

Umfeldklassifikation und Identifikation
von Überholzielen für ein
Überholassistentensystem

Umfeldklassifikation und Identifikation von Überholzielen für ein Überholassistenzsystem

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

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Andree Hohm
aus Obernburg am Main

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Tag der Einreichung: 12. Mai 2010

Tag der mündlichen Prüfung: 6. Juli 2010

Darmstadt, 2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während der Zeit meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt (FZD). Die Inhalte wurden im Rahmen des dreieinhalbjährigen Forschungsprojekts „PRORETA - Überholassistentz“ erarbeitet, welches von der Continental Teves AG & Co. oHG in Auftrag gegeben und gefördert wurde.

Einen herzlichen Dank richte ich an meinen Doktorvater, den Leiter von FZD, Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, der durch die wertvolle und ausgesprochen konstruktive Betreuung meiner Arbeit in besonderem Maße zu deren Gelingen beigetragen hat. Ebenfalls gilt mein besonderer Dank Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf für die Übernahme des Korreferats.

Für die hervorragende Zusammenarbeit bei der Bearbeitung der Projektaufgabe möchte ich mich sowohl bei meinen Teamkollegen Roman Mannale, Ken Schmitt und Christian Wojek bedanken als auch bei Prof. Dr.-Ing. Rolf Isermann für seine Rolle als Projektleiter.

Die Durchführung der Untersuchungen, wie sie in der vorliegenden Arbeit dokumentiert sind, wurde maßgeblich durch die vertrauensvolle und enge Kooperation mit den Mitarbeitern von Continental in Frankfurt ermöglicht. Hier gilt mein Dank insbesondere Dr. Peter Rieth und Dr. Stefan Lüke.

Allen Mitarbeitern von FZD, dem Assistentenkreis, der Fachgebietsleitung sowie dem Sekretariat und den Werkstätten, danke ich für die freundliche und positive Arbeitssphäre.

Letzlich stellt eine Dissertation immer auch eine Gemeinschaftsleistung dar, die ohne die engagierte Mitarbeit von Studenten – sei es in Form von Studien- und Diplomarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte – kaum vorstellbar ist, daher gilt diesem Personenkreis mein besonderer Dank.

Sehr dankbar bin ich meiner Frau Ramona für die aufgebrachte Geduld und aktive Unterstützung während meiner FZD-Zeit. Dieser Rückhalt war für das Gelingen der vorliegenden Arbeit entscheidend.

Andree Hohm

Darmstadt, im Mai 2010

„Inmitten der Schwierigkeit liegt die Möglichkeit.“

Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	VIII
Formelzeichen und Indizes	IX
Kurzfassung	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele der Arbeit	8
1.3 Anwendungsbereich und Grenzen	9
1.4 Methodik und Aufbau	10
1.5 Stand der Forschung	11
1.5.1 Fazit	14
2 Überholvorgänge und Assistenzkonzepte	15
2.1 Definition und Klassifizierung von Überholvorgängen	15
2.2 Der idealtypische Überholvorgang	16
2.2.1 Modellierung des Beschleunigungsverlaufs	23
2.2.2 Simulation eines Überholvorgangs mit Parametervariation	25
2.3 Charakteristische Zeitpunkte und Überholphasen	25
2.3.1 Möglichkeit des unkritischen Überholabbruchs	28
2.4 Überholziele und Systemarchitektur	30
2.4.1 Überholassistent PRORETA II	31
2.5 Fazit	32
3 Bewertung von Überholvorgängen - Probandenstudie	33
3.1 Einführung	33
3.1.1 Motivation	33
3.1.2 Einordnung in die Überholzieldetektion	35
3.2 Systemparameter für ein Überholassistentensystem	35
3.2.1 TTC, Overtaking Margin (<i>OM</i>) und Adequate Overtaking Margin (<i>AOM</i>)	35
3.2.2 Einscherabstand nach Manöverende	38
3.3 Bisherige Forschungsarbeiten	38
3.3.1 Manöverbeobachtungen mit Realfahrzeugen	38
3.3.2 Untersuchungen in Fahrsimulatoren	43
3.3.3 Fazit	45
3.4 Experimente mit Probanden und Ergebnisse	45
3.4.1 Methodik	45
3.4.2 Beschreibung des Probandenkollektivs	46

3.4.3	Teststrecke und Versuchsfahrzeuge	47
3.4.4	Vorversuche	48
3.4.5	Ablauf Probandenversuche	49
3.4.6	Experimente	50
3.4.7	Ergebnisse und Diskussion	54
3.5	Fazit	59
4	Umfeldwahrnehmung	61
4.1	Anforderungen an Sensoren für ein Überholassistentensystem	61
4.1.1	Detektionsdistanz Gegenverkehr	63
4.1.2	Detektionsdistanz Überholziele	67
4.1.3	Betrachtung gekrümmter Straßenverläufe	68
4.2	Umfeldsensorik im Automobilbereich	73
4.3	Objektverfolgung	75
4.3.1	Koordinatensystem und Objektmodell	76
4.3.2	Aufbau der Objektverfolgung	77
4.4	Einordnung in die Überholzieldetektion	82
4.5	Evaluation: Forschungshypothesen und Experimente	82
4.5.1	Hypothese 'Ferner Gegenverkehr'	83
4.5.2	Hypothese 'Gegenverkehr bei Überholmanövern'	85
4.5.3	Hypothese 'Quermanöver: Kontinuierliche Objektverfolgung'	88
4.5.4	Hypothese 'Quermanöver: Erstdetektion'	89
4.5.5	Hypothese 'Frühzeitige Detektion'	91
4.5.6	Hypothese 'Enges Überholziel'	95
4.6	Fazit	98
5	Klassifikation von Umfeldobjekten über eine Digitale Karte	100
5.1	Digitale Karten für Überholassistentensysteme	100
5.1.1	Informationsbedarf	100
5.1.2	Motivation für eine kartenbasierte Umfeldklassifikation	102
5.1.3	Bisherige Arbeiten	104
5.2	Einordnung in die Überholzieldetektion	105
5.3	Hypothesen und Untersuchungsmethodik	106
5.3.1	Methode	106
5.3.2	Hypothesen	107
5.3.3	Untersuchungswerkzeuge	108
5.3.4	Versuchsstrecken	112
5.3.5	Experimente und Ergebnisse	114
5.4	Diskussion und Fazit	124
6	Zusammenfassung	128
A	Ergebnisdarstellung Probandenstudie: OM als Distanz	131
B	Sichtweiten Gegenverkehrsfahrstreifen	132
C	Berechnung der Überholdauer	134

D	Versuchsfahrzeuge	135
E	Parameter Objektverwaltung	138
F	Versuchsstrecken	139
F.1	August-Euler-Flugplatz Griesheim	139
F.2	Bundesstraße 26 Altheim-Babenhausen (Hessen)	139
F.3	Landesstraße Aschaffenburg/Nilkheim-Niedernberg (Bayern)	139
F.4	Landesstraße L3303 Büttelborn-Griesheim (Hessen)	140
F.5	Landesstraße L3094 (Dieburger Straße) Darmstadt - Grube Messel	141
F.6	Griesheim nahe Brücke über A67 (Weiterstädter Straße)	141
F.7	Landstraße L3111 bei Groß-Rohrheim (Hessen)	141
F.8	Bundesstraße B3 Darmstadt-Bickenbach	142
G	Regelquerschnitte nach RAS-Q	143
H	Überholen in der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)	145
	Literaturverzeichnis	147

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
A	Überholer
ACAS	Automatic Collision Avoidance System
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub
ADAS	Advanced Driver Assistance System
AOM	Adequate Overtaking Margin
AHS	Aufholstrecke
API	Application Programming Interface
B	Zu überholendes Fahrzeug
BAS _t	Bundesanstalt für Straßenwesen
BAS	Bremsassistent
BAS+	Bremsassistent Plus
BLIS	Blind Spot Information System
C	Gegenverkehrsfahrzeug
CAS	Collision Avoidance System
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECU	Electronic Control Unit
EGO	Fahrzeug mit Überholassistentensystem
ESC	Electronic Stability Control
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FSW	Fahrstreifenwechsel
GPS	Global Positioning System
GS	Geometrische Sichtlinie
HMI	Human Machine Interface
IPAS	Intelligent Power Assisted Steering
Lkw	Lastkraftwagen
NMEA	National Marine Electronics Association
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
OM	Overtaking Margin
OOP	Objektorientierte Programmierung
PET	Post Encroachment Time
Pkw	Personenkraftwagen
RQ	Regelquerschnitt
StVO	Straßenverkehrsordnung
TTC	time-to-collision
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WGS	World Geodetic System

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a_q	m/s ²	Querbesehleunigung des überholenden Fahrzeugs
$a^{(A)}$	m/s ²	Besehleunigung des überholenden Fahrzeugs
c_a		Abtastschritte seit Objektinitialisierung
c_f		Fehlende Zuordnungen seit Objektinitialisierung
$d^{(AB)}$	m	Distanz Überholer - Überholter
$d_{min}^{(AB)}$	m	Minimal akzeptierte Einscherdistanz
$d^{(AC)}$	m	Distanz Überholer - Gegenverkehr
$d^{(BC)}$	m	Distanz Überholter - Gegenverkehr
D		Diskriminante
d_{AHS}	m	Aufholstrecke
E_{kin}	kWh	Kinetische Energie
$l^{(A)}$	m	Länge des überholenden Fahrzeugs
$l^{(B)}$	m	Länge des zu überholenden Fahrzeugs
m	kg	Masse
P_{netto}	kW	Netto-Antriebsleistung
r_{GS}	m	Sensorsichtweite durch Geometrische Sichtlinie
r_{max}	m	Maximale Detektionsdistanz Sensor
R_C	m	Radius Mittellinie Gegenverkehrsfahstreifen
r_S	m	Resultierende Sensorsichtweite bei gekrümmter Fahrbahn
$R_{S,r}$	m	Sensorreichweitenbedarf für Überholziele
$R_{S,l}$	m	Sensorreichweitenbedarf für Gegenverkehr
t_{UeBEG}	s	Ausscherzeitpunkt
t_{UeEND}	s	Zeitpunkt des Überholendes
t_{SueZ}	s	Schließzeitpunkt des Überholziels
Δt_{UeDAU}	s	Überholdauer
$T_{reaktion}$	s	Reaktionszeit Warnung - Bremsenaktivierung
v_0	m/s	Geschwindigkeit zum Beginn eines Besehleunigungsvorgangs
$v^{(A)}$	m/s	Geschwindigkeit des überholenden Fahrzeugs
$v^{(B)}$	m/s	Geschwindigkeit des zu überholenden Fahrzeugs
$v^{(C)}$	m/s	Geschwindigkeit des Gegenverkehrsfahrzeugs
$v_{rel}^{(AB)}$	m/s	Relativgeschwindigkeit Überholer - Überholter
W	m	Tor-Weite
w_{FA}	m	Breite Seitenstreifen ohne Sichtverdeckung
w_L	m	Breite Fahstreifen
x	m	x-Position verfolgtes Objekt
\dot{x}	m/s	x-Geschwindigkeit verfolgtes Objekt
\ddot{x}	m/s ²	x-Besehleunigung verfolgtes Objekt

$x^{(A)}$	m	Position des überholenden Fahrzeugs
$x^{(B)}$	m	Position des zu überholenden Fahrzeugs
$x^{(C)}$	m	Position des Gegenverkehrsfahrzeugs
x_{SPGS}	m	Schnittpunkt Sichtlinie - Mittellinie Gegenverkehrsfahrstreifen
y	m	y-Position verfolgtes Objekt
\dot{y}	m/s	y-Geschwindigkeit verfolgtes Objekt
\ddot{y}	m/s ²	y-Beschleunigung verfolgtes Objekt
θ	°	Einseitiger horizontaler Öffnungswinkel Sensor
κ_{CL}	1/m	Horizontale Fahrbahnkrümmung an der Mittellinie
κ_{grenz}	1/m	Grenzkümmung zur Bestimmung der Sensorsichtweite
Ξ_{del}^B		Schwellwert für die Objektlöschung Fzg. „B“
Ξ_{del}^C		Schwellwert für die Objektlöschung Fzg. „C“
Ψ	°	Gierwinkel des Überholers zum Überholende
Ω	°	Verdrehung Koordinatensysteme WGS - Fahrzeug

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Umfeldwahrnehmung für ein Fahrerassistenzsystem für Überholmanöver. Um den Fahrer vor einer gefährlichen Situation im Rahmen eines Überholmanövers rechtzeitig warnen zu können, muss ein solches System in der Lage sein, sogenannte Überholziele zu erfassen und dahingehend zu bewerten, ob diese für einen sicheren Abschluss des Überholens geeignet sind.

