht 1
- Chen, Jian/Deuschle, Stefan:** D40.71/2/3 Evaluation and User Acceptance Test Results. PReVENT SP Deliverable, EC Brussels, April 2007 – Technischer Bericht 7
- Danner, Max/Halm, Johannes:** Technische Analyse von Verkehrsunfällen. München: Eurotax, 1994, ISBN 3952004057 38
- Döllerer, Martin:** Einführung in die Biometrie. 2007 [URL: www.forst.tu-muenchen.de/EXT/LST/AWINF/LEHRE/BIOMETRIE/UNTERLAGEN/einheit4.html](http://www.forst.tu-muenchen.de/EXT/LST/AWINF/LEHRE/BIOMETRIE/UNTERLAGEN/einheit4.html) 105
- Donath, Max et al.:** Intersection Decision Support: An Overview - Final Report. University of Minnesota, September 2007 – Technischer Bericht 6, 20
- Donges, E.:** Vorlesungsskript Fahrerassistenzsysteme. Garching bei München, 2007 – Gastvorlesung 93
- Flemisch:** The H-metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction. 2003 – Technischer Bericht 88
- Freyman, Raymond:** Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen. In 1. Tagung: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Garching bei München, März 2004 5, 19
- Fürstenberg, Kay et al.:** D40.75 Final Report. PReVENT SP Deliverable, EC Brussels, February 2007 – Technischer Bericht 7, 10, 20

- Hannawald, Lars:** Unfallanalyse zur Entwicklung und Bewertung von Fahrerassistenzsystemen im Kreuzungsbereich. Dresden, 2005 – Forschungsbericht 17
- Hess, Sören:** Frequency spectrum for its status report of July 2006. COMeSafety, 2006 – technical report 54
- Honda:** Honda Completes Development of ASV-3 Advanced Safety Vehicles. Tokyo, 2nd September 2005 – press release 11
- Hopstock, Matthias/Ehmans, Dirk/Spannheimer, Helmut:** Development of Advanced Assistance Systems for Intersection Safety. In 9th International Forum on AMAA 2005. Berlin, 17th-18th March 2005 5
- Hopstock, Matthias/Thoma, Stephan:** D40.74 Evaluation Results Simulator. PReVENT SP Deliverable, EC Brussels, January 2007a – project report 79, 80
- Hopstock, Matthias/Thoma, Stephan:** D40.74b Evaluation Results of the Intersection Safety System. PReVENT SP Deliverable, EC Brussels, February 2007b – project report 11
- Horst:** A Time-based Analysis of Road User Behaviour at Intersections. 1990 – technical report 107
- Köhne, Anja/Wößner, Michael:** Navstar GPS. 2007 \langle URL: <http://www.kowoma.de> \rangle 40, 41, 65
- Klanner, Felix:** Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistentz. Diplomarbeit Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München, München, 2004 31, 40, 44
- Klanner, Felix/Ehmans, Dirk/Winner, Hermann:** ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistentz. In 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik. Aachen, 09.-11. Oktober 2006 16, 45, 52
- Kollmeier, Dietmar:** AKTIV Client API Spezifikation. softlab group, Juli 2007 – Projektbericht 63
- Krengel, Ulrich:** Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik. 5. Auflage. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 2000, ISBN 3-528-47259-6 95, 108
- Krüger, Hans-Peter et al.:** Untersuchung des Linksabbiegeassistenten, des Querverkehrsassistenten, des Ampelassistenten und des potentiellen Nutzens eines Workload-Management-Systems. Würzburg, 2006 – Abschlussbericht 85
- Lasowski, Robert/Kollmeier, Dietmar:** AKTIV Communication Unit Documentation. softlab group, Juli 2007 – Projektbericht 63
- Mages, Mark:** PReVENT Turn Into/Cross Driving Assistance. Darmstadt, 2005 – Milestone Report 37
- Mages, Mark:** PReVENT Turn Into/Cross Driving Assistance. Darmstadt, 19th January 2007 – Final Report of the Research Project 2, 11