Für die Umfeldwahrnehmung des im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen Überholassistentensystems, wird eine Grundstruktur vorgestellt, die drei zentrale Elemente enthält, die für die Bereitstellung einer validen Umfelderkennung für Überholziele bedeutsam sind: Die robuste Erfassung von Umfelddaten, die Klassifikation von Objekten im Fahrzeugumfeld hinsichtlich ihrer Relevanz für eine vorliegende Überholmanöver-Situation und eine Parameter-Datenbasis, die eine Bewertung von Überholzielen gestattet.

Ein wichtiger Parameter für diese Bewertung ist die *time-to-collision* (TTC) zum Gegenverkehr zum Zeitpunkt des Endes des Überholmanövers. Wird dieser Grenzwert bei der Vorausberechnung des Überholablaufes unterschritten, wird das entsprechende Überholziel als nicht geeignet bewertet und das Assistenzsystem warnt den Fahrer vor dieser Gefahrensituation. Um diesen Grenzwert zu ermitteln, dessen Auslegung einen großen Einfluss auf die Akzeptanz eines derartigen Systems durch den Fahrer erwarten lässt, wurde in dieser Arbeit eine umfassende Probandenstudie mit 24 Teilnehmern und über 680 Versuchsfahrten durchgeführt. Als Ergebnis steht die Empfehlung für einen Grenzwert bei 1,4s. Durch die detailliert dargestellten Ergebnisse ist auch eine Abschätzung möglich, inwiefern aus einer Variation dieses Wertes eine Änderung der Fahrerakzeptanz resultiert.

Um Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der zu definierenden Umfelderkennung zu bestimmen, wurde eine ausführliche kinematische Analyse zu benötigten Sensorreichweiten durchgeführt. Das Ergebnis zeigt notwendige Reichweiten für eine Warnung des Fahrers zu einem frühen, ungefährlichen Manöverzeitpunkt in einer Größenordnung von 400 m. Mit einem modifizierten Fernbereichsradarsensor, der diese Reichweite ermöglicht, und einem implementierten Algorithmus zur Objektverfolgung wurde untersucht, ob die Erfassung, insbesondere von Gegenverkehr in großen Entfernungen, zuverlässig erzielbar ist. Entsprechende Hypothesen konnten auch bei spezifisch ausgewählten Worst-Case Szenarien nicht widerlegt werden. Daher stellen die hier gezeigten Ergebnisse die Machbarkeit einer Umfelderkennung für die Entfernungsbereiche dar, die für ein Überholassistentensystem bedeutend sind.

Mit der Anwendung von Umfelddatensensoren mit großer Reichweite steigt das Risiko, auch Fahrzeuge zu detektieren, die sich nicht auf dem vorausliegenden Straßenverlauf befinden und somit nicht für die Bewertung einer Überholmanöver-Situation heranzuziehen sind.

Um eine Klassifikation der erkannten Fahrzeuge in *relevant* bzw. *nicht relevant* durchzuführen, wird in dieser Arbeit der Einsatz von digitaler Karteninformation untersucht. Mit dem hierzu vorgeschlagenen Algorithmus ist eine Prüfung möglich, ob ein Objekt, welches von der Umfelderkennung erkannt wurde, sich auf dem vorausliegenden Abschnitt der momentan befahrenen Straße befindet oder nicht. In verschiedenen Fahrversuchen auf öffentlichen Straßen hat sich die Unterscheidbarkeit von *relevanten* und *nicht relevanten* Fahrzeugen bewährt.

Die Arbeit beleuchtet diese drei als maßgeblich identifizierten Teilaspekte einer Umfelderkennung für ein Überholassistentensystem und zeigt auf, dass die zentralen Anforderungen, die von einem derartigen System gestellt werden, mehrheitlich erfüllbar sind und die hier vorgestellte Fahrzeugumfelderkennung die Assistentenfunktion „Überholen“ auf eine solide Grundlage stellt.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Fahrerassistenzsysteme

Eine Vielzahl technischer Entwicklungen im Automobilbereich hat seit den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts zu einer kontinuierlichen Abnahme der Unfallzahlen im Gebiet der heutigen Bundesrepublik Deutschland geführt. Damit verbunden war auch ein deutlicher Rückgang der Zahl der Personen, die im Straßenverkehr verletzt oder getötet wurden. Diese Entwicklung ist besonders beeindruckend, wenn die Zahlen vor dem Hintergrund der Entwicklung des Fahrzeugbestandes im gleichen Zeitraum betrachtet werden. Aus Abbildung 1.1 lässt sich erkennen, dass im Verlauf der Jahre 1970 bis 2005 ein Rückgang der Zahl der im Straßenverkehr getöteten Personen um ca. 75% einem Anstieg der Zahl der zugelassenen Fahrzeuge um ca. 170% gegenübersteht.

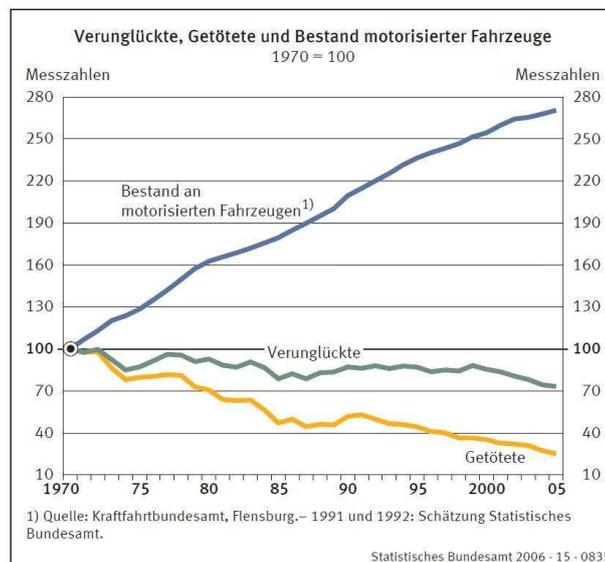


Abbildung 1.1: Langfristiger Verlauf des Fahrzeugbestandes und der Unfallzahlen in der Bundesrepublik Deutschland (Quelle: Statistisches Bundesamt¹⁾).

Diese Entwicklungen sind mutmaßlich zu einem großen Teil auf Verbesserungen der Fahrzeugsicherheit zurückzuführen. Hierbei umfassen Systeme der *Passiven Sicherheit* all jene fahrzeugtechnischen Maßnahmen mit dem Ziel der Minderung von Unfallfolgen. Auf diesem Gebiet wurden im betrachteten Zeitraum enorme Fortschritte erzielt. Besonders zu nennen sind hier Systeme wie der Dreipunkt-Gurt, die Sicherheitslenksäule, die Sicherheitskaros-

¹DESTATIS (2008): Verkehrsunfälle 2007.

serie mit stabiler Fahrgastzelle und Deformationsstruktur sowie der Airbag². Allerdings zeigt beispielsweise eine Untersuchung des ADAC aus dem Jahr 2008, dass die Effektivität dieser Maßnahmen bei Unfällen mit zunehmender Geschwindigkeit ausgesprochen stark sinkt³. Hier wurde gezeigt, dass durch die Erhöhung der Aufprallgeschwindigkeit bei einem Standard-Crashtest, ein Fahrzeug mit sehr guter Bewertung bei 64 km/h bei einer Versuchsdurchführung mit 80 km/h signifikant schlechtere Resultate erzielt. Bei Unfalltypen, bei denen hohe Kollisionsgeschwindigkeiten auftreten, ist eine weitere deutliche Senkung der Zahl von Verkehrstoten durch Einführung und Entwicklung passiver Systeme folglich nicht zu erwarten.

Für die Zielsetzung der Europäischen Union, die Zahl der Verkehrstoten in Europa in den Jahren zwischen 2000 und 2010 um die Hälfte zu reduzieren, erscheint die alleinige Anwendung passiver Sicherheitssysteme aus obengenannten Gründen nicht ausreichend, explizit wird daher die Entwicklung neuer, intelligenter Technologien in der Automobiltechnik empfohlen⁴. Diese Notwendigkeit wird insbesondere vor dem Hintergrund des in den Industrieländern existierenden Trends des demographischen Wandels hin zu einem größeren Anteil älterer Fahrer von Kraftfahrzeugen deutlich. Obschon Senioren, relativ zu Ihrem Anteil an der Bevölkerung, unterproportional am Unfallgeschehen beteiligt sind, ist dieser Anteil in den beiden vergangenen Dekaden merklich gestiegen. Zurückzuführen ist diese Entwicklung sicherlich zu einem großen Teil auf altersbedingte Einschränkungen, die Fahrfehler nach sich ziehen können, besonders bei komplexen Anforderungssituationen bzgl. Wahrnehmungsfähigkeit und kognitiver Leistungsfähigkeit⁵.

Eine Lösung können hier Systeme der *Aktiven Sicherheit* darstellen, technische Maßnahmen mit der Zielsetzung der Unfallvermeidung⁶. Systeme aus diesem Bereich finden noch weit seltener Anwendung in Serienfahrzeugen, als dies bei Systemen der passiven Sicherheit der Fall ist. Eine Ausnahme hierbei ist die Elektronische Stabilitätskontrolle ESP, eine Fahrdynamikregelung, die durch radselektive Bremsengriffe drohendes Schleudern verhindert⁷. Hierfür konnte durch Untersuchungen anhand von Unfalldaten bereits eine Wirksamkeit bei der Reduktion von Unfallzahlen auf Landstraßen gezeigt werden⁸. Weitere Beispiele sind kollisionsvermeidende oder -folgenmindernde Sicherheitssysteme wie der Bremsassistent Plus (BAS+) von Mercedes-Benz⁹. Dieses System detektiert mit einem Radarsensor Abstand und Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug und versucht, gefährliche Situationen durch aktive Ansteuerung der Bremsen zu entschärfen.

Zusammenfassend bieten Systeme der *Aktiven Sicherheit* hohes Potenzial bei der weiteren Reduktion von gefährlichen Verkehrsunfällen, besonders gilt dies bei Unfalltypen mit zu erwartenden hohen Kollisionsgeschwindigkeiten, da passive Systeme dort an ihre Grenzen stoßen.

²Kramer (2008): Passive Sicherheit S. 182.

³ADAC (2008): Crashtest.

⁴EC (2001): EU Transport Policy S. 68.

⁵Rudinger (2009): Demographischer Wandel S. 19.

⁶Winner/Hakuli/Wolf (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme S. 24.

⁷van Zanten/Erhardt/Pfaff (1994): ESP S. 674.

⁸Gail et al. (2008): Fahrzeugsicherheit Landstraßenunfälle.

⁹Schittenhelm (2008): Design of Collision Mitigation Systems.

Überholunfälle

Die Zahl der im Jahr 2007 auf Straßen der Bundesrepublik Deutschland tödlich verunglückten Personen liegt bei 4949. Ca. 60 % dieser Opfer starben auf Landstraßen¹⁰. Bei der Betrachtung der Unfalltypen¹¹ zeigt sich, dass der sogenannte „Fahrerunfall“ mit 50 % am häufigsten auftritt. Dieser Unfalltyp wird insbesondere durch Fahrdynamik-Regelsysteme wie dem Elektronischen Stabilitätsprogramm ESP adressiert¹². Hierzu existieren bereits Untersuchungen, die in jüngerer Zeit eine deutliche Senkung der Unfallzahlen durch die breite Einführung solcher Systeme aufzeigen¹³. Aufgrund der ab 2014 EU-weit geltenden Pflicht zur Ausstattung aller neu produzierten Fahrzeuge¹⁴ ist eine weitere Entwicklung in dieser Richtung zu erwarten.

Ein Unfall, der durch die Konfliktsituation mit Verkehrsteilnehmern ausgelöst wird, die in gleicher oder entgegengesetzter Richtung fahren, wird als „Unfall im Längsverkehr“ bezeichnet und stellt mit 24 % den zweithäufigsten Unfalltyp der tödlichen Unfälle auf Landstraßen dar (Abbildung 1.2). Dieser umfasst neben Auffahrerunfällen, bei denen marktnahe oder bereits im Markt befindliche (Not-)Bremsassistenten Unterstützung bieten können¹⁵, im Wesentlichen Unfälle im Begegnungsverkehr sowie Unfälle in Überholmanövern. Auf Basis dieser Zahlen kann zwar keine unmittelbare Aussage über die Zahl der Personen getroffen werden, die im Rahmen von Überholmanövern getötet wurden, allerdings ergeben sich Hinweise auf einen hohen Stellenwert von Überholmanövern im Bereich des Unfalltyps „Längsverkehr“: Bei einer Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aus dem Jahr 2000¹⁷ ergab sich eine Aufteilung der Längsverkehrsunfälle hauptsächlich in die Bereiche Auffahrerunfälle mit 42 %, gefolgt von Überholmanövern mit einem Anteil von 37 % und Fahrersituationen im Begegnungsverkehr mit 18 % (Abbildung 1.3). Die Daten beziehen sich hier jedoch auf alle Unfälle, unabhängig von der Verletzungsschwere.

Da bei Unfällen im Bereich von Überholmanövern mit dem Auftreten von hohen Relativgeschwindigkeiten zu rechnen ist, kann die Annahme getroffen werden, dass der Anteil der Überholunfälle an den Unfällen im Längsverkehr deutlich zunimmt, wenn statt aller Unfälle mit Personenschäden nur Unfälle mit Todesopfern betrachtet würden. Diese Annahme wird durch eine weitere Analyse gestützt: Bei der Gliederung der Zahl der Getöteten auf Landstraßen nach der sog. Unfallart¹⁹ stellen Gegenverkehrskollisionen mit einem Anteil von ca. 30 % die zweithäufigste Gruppe (Abbildung 1.2).

Die vorliegenden Betrachtungen erlauben die Abschätzung, dass etwa 5 % aller Todesopfer im Straßenverkehr der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen von Überholvorgängen auf Landstraßen verunglücken. Studien aus Staaten mit einer vergleichbaren Infrastruktur

¹⁰d. h. außerorts, ohne Autobahn

¹¹Der Unfalltyp beschreibt, unabhängig von der Unfallursache und der herbeigeführten Art der Kollision, die Konfliktsituation, die zum Unfall führte.

¹²van Zanten/Erhardt/Pfaff (1994): ESP S. 674.

¹³Gail et al. (2008): Fahrzeugsicherheit Landstraßenunfälle.

¹⁴Diemer (2009): VDA2009.

¹⁵Bender et al. (2007): Antikollisionssystem PROETA S. 337.

¹⁶DESTATIS (2008): Verkehrsunfälle 2007.

¹⁷Otte (2000): Charakteristika von Unfällen auf Landstraßen S. 51.

¹⁸Otte (2000): Charakteristika von Unfällen auf Landstraßen S. 51.

¹⁹Die Unfallart beschreibt den Ablauf des Unfalls hinsichtlich der Art der Kollision bzw. des Abkommens von der Fahrbahn.

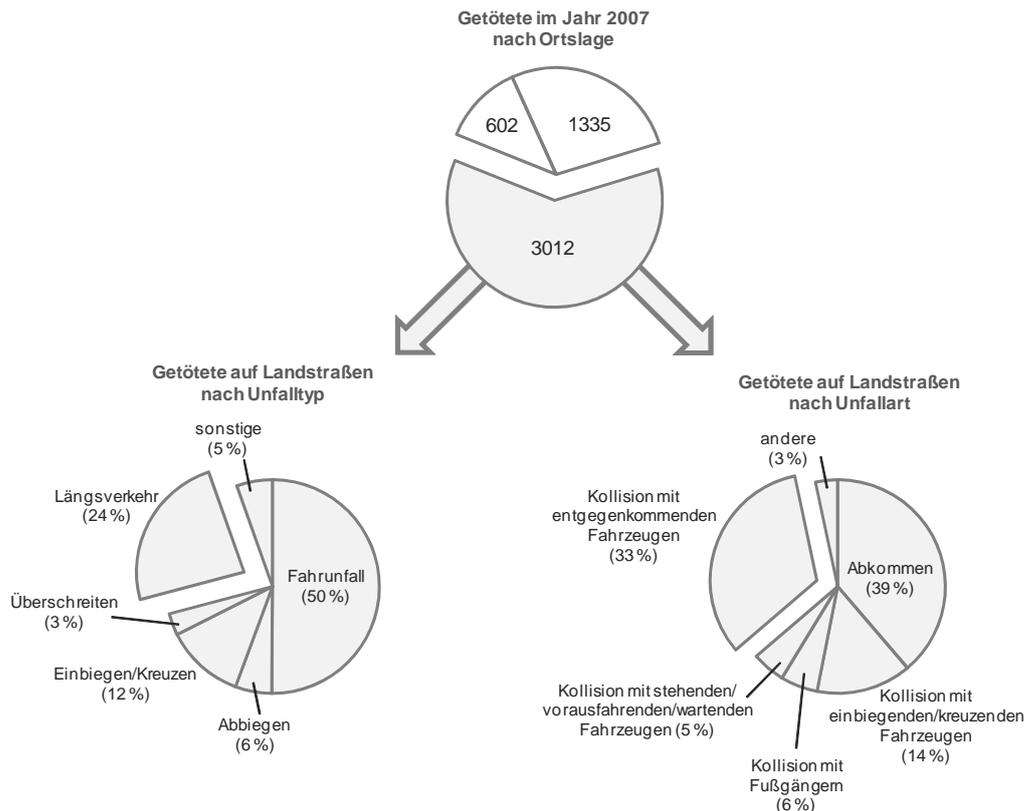


Abbildung 1.2: Getötete auf deutschen Straßen im Jahr 2007 und Gruppierung nach Unfalltyp und Unfallart (Daten: Statistisches Bundesamt¹⁶)

machen diese Abschätzung plausibel: So wurde für das Gebiet der Niederlande für die Jahre von 1995 bis 2000 bei 2,6 % aller Todesfälle im Straßenverkehr eine konkrete Überhol-situation als Ursache bestimmt²⁰. Ähnliche Betrachtungen für Großbritannien liegen bei Werten von 7,9 %²¹. In den USA finden jährlich ca. 4500 Personen den Tod durch Zusammenstöße mit entgegenkommenden Fahrzeugen. Das entspricht ungefähr 20 % aller Verkehrso-pfer in den Vereinigten Staaten²².

Verringerung der Zahl der Überholunfälle

Um die Zahl der Verkehrstoten bei Überholvorgängen zu vermindern, existieren verschie-dene Ansätze, die von HEGEMAN²³ in drei Gruppen eingeteilt werden: Die Einführung umfassender Überholverbote, die laterale Erweiterung von Landstraßen um einen eigen-en Überholfahrstreifen, der abwechselnd in definierten Abständen von den Fahrzeugen der beiden Richtungen genutzt werden kann, sowie die Entwicklung und Einführung von überhol-spezifischen Fahrerassistenzsystemen.

Untersuchungen von KOOREY²⁴ aus Neuseeland zeigen, dass bei Fahrern, die aufgrund

²⁰Hegeman (2004): Overtaking Frequency.

²¹Clarke/Ward/Jones (1998): Overtaking Accidents S. 1.

²²Persaud/Retting/Lyon (2004): Centerline Rumble Strips S. 2.

²³Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 4.

²⁴Koorey (2007): Passing Opportunities.

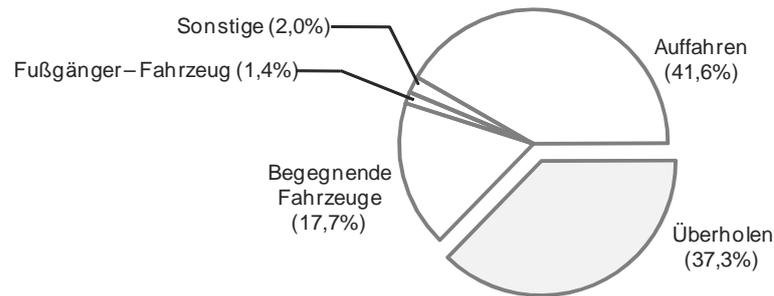


Abbildung 1.3: Landstraßenunfälle im Längsverkehr (Daten: Bundesanstalt für Straßenwesen¹⁸)

fehlender Überholmöglichkeiten zu längeren Folgefahrten hinter langsamfahrenden Fahrzeugen gezwungen sind, häufig die Neigung auftritt, unsichere bzw. kritische Überholmanöver durchzuführen. Aufgrund der Differenzen in den gesetzlichen Höchstgeschwindigkeiten auf Landstraßen zwischen verschiedenen Fahrzeugklassen²⁵ würden diese Situationen bei einem umfassenden Überholverbot häufig auftreten. Dies könnte sowohl einen Anreiz zur Übertretung des Verbots als auch zur häufigen Durchführung kritischer Überholvorgänge bieten.

Die Einführung neuer, zusätzlicher Fahrstreifen, würde zum einen sehr viel Zeit beanspruchen, zum anderen immense Kosten nach sich ziehen, die aufgrund angespannter Haushaltslagen in öffentlichen Kassen als problematisch anzusehen sind. Darüberhinaus existieren Simulatorstudien von KIM UND ELEFTERIADOU²⁶, die darauf hindeuten, dass ein zusätzlicher Fahrstreifen als sogenannte *Passing-Zone* keinen positiven Einfluss auf die Kapazität einer Straße hat. Da die Zielrichtung von Ausgaben im Straßenbau zumeist die Erweiterung dieser Kapazität als primäres Ziel verfolgt, dürfte eine Rechtfertigung solch hoher Kosten schwerfallen.