- Marshall, Andrew:** V2V: GM technology can prevent accidents. Rüsselsheim/Dudenhofen, December 2006 – press release 9
- Meitinger, Karl-Heinz:** Fahrerabsichtserkennung - Beispiel Stoppschildassistent. März 2004, Präsentation 72
- Meitinger, Karl-Heinz/Ehmanns, Dirk/Heißing, Bernd:** Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen: Beispiel Stop-Schild-Warnung. In VDI/VW Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz, VDI-Bericht Nr.1864. Wolfsburg, 27.-29. Oktober 2004 4, 16, 80
- NHTSA:** General Estimates System-Datenbank, <http://www.nhtsa.gov>. Washington, DC, 2007 – Technischer Bericht 1
- N.N.:** Fahrzeugkommunikation, Ortung, Navigation und Zielführung. Fakultät Verkehrswissenschaften “Friedrich List“ TU Dresden, 2004 – Vorlesungsskript 56
- N.N.:** map24. 2007a [⟨URL: www.de.map24.com⟩](http://www.de.map24.com) 46
- N.N.:** quantel.com. 2007b [⟨URL: www.quantel.com/mdstat/scripts/cs1/cs1-html/cs1htmlhtmlnode13.html⟩](http://www.quantel.com/mdstat/scripts/cs1/cs1-html/cs1htmlhtmlnode13.html) 95
- Noszko, Thomas:** Annäherung an Stoppkreuzungen. München, April 2005 – Technischer Bericht 74
- Rüdenauer, Jörg:** Einsatz probabilistischer Verfahren zur Entscheidungsfindung im RoboCup. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2003 75
- Rössler, Bernd/Fürstenberg, Kay:** Intersection safety - results of the EC-project INTERSAFE. In 6th European Congress and Exhibition on ITS 2007. Aalborg, Denmark, 18th-20th June 2007 8
- Rössler, Bernd et al.:** D40.4 Requirements for Intersection Safety Applications. PREVENT SP Deliverable, EC Brussels, January 2005 – Technischer Bericht 22
- Rummel, Reiner/Peters, Thomas:** Bezugssysteme - Vorlesungsskript. Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, 2007 [⟨URL: http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~unhbox/voidb@x\penalty\@M\iapg/web/lehre/skripten/Mitschrift_BS_2007.pdf⟩](http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~unhbox/voidb@x\penalty\@M\iapg/web/lehre/skripten/Mitschrift_BS_2007.pdf) 42
- Scheuchpflug, Rainer et al.:** FVM AP 1400 Abschlussbericht. Würzburg, 2004 – Technischer Bericht 26
- Scholl, Walter E.:** Fahrerverhalten und Mensch-Maschine-Interaktion - FVM. Kirchheim unter Teck, 2005 – Ergebnisbericht 9
- Sengupta, Raja et al.:** Cooperative collision warning systems: Concept definition and experimental implementation. Berkeley, June 2006 – PATH project report 1, 2, 8
- Suzuki, Tomoji:** DENSO Cooperative Safety System Development. Munich, 9th July 2007 – Techreport 52

- Suzuki, Tomoji/Benmimoun, Ahmed/Chen, Jian:** Development of an Intersection Assistant. Denso Automotive, 2007 (Vol.12 No.1). – technical review 12, 20
- Vollrath, Mark et al.:** INVENT Kreuzungsverhalten. Braunschweig, Juni 2004 – Endbericht 73
- Yang, Zhengrong/Kobayashi, Takashi/Katayama, Tsuyoshi:** Development of an Intersection Collision Warning System Using DGPS. In SAE 2000 World Congress. Detroit, USA, March 2000 9
- Zahn, Peter:** ACUp - Aktive Communication Unit: C2C-CC konforme Kommunikationslösung für Aktive Sicherheit. AKTIV, August 2007 – projektinterne Veröffentlichung 63

Betreute studentische Arbeiten

Diewald, Fabian: Evaluierung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten. Semesterarbeit Institut für Produktionstechnik der TU München, München, 2007

Niehues, Daniel: Untersuchung zur präzisen und zuverlässigen Bestimmung der Fahrzeugposition und -ausrichtung. Diplomarbeit Institut für Verkehrsinformationssysteme der TU Dresden, Dresden, 2006 44

Rohrmüller, Florian: Prädiktion des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Trajektorien bei der Kreuzungsassistenz. Diplomarbeit Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der TU München, München, 2007 72

Eigene Veröffentlichungen

- Hopstock, Matthias/Klanner, Felix:** Intersection Safety - Just a Vision? In Car Safety2007. Berlin, 18th-19th October 2007
- Klanner, Felix:** Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistentz. Diplomarbeit Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München, München, 2004 31, 40, 44, 30, 39, 43
- Klanner, Felix/Ehmanns, Dirk/Winner, Hermann:** ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistentz. In 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik. Aachen, 09.-11. Oktober 2006 16, 45, 52, 15
- Klanner, Felix et al.:** Integration drahtloser Kommunikation und fahrzeuggebundener Sensorsysteme. In 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2008. Walting, 02.-04. April 2008
- Klanner, Felix/Thoma, Stephan/Winner, Hermann:** Fahrerverhaltensuntersuchungen und Interaktionskonzepte für die Kreuzungsassistentz. In 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Garching bei München, 07.-08. April 2008
- Nitz, Gregor/Klanner, Felix:** Evaluation of Advanced Driver Assistance Systems for Supportive Brake Application. In FISITA 2008 World Automotive Congress. Munich, 14.-19. September 2008
- Pfeifer, Reiner et al.:** Aktive Motorradsicherheit auf Basis von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. In 7. Internationale Motorradkonferenz des ifz. Köln, 06.-07. Oktober 2008

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Felix Rudolf Sebastian Klanner
Geburtsdatum/-ort: 11. Februar 1979, in Starnberg
Familienstand: verheiratet
Staatsangehörigkeit: deutsch und österreichisch

Ausbildung

02/2005 - 05/2008 Promotionsstudium Maschinenbau an der TU Darmstadt,
Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. H. Winner (TU Darmstadt)
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. B. Heißing (TU München)

10/1999 - 10/2004 Diplomstudiengang Maschinenwesen an der TU München,
Vertiefungsrichtungen: Fahrzeugtechnik und systematische
Produktentwicklung
Thema der Diplomarbeit: „Analyse des Potentials von
Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistenz“

09/1990 - 06/1999 Gymnasium Kempfenhausen
Leistungskurse: Mathematik und Biologie
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Berufstätigkeit

Seit 02/2007 BMW Group Forschung und Technik, München
Entwicklungsingenieur im Bereich Fahrerassistenz und aktive
Sicherheit

02/2005 - 01/2007 BMW Group Forschung und Technik, München
Doktorand im Bereich Fahrerassistenz und aktive Sicherheit

München, den 28.02.2008