Da die ersten beiden Möglichkeiten zur Reduktion der Zahl von Verkehrstoten bei Überholunfällen aus den erläuterten Gründen eine problematische Umsetzbarkeit zeigen, resümiert HEGEMAN, dass die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für Überholsituationen an dieser Stelle das größte Realisierungspotential zur Verringerung der entsprechenden Unfallzahlen aufweist.

Menschliche Wahrnehmung in Überholsituationen

Arbeitswissenschaftliche Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Bewertung einer Überholsituation die Wahrnehmung des Menschen generell überfordert. LEUTZBACH UND PAPAVALIOU nennen als wesentliche kognitive Leistungen, die ein Fahrer beim Überholen leisten muss²⁷:

- Schätzung der eigenen Geschwindigkeit

²⁵z. B. 100 km/h für Personenkraftwagen (Pkw) und 80 km/h für Lastkraftwagen (Lkw).

²⁶Kim/Eleftheriadou (2007): Capacity Estimation Using Simulation.

²⁷Leutzbach/Papavasiliou (1988): Wahrnehmungsbedingungen S. 68.

- Kenntnis über das Beschleunigungsvermögen des eigenen Fahrzeugs
- Schätzung der Entfernung und der Geschwindigkeit des entgegenkommenden Fahrzeugs

Die Autoren kommen beim ersten Punkt zur Einschätzung, dass Fahrer über ihre aktuelle Eigengeschwindigkeit eine Vorstellung haben, die sich verhältnismäßig gut mit dem tatsächlichen Wert deckt. Allerdings gibt es hier weiterführende Untersuchungen, die den Schluss nahelegen, dass dies nur durch aufmerksames Beobachten des Tachometers möglich ist. Wird Probanden dieses Instrument jedoch entzogen, so können beträchtliche Fehler bei der Schätzung der Eigengeschwindigkeit auftreten²⁸. Bei der Kenntnis des Beschleunigungsvermögens des eigenen Fahrzeugs kommen LEUTZBACH UND PAPAVALIOU als Ergebnis einer wahrnehmungsphysiologischen Betrachtung zu dem Schluss, dass der Fahrer diese zumindest näherungsweise in ihrer momentanen Größenordnung abschätzen kann, dagegen resümieren sie bei der Bewertung des letzten Punktes²⁹:

„...dass [Kraftfahrzeug-]Fahrer aus wahrnehmungsphysiologischen Gründen kaum in der Lage sind, aus Entfernungen eine akzeptable Schätzung der Relativgeschwindigkeit zum entgegenkommenden Fahrzeug durchzuführen.“

Es gibt verschiedene Theorien, nach welchem Kriterium Fahrer die Geschwindigkeit entgegenkommender Fahrzeuge schätzen. Diskutiert werden an dieser Stelle, dass sich die Schätzung an einer „erwarteten Geschwindigkeit“ orientiert, beispielsweise der Höchstgeschwindigkeit auf der jeweiligen Strecke³⁰ oder die Übertragung der eigenen Geschwindigkeit auf die des Gegenverkehrs (RUMAR UND BERGGRUND³¹). Weitere Studien von FARBER UND SILVER deuten ferner darauf hin, dass die Höhe der tatsächlichen Geschwindigkeit des Gegenverkehrs nachweisbar ohne Einfluss auf die Überholentscheidung bleibt³², was zu tendenziell kritischeren Situationen führt, wenn der Gegenverkehr eine hohe Geschwindigkeit aufweist. Die Hauptaussage dieser und weiterer Untersuchungen wird von HOFFMANN³³ wie folgt zusammengefasst:

„It ist apparent [...] (that) scaling of relative speed is irrelevant to the problem of overtaking, as this information is not visually available to the driver when the overtaking decision is made.“

GRAY UND REGAN führten Untersuchungen in einem Fahrsimulator durch, Probanden erhielten dabei die Aufgabe auf ein akustisches Signal hin zu überholen, sofern sie die Situation als sicher für einen Überholvorgang einstufen³⁴. Das Ergebnis war – je nach Versuchsbedingung – ein Anteil von 16-40 % von der Gesamtzahl durchgeführter Überholmanöver, die sich in ihrem Verlauf als kollisionsgefährlich herausstellten, d. h. ohne kooperatives Verhalten der anderen beteiligten Fahrzeuge wäre es hier zu einer Kollision gekommen. Trotz der in vielerlei Hinsicht unrealistischen Simulatorsituation, stützen diese

²⁸Evans (2004): Traffic Safety S. 176.

²⁹Leutzbach/Papavasiliou (1988): Wahrnehmungsbedingungen S. 70.

³⁰Leutzbach/Papavasiliou (1988): Wahrnehmungsbedingungen S. 74.

³¹Noy/Karwowski (2005): Handbook of Human Factors S. 13-12.

³²Noy/Karwowski (2005): Handbook of Human Factors S. 13-12.

³³Hoffmann/Mortimer (1996): Scaling relative velocity S. 417.

³⁴Gray/Regan (2005): Perceptual Processes S. 407.

Zahlen deutlich die Annahme, dass Fahrzeugführer eine Überholmöglichkeit nicht sicher beurteilen können. Auf dieser Basis formulieren GRAY UND REGAN, neben der Forderung nach besserer Fahrerausbildung, den Vorschlag³⁵:

„[Another] possible safety measure could be the addition of in-car driver aids that can measure the range and speed of the oncoming and lead vehicles (e. g. radar, laser, GPS) and provide a warning if the driver initiates an unsafe maneuver.“

In seiner Dissertation werden von LANGE verschiedene potentielle Systeme zur Fahrerunterstützung untersucht. Beim Überholen kommt der Autor dabei zu dem Resümee, dass Fahrer Unterstützungspotential bei Überholvorgängen benötigen, insbesondere beim Abschätzen des Überholweges und der Geschwindigkeit von entgegenkommenden Fahrzeugen³⁶. In der gleichen Arbeit wird eine Umfrage unter 64 Personen im Alter von 18 bis 76 Jahren vorgestellt. Abgefragt wurde der Wunsch nach Unterstützung durch verschiedene, denkbare Fahrerassistenzsysteme. Rund 77% der Teilnehmer wünschen sich demzufolge eine Überholassistentenfunktion. Die Zahlen weisen – im Gegensatz zu anderen Assistenzsystemen – nur geringe Sensitivität gegenüber dem Alter der befragten Personen auf³⁷. Eine von CLARKE ET AL. durchgeführte, detaillierte Untersuchung von 410 Überholunfällen in der mittelländischen Grafschaft Nottinghamshire ergab, dass die Mehrzahl der betrachteten Unfälle auf eine fehlerhafte Entscheidung zum Beginn eines Überholmanövers zurückzuführen war³⁸. Ferner wurden als zentrale Unfallursachen falsche Einschätzungen des Überholzeitbedarfs und der Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge identifiziert. Wenn ein generelles Überholverbot aus Gründen der großen Zahl langsamfahrender Fahrzeuge, wie beispielsweise Lastkraftwagen, auf Landstraßen nicht gewünscht ist, lässt die vorliegende Situation eine klare Motivation für ein entsprechendes Assistenzsystem erkennen.

Dies wird auch durch zahlreiche Angaben in der Literatur gestützt, so fasst GROEGER als Ergebnis einer umfangreichen Betrachtung der menschlichen Leistungsfähigkeit beim Autofahren zusammen, dass Entfernungsschätzungen in großer Distanz, wie sie für das Überholen typisch sind, von zahlreichen Einflüssen abhängen und so häufig fehlerhaft sind³⁹. Ebenso verhält es sich mit der Schätzung der eigenen Fahrzeuggeschwindigkeit, die einen wichtigen Parameter bei der Bestimmung des aktuell abrufbaren Beschleunigungsvermögens darstellt, sowie der Schätzung der Position und Geschwindigkeit von Fahrzeugen, die vom Autofahrer beobachtet werden^{40,41}. Zur Bestimmung der Dauer bis zum Eintritt einer Kollision mit einem Gegenverkehrsfahrzeug, also einer sogenannten *time-to-collision* (TTC), muss das Verhältnis aus Distanz und Geschwindigkeit zum Gegenverkehr geschätzt werden. Diese Größe stellt vermutlich die direkte Basis zur subjektiven Bewertung einer Gefahr durch ein herannahendes Fahrzeug dar. Bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit eines solchen Objekts in großer Distanz bedienen sich Fahrer offenbar der Änderung des Raumwinkels des Netzhautbildes mit der Zeit. Hinweise, dass Personen die Rate der Raumwinkel-Änderung zur Bestimmung der Geschwindigkeit beobachteter Fahrzeuge nutzen, wurden schon früh durch eine umfassende Studie von TODOSIEV gefunden. Dieser

³⁵Gray/Regan (2005): *Perceptual Processes* S. 415.

³⁶Lange (2008): *Wirkung von Fahrerassistenz* S. 18.

³⁷Lange (2008): *Wirkung von Fahrerassistenz* S. 97.

³⁸Clarke/Ward/Jones (1998): *Overtaking Accidents* S. 14.

³⁹Groeger (2000): *Understanding Driving* S. 6.

⁴⁰Groeger (2000): *Understanding Driving* S. 17.

⁴¹Groeger (2000): *Understanding Driving* S. 11.

stellte erstmalig einen quantitativen Zusammenhang zwischen Betrachtungsdistanz, Betrachtungsdauer und Mindest-Geschwindigkeit für eine Erkennbarkeit der Bewegungsgeschwindigkeit durch Personen auf. Die Erkennbarkeit der Bewegung eines Fahrzeugs, beispielsweise in einer Distanz von 300 m und einer Betrachtungsdauer von 2 s, würde nach Anwendung der Formeln von TODOSIEV eine Mindestgeschwindigkeit von über 400 km/h erfordern⁴². Obgleich dies nur als Abschätzung gelten kann, da die für einen Überholfall heranzuziehende Distanz über den Grenzen des Geltungsbereiches dieser Zusammenhänge liegt⁴³, werden die Schwierigkeiten deutlich, die die Geschwindigkeitsschätzung weit entfernter Objekte darstellt. HOFFMANN gibt einen Schwellwert für die Änderung des visuellen Winkels an, ab dem Personen die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs innerhalb plausibler Grenzen schätzen können. Dieser liegt bei $0,17\frac{\circ}{s}$, aus einfachen geometrischen Betrachtungen kann daraus abgeleitet werden, dass eine solche Schätzung – bei einer angenommenen Relativgeschwindigkeit von sich entgegenkommenden Fahrzeugen von 180 km/h – erst ab Unterschreitung einer Distanz von ca. 180 m möglich wird. Aus den vorgestellten Zahlen ist ersichtlich, dass Autofahrer offensichtlich nicht in der Lage sind, entgegenkommende Fahrzeuge in großen Distanzen hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit korrekt einzuschätzen.

Zwischenfazit Motivation

Zusammengefasst lässt sich eine klare Motivation für den Einsatz eines Überholassistentensystems als vielversprechender Ansatz zur Senkung der Zahl zu verzeichnender Überholunfälle identifizieren. Besonderer Assistenzbedarf besteht dabei in der Erfassung von Position und Geschwindigkeit der Fahrzeuge, die für eine Bewertung der Gefährlichkeit eines Überholvorgangs relevant sind. Hier weist die menschliche Wahrnehmung offenbar zahlreiche Defizite auf.

1.2 Ziele der Arbeit

Hauptziel der Arbeit sind Untersuchungen zur Realisierbarkeit einer robusten Umfelderkennung als Grundlage für die Implementierung eines Fahrerassistenzsystems für Überholsituationen. Dieses soll eine frühe Warnung des Fahrers vor gefährlichen Überholsituationen ermöglichen. Zentrales Ziel einer solchen Umfelderkennung ist die Erkennung und Bewertung von Überholzielen hinsichtlich einer Eignung zum sicheren Beenden des vom Fahrer eingeleiteten Manövers.

Die Ergebnisse der Arbeit sollen sowohl die prinzipielle Machbarkeit einer validen Umfelderkennung für ein Überholassistentensystem nachweisen als auch dem Entwickler von Fahrerassistenzsystemen eine Richtschnur für die Definition und Implementierung eines derartigen Systems liefern, insbesondere im Bezug auf erforderliche Sensorik und Parametrierung. Konkret liegen die Ziele in der Beantwortung der Forschungsfragen:

- Welche Anforderungen muss ein Sensorik-System erfüllen, um eine Assistenzfunktion in Überholsituationen zu ermöglichen?

⁴²Todosiev (1963): Action point model S. 68.

⁴³Todosiev (1963): Action point model S. 70.

Welche Überholphasen gibt es und an welcher Stelle ist eine Unterstützung durch ein Fahrerassistenzsystem sinnvoll bzw. notwendig?

Welche Sensorreichweiten werden für die vollständige Erfassung von Gegenverkehr und vorausfahrenden Fahrzeugen benötigt, um eine Basis für die Fahrerunterstützung in den jeweiligen Überholphasen zu bieten?

- Können entgegenkommende Fahrzeuge als zentrales Gefahrenelement zuverlässig erkannt werden?

Können entgegenkommende Fahrzeuge ausreichend früh erkannt werden?

Können entgegenkommende Fahrzeuge ausreichend robust und kontinuierlich verfolgt werden?

Können entgegenkommende Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Zugehörigkeit zum vorausliegenden Straßenverlauf zuverlässig klassifiziert werden?

- Welche Parameter sind für die Bewertung von Überholzielen bedeutsam?

Welches Kriterium ist geeignet zur Bewertung der Gefährlichkeit eines Überholmanövers?

Wo liegt ein optimaler Schwellwert für eine Systementscheidung, ob eine Warnung erfolgen soll oder nicht?

1.3 Anwendungsbereich und Grenzen

Der Anwendungsbereich des Assistenzsystems, welches der in dieser Arbeit behandelten Umfelderkennung zugrundegelegt wurde, liegt in der Warnung des Fahrers vor gefährlichen Überholsituationen. Hierbei soll eine Unterstützung nur dort erfolgen, wo Überholmanöver grundsätzlich durchführbar sind, also der erforderliche Überholweg vom Fahrer überblickt werden kann. Dies ist auf Straßen mit keinen oder nur geringen Krümmungen der Fall.

Daraus resultierend wird keine explizite Betrachtung von Sichtbeschränkungen durch infrastrukturelle Gegebenheiten vorgenommen, wie z. B. enge Kurven oder Kuppen. Die Grundlage des vorgeschlagenen Systems ist eine Umfeldsensorik, die diese Beschränkungen prinzipbedingt nicht überwindet. Ebenso soll durch das vorliegende Assistenzkonzept keinesfalls der Anreiz geschaffen werden, in Situationen zu überholen, bei denen der Fahrer die Situation grundsätzlich nicht selbst überblicken kann. Vielmehr sollen Fehleinschätzungen erkannt und sich daraus ergebende Gefahren abgewendet oder gemildert werden.

Als zentraler Anwendungsbereich des vorgeschlagenen Assistenzsystems sollen Landstraßen gelten. Laut OECD gibt es keine international konsistente Definition für den Begriff „Landstraße“⁴⁴. In der Bundesrepublik Deutschland existiert die Bezeichnung „Außerortsstraße“, in Österreich „Freilandstraße“. In Überdeckung mit der Definition dieser Straßentypen wird in dieser Arbeit der Begriff „Landstraße“ für eine Straße außerhalb geschlossener Ortschaften verwendet, die nicht der Kategorie „Autobahn“ zuzuordnen ist und die jeweils einen Fahrstreifen für jede Fahrtrichtung besitzt.

Die Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit beschränken sich auf Zweispurfahrzeuge. Überholmanöver zwischen Fahrzeugen dieser Klasse decken mutmaßlich den Großteil

⁴⁴OECD (1999): Safety Strategies Rural Roads.

aller potentiell gefährlichen Überholsituationen ab, da die Durchführung eines Überholvorgangs bei der Beteiligung von Einspurfahrzeugen zumeist ohne zwingendes Befahren des jeweiligen Gegenverkehrsfahstreifens möglich ist.

1.4 Methodik und Aufbau

In Abbildung 1.4 ist die der Arbeit zugrundeliegende Methodik sowie die Zuordnung der entsprechenden Kapitel aufgestellt. In Abschnitt 1.2 wurden die Ziele der Arbeit

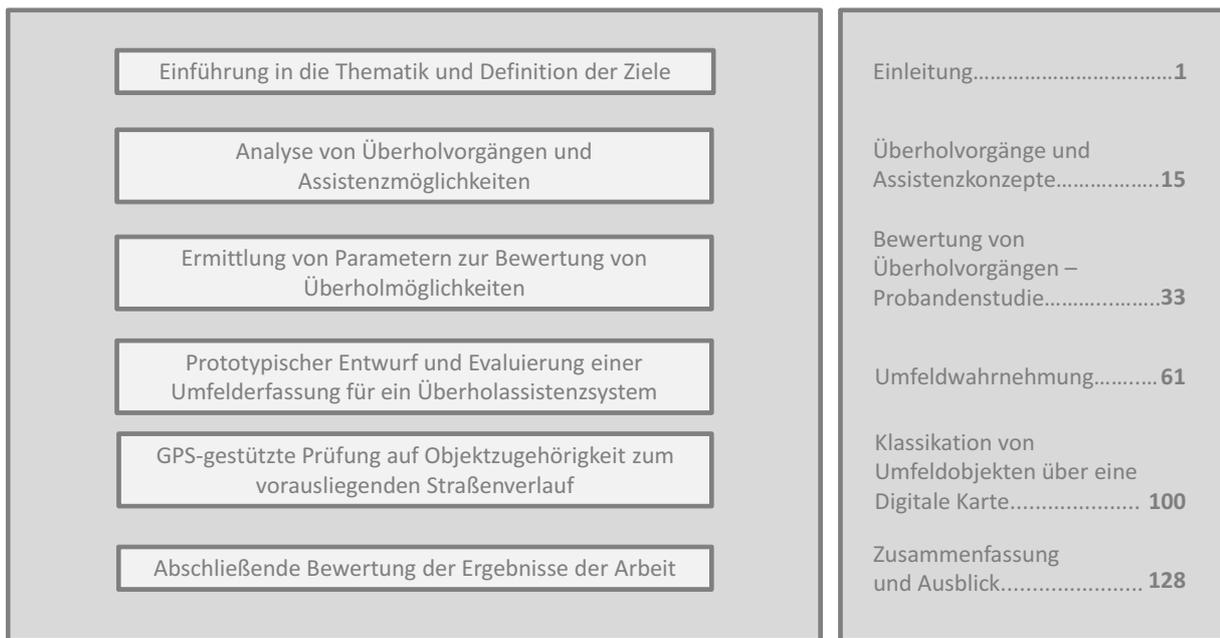


Abbildung 1.4: Methodik und korrespondierende Kapitel der vorliegenden Arbeit

definiert. Um diese zu erreichen, werden nach der Definition der Grundstruktur einer Umfelderkennung deren Funktionselemente in einzelnen Kapiteln näher beleuchtet. Die Inhalte der einzelnen Abschnitte sowie ihre Rolle im Rahmen der Methodik werden im Folgenden kurz vorgestellt:

Die Einleitung (Kapitel 1) bietet eine breite Übersicht über den Themenbereich, die Ziele und den Rahmen der Arbeit. Es wird aufgezeigt, worin die Motivation zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und eines Überholassistentensystems im Speziellen begründet liegt. Es folgt das Ergebnis einer Recherche zum Stand der Technik im Bereich „Assistenzsysteme für Überholsituationen“, aus der Schlüsse hinsichtlich des notwendigen Forschungsbedarfs gezogen werden. Diese erlauben eine Fokussierung der Vorgehensweise bei der Entwicklung einer Umfelderkennung für ein derartiges Fahrerassistenzsystem.

Das Ergebnis der Recherche dient als Basis für die grundlegende Betrachtung von Überholvorgängen in Kapitel 2, hier wird neben einer Klassifikation von Überholmanövern ein sogenanntes *Idealtypisches Überholmanöver* definiert, welches als Maßstab für die weiteren Entwicklungsschritte genutzt wird. Dabei werden auch Eigenschaften und

Besonderheiten der in diesem Konzept verwendeten Fahrzeuge diskutiert. Es wird weiterhin eine analytische Beschreibung der kinematischen Abläufe in einem idealtypischen Überholvorgang dargelegt, die die Berechnung und Simulation des Überholablaufes in Abhängigkeit bestimmter Parameter gestattet. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung der Eigenschaften des Objekts *Überholziel* und der Einführung der Systemarchitektur des zu definierenden umfelderfassenden Systems, welches beispielhaft im Rahmen des Forschungsprojektes PRORETA implementiert wurde.

In Kapitel 3 wird die Durchführung einer umfassenden Probandenstudie beschrieben, deren zentrales Ziel in der Ermittlung eines Schwellwertes liegt, der für die optimale Auslegung eines Überholassistentensystems benötigt wird. Neben der Gesamtmethodik wird die Auswahl und Zusammensetzung des Probandenkollektivs erläutert, ebenso der Aufbau der einzelnen Versuche. Die Ergebnisse der durchgeführten Fahrversuche werden am Ende des Kapitels ausführlich dargestellt und deren Implikationen diskutiert.

Inhalt von Kapitel 4 ist die konkrete Gestaltung einer Umfelderfassung in einer prototypischen, beispielhaften Implementierung. Beginnend mit der quantitativen Analyse benötigter Sensorsichtweiten und deren Abhängigkeiten folgt die kurze Diskussion der Anwendbarkeit auf gekrümmte Straßenverläufe. Die Anforderungen werden mit den Leistungsfähigkeiten marktverfügbarer Umfeldsensoren im Automobilbereich verglichen, bevor Implementierungsdetails der in dieser Arbeit verwendeten Objektverfolgung vorgestellt werden. Die Evaluation des implementierten Systems geschieht durch die Definition verschiedener Forschungshypothesen, der Definition jeweiliger Worst-Case-Szenarien und der Darstellung der hierzu durchgeführten Fahrversuche. Zu jeder Hypothese wird das Ergebnis der entsprechenden Experimente ausführlich erläutert.

Kapitel 5 beschreibt die Klassifikation von erkannten Objekten hinsichtlich ihrer Zugehörigkeit zum vorausliegenden Straßenverlauf. Nach der Darstellung bisheriger Arbeiten und der Einordnung dieser Klassifikation in die Grundstruktur der Umfelderfassung wird ein Algorithmus vorgeschlagen, der diese Klassifikation auf Basis eines GPS-Empfangsgerätes und einer marktüblichen digitalen Karte durchführt. Zu dessen Evaluation werden Hypothesen definiert, deren Gültigkeit in Fahrversuchen mit Worst-Case-Charakter geprüft wird. Das Kapitel schließt mit einer Ergebnisdarstellung der durchgeführten Experimente.

Kapitel 6 fasst die Kernaussagen der Arbeit zusammen und enthält das Fazit zum Ergebnis der Arbeit. Davon ausgehend, wird ein Ausblick zu Feldern mit weiterem Forschungsbedarf gegeben.

1.5 Stand der Forschung

An dieser Stelle werden aus der Literatur bekannte Assistenzkonzepte und Funktionsentwicklungen für Teilbereiche des Überholvorgangs vorgestellt. Die detaillierte Diskussion zu Literatur mit Bezug auf Fahrerverhalten wird am Beginn des Kapitels 3 dargestellt.

Trotz des hohen Risikos, das beim Überholen besteht, ist lediglich eine geringe Zahl von

Forschungsansätzen bekannt, die sich mit fahrerunterstützenden Funktionen für dieses Fahrmanöver befassen.

Es existieren verschiedene Fahrerassistenzsysteme in Serienfahrzeugen, die den Bereich von Überholmanövern tangieren, diese sollen den Fahrer beim Teilmanöver *Ausscheren* im Rahmen des Überholbeginns unterstützen: Durch die Erfassung von Objekten, die den Bereich neben und hinter dem eigenen Fahrzeug überwachen, können Objekte erkannt werden, die sich zu diesem Zeitpunkt im Toten Winkel befinden. Eine weitere Situation, in der eine Fahrerwarnung oftmals sinnvoll ist, ist die rasche, rückwärtige Annäherung eines bereits überholenden Fahrzeugs. Systeme wie „side assist“ des Automobilherstellers Audi⁴⁵ oder das als BLIS (Blind Spot Information System) bezeichnete System von Volvo⁴⁶ erkennen eine solche Situation durch Nahbereichs-Radarsensorik bzw. mittels Video-Kameras mit entsprechender Bildverarbeitung und warnen den Fahrer vor diesen kritischen Situationen. Derartige Systeme sind im ISO-Standard 17387 beschrieben⁴⁷. SAKURAI ET AL. (2006) und BLANC ET AL. (2007) können als Beispiele für die stete Weiterentwicklung der hierbei genutzten Algorithmen betrachtet werden.

Der Automobilhersteller BMW hat im Jahr 2006 ein Assistenzsystem im Forschungsstadium vorgestellt, welches Informationen aus digitalen Karten dazu verwendet, Überholmöglichkeiten der aktuell befahrenen Strecke zu bewerten⁴⁸. Dieses Überholassistenzsystem – als „Dynamic Pass Predictor“ bezeichnet – informiert den Fahrer über die prinzipielle Eignung des vorausliegenden Streckenprofils für ein Überholmanöver. Hierbei dient die eingesetzte digitale Karte als Haupt-Informationsquelle. Abbildung 1.5 zeigt das HMI des Prototypen: Auf dem Zusatz-Display auf der rechten Seite des Armaturenbrettes wird der vorausliegende Straßenverlauf schematisch als Balken angezeigt. Ist ein Streckenabschnitt nicht zum Überholen geeignet, so wird er – wie in der gezeigten Situation der Fall – rot markiert, andernfalls in weiß. Die Position des eigenen Fahrzeugs auf der Karte wird unter Verwendung eines GPS-Empfängers bestimmt. Durch einen Algorithmus wird der Streckenverlauf ermittelt, den das Fahrzeug mit der höchsten Wahrscheinlichkeit fahren wird. Ergänzt durch Sensordaten über das eigene Fahrzeug, wie beispielsweise Geschwindigkeit oder Längsbeschleunigung, wird entschieden, ob beispielsweise die Sichtweite bis zur nächsten Kurve ausreicht, um die zum Überholen notwendige Strecke zu überblicken. Das System berücksichtigt jedoch keinen entgegenkommenden Verkehr, es findet also keine Verknüpfung von Umfelddaten aus einer Objektverfolgung mit den Informationen der digitalen Karte statt. Daher erhält der Fahrer von diesem Überholassistenten keine vollständige Unterstützung bei der Einschätzung der Gefährlichkeit der aktuellen Überholsituation.

KRETSCHMER ET AL. beschreibt ein Assistenzkonzept, welches in der Lage ist, die Fahrerabsicht „Überholen“ zu erkennen⁵⁰. Aus verschiedenen Datenquellen wie Lenkwinkel oder Längsbeschleunigung sowie Informationen des ACC-Systems ist dabei neben der

⁴⁵Popken (2006): Audi Q7 side assist S. 48.

⁴⁶Eidehall (2007): Threat Assessment S. 10.

⁴⁷ISO (2008): ISO 17387: Lane change decision aid systems.

⁴⁸Löwenau et al. (2006): Dynamic Pass Prediction.

⁴⁹Löwenau et al. (2006): Dynamic Pass Prediction.

⁵⁰Kretschmer et al. (2006): Erkennung und Prädiktion des Fahrerverhaltens.



Abbildung 1.5: HMI des „Dynamic Pass Predictor“ von BMW. Ein Zusatzdisplay auf der rechten Seite des Armaturenbretts visualisiert dem Fahrer Informationen über potentielle Überholmöglichkeiten auf kurvigen Landstraßen (Quelle: Löwenau⁴⁹).

Erkennung des Beginns auch eine Schätzung der Überholdauer möglich. Dies ist zu einem Manöverzeitpunkt durchführbar, in dem sich das Fahrzeug noch in einer unkritischen Situation befindet, weshalb eine rechtzeitige Warnung des Fahrers prinzipiell noch darstellbar ist. Es wird diskutiert, dass für eine robuste Entscheidung für eine Fahrerwarnung eine Detektion von Gegenverkehr in Distanzen von weit über 200 m notwendig ist. Mit dem Verweis auf Maximalreichweiten marktverfügbarer Sensoren mit Werten von höchstens 200 m resümiert der Autor, dass eine Überholassistentenfunktion in der gewünschten Form nicht vollständig realisierbar ist.

Eine weitere Methode zur Erkennung der Fahrerabsicht beim Überholen wurde von BLASCHKE ET AL. entwickelt⁵¹. Auf Basis von Eingangsdaten wie Bremsdruck, Fahrpedalstellung und -geschwindigkeit, Abstand zu einer Kreuzung und Informationen des ACC-Systems wird durch einen Fuzzylogik-Ansatz die Erkennung der drei Fahrerabsichten „Abbiegen“, „Straße folgen“ und „Überholen“ erreicht. Dies gelingt in einer normalen Fahrsituation mit einer Erfolgsquote von 93 % für die Weiterführung der Fahrfahrt, zu 95 % beim Überholen und zu 92 % bei der Erkennung der Abbiegeabsicht.

Die Entwicklung eines Überholautomaten zur Fahrerüberwachung wird von AHLE ET AL. beschrieben⁵². Hierfür wird ein sogenanntes Situations-Operator-Modell verwendet, welches Änderungen in der realen Fahrsituation als Folgen von Szenen und Aktionen

⁵¹Blaschke/Schmitt/Färber (2007): Fahrmanöverprädiktion S. 165.

⁵²Ahle/Söffker (2005): Überwachungsautomat S. 53.

beschreibt. Auf den Überholvorgang angewandt, wird so zu jedem Zeitpunkt überprüft, ob die vom Fahrer ausgeführten Handlungen konform zu der Ausgabe des Modells sind. Ist dies nicht der Fall, wie beispielsweise bei einer Betätigung des Blinkers zu einem Zeitpunkt, an dem dies nicht vorgesehen ist, so erhält der Fahrer eine Warnung.

1.5.1 Fazit

Obschon Gegenverkehr in Überholssituationen durch typischerweise hohe Relativgeschwindigkeiten eine zentrale Rolle bei der Bewertung des Gefährdungspotentials spielt, existieren im Bereich der praktischen Forschung zu Fahrerassistenzsystemen bislang keine Ansätze für ein umfelderfassendes Überholassistentensystem mit expliziter Berücksichtigung entgegenkommender Fahrzeuge. In einigen Arbeiten wird hierzu lediglich knapp auf die Beschränkungen marktüblicher Sensorik verwiesen. So kommt HEGEMAN in ihrer Analyse hinsichtlich bestehenden Forschungsbedarfs zu der Schlussfolgerung⁵³:

„...Taking all the possibilities of existing assistance systems together, the only main subtask of overtaking not yet covered is the judgement of the available gap before the first oncoming vehicle arrives. This subtask of overtaking is assumed to be the most difficult, since distances are large and speeds are high. These two reasons have led to the conclusion that an overtaking assistant that provides support with finding suitable overtaking gaps in the opposing traffic stream is the most interesting.“

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Behebung des hier dargestellten Defizits.

⁵³Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 33.

2 Überholvorgänge und Assistenzkonzepte

2.1 Definition und Klassifizierung von Überholvorgängen

In der Literatur finden sich nur wenige Definitionen des Begriffs *Überholen*. Ein Überholvorgang wird von NETZER wie folgt beschrieben¹:

„Eine Überholung liegt dann vor, wenn ein Verkehrsteilnehmer einen auf der gleichen Spur und in der gleichen Richtung sich bewegenden langsameren Verkehrsteilnehmer einholt, bei Erreichen des Ausbiegeabstandes durch einen S-Bogen eine seitliche Versetzung ausführt, um zu Überholenden auf der links von der ursprünglichen Spur befindlichen Parallelspur vorbeifährt und nach einem zweiten S-Bogen wieder auf die ursprüngliche Spur zurückkehrt.“

Eine Definition in vergleichbarem Detaillierungsgrad wird von HEGEMAN verwendet²:

„An overtaking manoeuvre is defined [...] by moving of the subject vehicle to another lane, passing of at least one (slower) preceding vehicle and moving back to the lane where the manoeuvre started.“

Wenn von der Wahl des umgangssprachlichen Begriffs „Spur“ anstelle der korrekten Bezeichnung „Fahrstreifen“ abgesehen wird, überdecken sich diese Beschreibungen nahezu vollständig, daher werden beide als gültige Definition der weiteren Betrachtung von Überholvorgängen in dieser Arbeit zugrundegelegt. Zusätzlich zu dieser Basisdefinition werden bei der globalen Einordnung von Überholvorgängen von NETZER weiterhin sogenannte *Überholungstypen* unterschieden³:

1. **Einfachüberholungen:**

Ein Fahrzeug überholt ein anderes Fahrzeug

2. **Mehrfachüberholungen:**

Ein Fahrzeug überholt mehrere Fahrzeuge

Mehrere Fahrzeuge überholen ein Fahrzeug

Mehrere Fahrzeuge überholen mehrere Fahrzeuge

¹Netzer (1966): Überholvorgang auf Landstraßen S. 4.

²Hegeman/Hoogendoorn/Brookhuis (2005): Overtaking Bi-directional Roads S. 15.

³Netzer (1966): Überholvorgang auf Landstraßen S. 4.

3. Doppelüberholungen:

Ein Fahrzeug überholt ein überholendes Fahrzeug

Ein Fahrzeug überholt mehrere überholende Fahrzeuge

Mehrere Fahrzeuge überholen ein überholendes Fahrzeug

Mehrere Fahrzeuge überholen mehrere überholende Fahrzeuge

Situationen, die der letztgenannten Gruppe zuzuordnen sind, sollten auf zweistreifigen Straßen mit Zweispurfahrzeugen kaum vorkommen, daher werden diese in den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt. Hinsichtlich der Kinematik des Überholenden kann nach STEIERWALD eine weitere Einteilung vorgenommen werden, diese Kategorisierung wird als *Überholart* bezeichnet⁴:

1. Die **fliegende** Überholung: Es sind zwei Fahrzeuge beteiligt, beide fahren mit konstanten, aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Zu Beginn des Manövers befindet sich das Langsamere vor dem Schnelleren, so dass das vordere Fahrzeug im weiteren Verlauf überholt wird.
2. Die **beschleunigte** oder **kritische** Überholung: Hier ist die Ausgangsgeschwindigkeit der beiden beteiligten Fahrzeuge zu Beginn identisch, entspricht also beispielsweise einer stationären Fahrgeschwindigkeit. Der Überholer beginnt nun mit dem Manöver durch eine Beschleunigung, während das Vorderfahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit weiterfährt und somit im zeitlichen Verlauf überholt wird.

In Abbildung 2.1 findet sich eine Darstellung der aufgeführten Fälle. Abbildung 2.2 zeigt qualitativ den Bewegungsablauf der beteiligten Fahrzeuge bei einer Einfachüberholung in einem Diagramm. Aufgetragen ist die Longitudinalposition der Fahrzeuge auf der Straße über der Zeit.

2.2 Der idealtypische Überholvorgang

Zur Beantwortung der Forschungsfragen aus Kapitel 1 ist die Kenntnis über den quantitativen Ablauf eines Überholvorgangs hinsichtlich der zugrundeliegenden Kinematik notwendig: Dies wird in dieser Arbeit als *Überholmodell* bezeichnet. Als Basis hierzu dient die Betrachtung eines sogenannten *Idealtypischen Überholvorgangs*, der alle relevanten Parameter enthält.

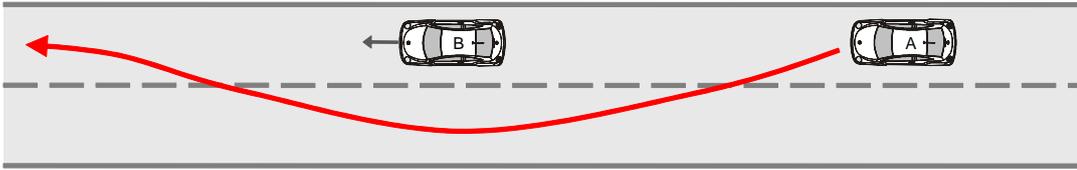
Vernachlässigung der Querdynamik

Dieses Modell soll nur das longitudinale Verhalten der beteiligten Fahrzeuge entlang der Fahrbahn abbilden, die Querdynamik wird dabei vernachlässigt. Die Rechtfertigung dieser Annahme ergibt sich durch folgende Abschätzungen: Als idealisiertes Modell für die kombinierte Belastung von Fahrzeugreifen wird häufig der Kamm'sche Kreis verwendet, der die maximal übertragbaren Kräfte in Längs- und Querrichtung in gegenseitiger Abhängigkeit repräsentiert⁵. Es wird angenommen, dass die größte Reifenbelastung in Querrichtung

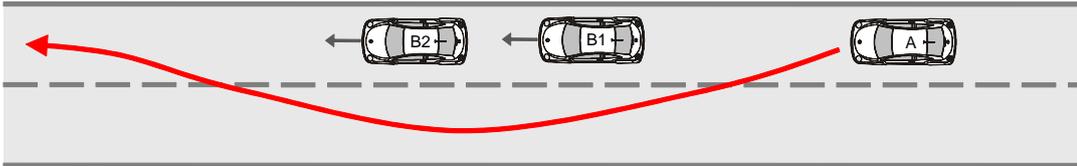
⁴Steierwald (1963): Übersichtweite.

⁵Breuer/Bill (2003): Bremsenhandbuch S. 59.

1) Einfachüberholungen



2) Mehrfachüberholungen



3) Doppelüberholungen

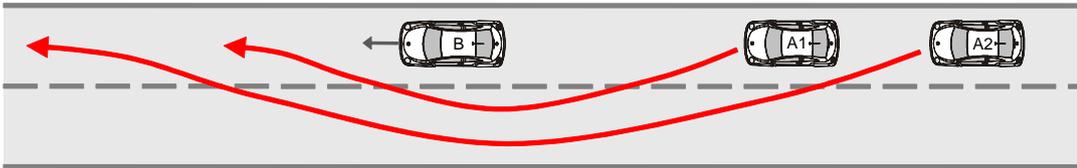


Abbildung 2.1: Überholtypen. Überholer sind mit dem Buchstaben „A“ gekennzeichnet, der zu Überholende mit „B“. Die die Kennzeichnung begleitende Zahl stellt im Falle mehrfach vorkommender Fahrzeuge in einer Richtung den entsprechenden Index dar.

während eines Überholvorgangs bei Durchführung eines schnellen Fahrstreifenwechsels auftritt. In SCHIMMELPFENNIG ET AL.⁶ findet sich als Anhaltswert hierzu das Ergebnis einer Untersuchung von auftretenden Querbeschleunigungen bei Fahrstreifenwechselmanövern, die von Probanden ausgeführt wurden. Alle Versuchspersonen mit der Aufgabe, einen „scharfen“ Wechsel zu fahren, erreichten dabei immer Werte unterhalb der Schranke von $a_{quer} = 2,2 \frac{m}{s^2}$. Ein typischer Wert für den maximalen Reibungskoeffizienten liegt bei

$$\mu \approx 1 \quad (2.1)$$

bei trockener Straße⁷. Aus diesem Wert resultiert die Ausdehnung des Kamm ´schen Kreises auf einen Radius von

$$a_{max} \approx 10 \frac{m}{s^2}. \quad (2.2)$$

Bei einer maximalen Querbelastung von

$$a_{quer} = 2,2 \frac{m}{s^2} \quad (2.3)$$

während eines dynamisch gefahrenen Fahrstreifenwechsels (FSW) kann aus dem Kamm ´schen Kreis das verbleibende Kraftschlusspotential in Fahrzeuginnenrichtung ermittelt werden, das für Brems- und Beschleunigungsvorgänge verfügbar bleibt, Abbildung 2.3

⁶Schimmelpfennig/Nackenhorst (1985): Unfallrekonstruktion S. 96.

⁷Breuer/Bill (2003): Bremsenhandbuch S. 21.

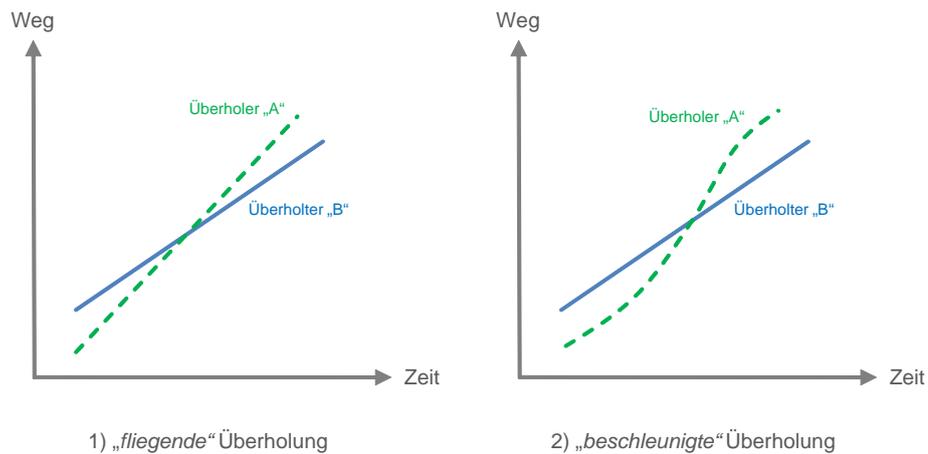


Abbildung 2.2: Überholarten. Fahrzeug „A“ (Überholer) fährt beim „fliegenden“ Überholen mit konstanter Geschwindigkeit, die jedoch über der Geschwindigkeit von Fahrzeug „B“ (Überholter) liegt. Beim „beschleunigten“ Überholen hingegen führt Fahrzeug „A“ während des Überholvorgangs eine Beschleunigung aus.

zeigt die Situation. Es ergibt sich ein Wert von

$$a_{\text{laengs}/FSW} = 9,8 \frac{m}{s^2}. \quad (2.4)$$

Die zeitgleiche Querbewegung vermindert die für Längsmanöver verfügbare, maximal mögliche Beschleunigung also lediglich um etwa 2%. Aufgrund dieses geringen Wertes werden Querbewegungen im Überholmodell vernachlässigt.

Mehrfach- und Doppelüberholungen

Im Abschnitt 2.1 wurden Kategorien beschrieben, in die sich Überholvorgänge einordnen lassen. Hier sind zwei Kriterien relevant, zum einen die Zahl der direkt beteiligten Fahrzeuge, zum anderen das kinematische Verhalten des überholenden Fahrzeugs. Betreffend der Zahl der beteiligten Fahrzeuge zeigen empirische Untersuchungen, dass die Einfachüberholung den weitaus häufigsten Überholtyp darstellt⁸. Aus diesem Grund wird dieser Typ als Ausgangspunkt für die Erstellung eines Überholmodells gewählt. Aus Sicht des Überholers bleiben hierdurch zwei Situationen unberücksichtigt:

- Mehrfachüberholung mit **mehreren überholten** Fahrzeugen: Der Überholer überholt mindestens zwei Fahrzeuge ohne ein erneutes Einscheren auf den eigenen Fahrstreifen. Um diesen Fall im Überholmodell adäquat abzubilden, kann durch die Einführung einer variablen Länge des zu überholenden Fahrzeugs ein *virtuelles Fahrzeug* eingeführt werden, welches dem Überholen mehrerer Fahrzeuge entspricht. Abbildung 2.4 verdeutlicht die Situation: Die beiden Fahrzeuge „B1“ und „B2“ werden jetzt als ein einziges, langes Fahrzeug definiert, welches jetzt als zu Überholendes angenommen werden kann. Für eine größere Zahl von zu überholenden Fahrzeugen kann analog vorgegangen werden. Durch diese variable Länge des zu überholenden

⁸Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 26.

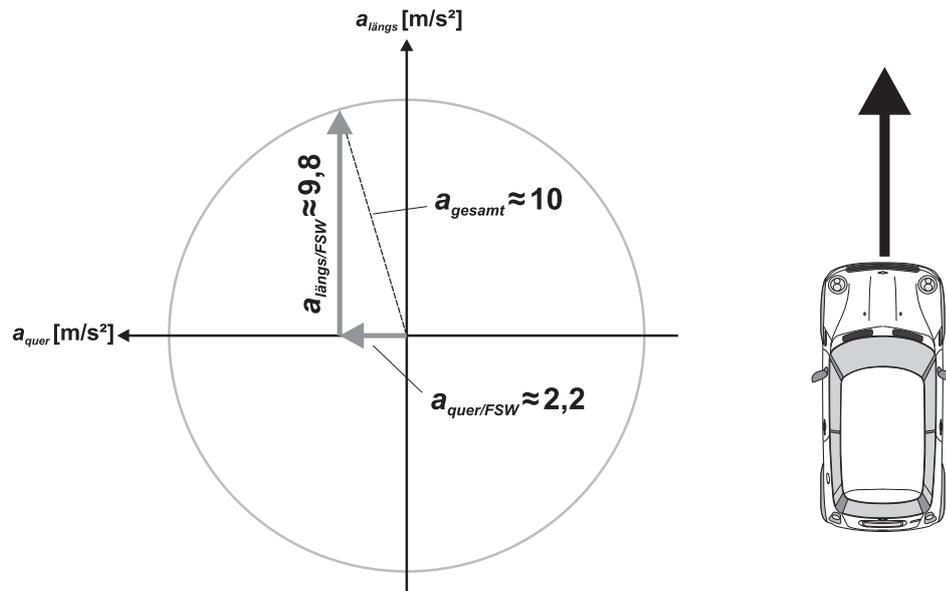


Abbildung 2.3: Mit der Modellierung der durch den Reifen übertragbaren Längs- und Querkräfte ergibt sich bei einer typischen Querbeschleunigung bei einem dynamischen Fahrstreifenwechsel eine Reduktion der in Längsrichtung verfügbaren Maximalbeschleunigung von etwa 2 % (FSW:Fahrstreifenwechsel).

Objekts kann daher das Überholmodell für eine Einfachüberholung auch auf eine Mehrfachüberholung angewandt werden.

- Mehrfachüberholung mit **mehreren Überholern**: Der Überholer überholt gemeinsam mit einem anderen Fahrzeug in direkter Folge ein anderes Fahrzeug. Aus der Sicht des Überholers gibt es zwei mögliche Situationen:

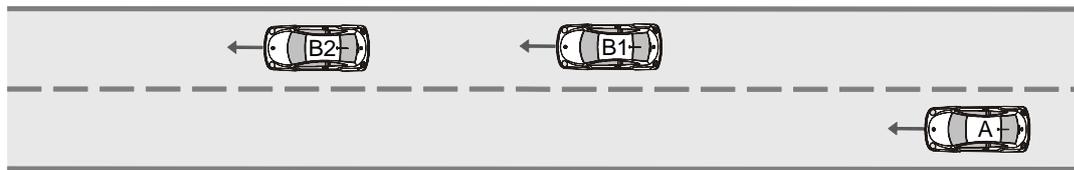
Das EGO-Fahrzeug ist das Vordere der überholenden Fahrzeuge: Hier muss die Situation nicht von der einer Einfachüberholung unterschieden werden. Die Doppelüberholung bleibt ohne Auswirkung und braucht nicht berücksichtigt zu werden.

Das EGO-Fahrzeug ist das Hintere der überholenden Fahrzeuge: In diesem Fall ist das Verhalten des Fahrers des vorderen überholenden Fahrzeugs entscheidend, beispielsweise die Frage, welches Überholziel von mehreren Vorhandenen gewählt wird, und welches dann nach dessen Einscheren nicht mehr verfügbar sein wird. Dieses intentionsabhängige Verhalten kann durch das zu erstellende Modell nicht abgebildet werden. Daher wird dieser Sonderfall nicht berücksichtigt, es ist jedoch wünschenswert, dass eine Umfeldsensorik diesen Fall erkennen kann. Der Fall „Zwei Fahrzeuge überholen mehrere Fahrzeuge“ muss an dieser Stelle nicht mehr berücksichtigt werden, da durch den vorigen Punkt „*Virtuelles Fahrzeug*“ eine Vorgehensweise geschaffen wurde, wie Mehrfachüberholungen auf Einfachüberholungen zurückgeführt werden können.

Beteiligte Fahrzeuge

Aus der Definition von Überholvorgängen (Abschnitt 2.1) ergibt sich unmittelbar die Notwendigkeit der Existenz des Akteurs *Überholer*, der in allen weiteren Betrachtungen als

a) Ausgangssituation: Mehrfachüberholung



b) Einfachüberholung durch „*Virtuelles Fahrzeug*“



Abbildung 2.4: Um Mehrfachüberholung und Einfachüberholung auf ein einziges Überholmodell abzubilden, wird die variable Fahrzeuglänge genutzt: Durch Einführung eines *virtuellen Fahrzeugs* werden die beiden Realfahrzeuge „B1“ und „B2“ zum virtuellen Fahrzeug „B“ zusammengefügt.

Fahrzeug „A“ oder als EGO-Fahrzeug bezeichnet wird. Die zu überholenden Fahrzeuge – nachfolgend werden diese als Fahrzeuge „Bi“ mit „i“ als Index bezeichnet – können, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, immer als ein einzelnes Fahrzeug einer bestimmten Länge modelliert werden. Damit im Rahmen eines Überholmanövers eine Gefährdung berücksichtigt werden kann, wird ebenfalls ein Gegenverkehrsfahrzeug modelliert, welches die zum Überholen verfügbare Zeit beschränkt. Es ist also ein weiteres Fahrzeug zum Modell hinzuzufügen: Das *Entgegenkommende*. Das Überholmodell besteht somit aus insgesamt drei Fahrzeugen. Beim modellierten Manöver überholt Fahrzeug „A“ Fahrzeug „B“, während Fahrzeug „C“ den beiden entgegenfährt. Die Situation ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Bei Berücksichtigung von mehr als einem Gegenverkehrsfahrzeug ist weiterhin die in Ab-

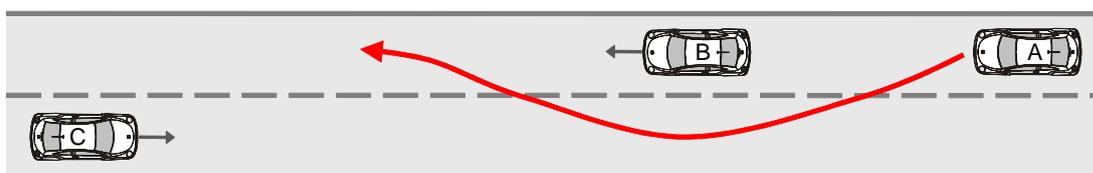


Abbildung 2.5: Das Szenario des *Idealtypischen Überholvorgangs* kombiniert die Kinematik von drei Fahrzeugen: Fahrzeug „A“ überholt Fahrzeug „B“, während Fahrzeug „C“ den Beiden entgegenkommt.

Abbildung 2.6 gezeigte Situation denkbar: Während das im Überholmodell als Fahrzeug „A“ bezeichnete Fahrzeug den Überholvorgang beginnt, überholt ein weiteres Fahrzeug „C2“ das ursprünglich als Gegenverkehr definierte Fahrzeug „C1“. Diese Situation kann im definierten Modell insofern berücksichtigt werden, dass ein Prädiktionsalgorithmus die Bewegung beider Gegenverkehrsfahrzeuge im Überholverlauf so vorausberechnet, dass eine Entscheidung getroffen werden kann, welches der beiden Entgegenkommenden zum Überhol-Ende



Abbildung 2.6: Überholmanöver zwischen Gegenverkehrsfahrzeugen.

den zur Verfügung stehenden Überholweg stärker einschränkt, d. h. sich zu diesem Zeitpunkt näher an Fahrzeug „A“ befindet und somit das gefährlichere Gegenverkehrselement darstellt. In diesem Fall genügt dessen Berücksichtigung als alleinigen Gegenverkehr.

Parameter des Überholmodells

Um ein quantitativ nutzbares Überholmodell zu erhalten, müssen diesem verschiedene Parameter zugewiesen werden, die den zeitlichen Ablauf des Manövers bestimmen. Hierbei lassen sich zwei Gruppen unterscheiden, die im Folgenden beschrieben werden:

Eigenschaften der beteiligten Fahrzeuge

Für jedes beteiligte Fahrzeug wird der Überholablauf in Längsrichtung beschrieben. Dabei sind potentielle Kandidaten die Bewegungsgrößen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung bzw. deren Verlauf über der Zeit, außerdem die Länge der Fahrzeuge. Die Skizze in Abbildung 2.7 zeigt alle im Überholmodell berücksichtigten Fahrzeuge und die zugeordneten Parameter:

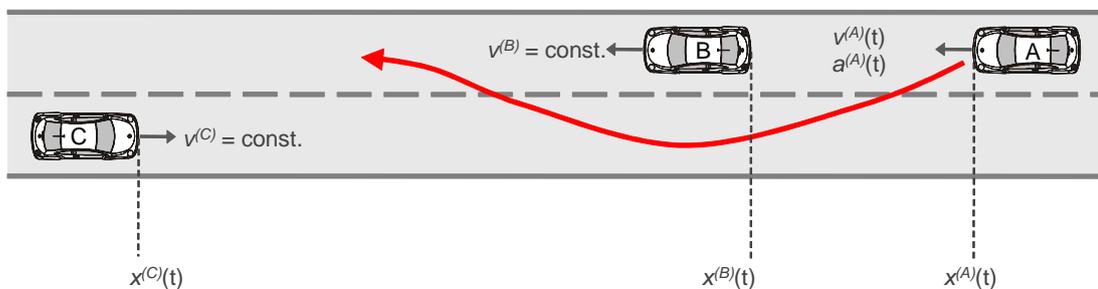


Abbildung 2.7: Die an einem Idealtypischen Überholmanöver beteiligten Fahrzeuge „A“, „B“ und „C“ und deren Parameter.

Überholer „A“: Der Überholer „A“ wird während des Manövers potentiell seine Geschwindigkeit erhöhen, hier sind daher alle Positions-, bzw. Bewegungsgrößen $x^{(A)}(t)$, $v^{(A)}(t)$ und $a^{(A)}(t)$ zu berücksichtigen. Zur Bestimmung der möglichen Einscher- und Ausscherzeitpunkte ist außerdem die Fahrzeuglänge $l^{(A)}$ zu modellieren. Die Fahrzeugposition $x^{(A)}$ wird für die Vorderkante des Überholers angegeben.

Überholter „B“: Im Modell wird das Fahrzeug „B“ überholt, hierbei ist dessen Länge $l^{(B)}$ von Bedeutung. Insbesondere gilt dies für alle Fälle in denen ein *Virtuelles Fahrzeug* aus

Tabelle 2.1: Fahrzeuge und zugeordnete Parameter im Überholmodell.

Bezeichnung	Beschreibung	Parameter und Variablen
A	EGO-Fahrzeug	$l^{(A)}$ $x^{(A)}(t)$ $v^{(A)}(t)$ $a^{(A)}(t)$
B	Überholer	$l^{(B)}(t)$ $x^{(B)}(t)$ $v^{(B)}$
C	Gegenverkehr	$x^{(C)}(t)$ $v^{(C)}$

mehreren Einzelfahrzeugen kombiniert wird, also bei $v^{(B1)} \neq v^{(B2)}$; in diesem Fall gilt $l^{(B)}(t)$. Neben den wichtigen Bewegungsgrößen Geschwindigkeit $v^{(B)}$ und Position der Hinterkante in Längsrichtung der Fahrbahn $x^{(B)}(t)$, wird die Beschleunigung dieses Überholbeteiligten gemäß $a^{(B)} = 0$ vernachlässigt. Dies wird mit der Annahme begründet, dass einem Fahrzeug, welches gerade überholt wird, kein Anlass für einen Beschleunigungsvorgang zugeordnet werden kann. Darüberhinaus ist ein solches Verhalten rechtlich verbindlich⁹.

Entgegenkommender „C“: Für den Entgegenkommenden „C“ wird die Modellierung der Geschwindigkeit $v^{(C)}$ und der Position $x^{(C)}$ zur Bestimmung der zum Überholen verfügbaren Zeit benötigt. Die Beschleunigung wird mit $a^{(C)} = 0$ vernachlässigt, da davon ausgegangen werden kann, dass ein Fahrzeugführer, der den Überholvorgang vor sich erkennt, keinen Beschleunigungsvorgang ausführt. Die Position $x^{(C)}$ bezieht sich auf die Vorderkante des Fahrzeugs „C“, da dies aus der Sicht des Überholers „A“ als Parameter für den Ort des herannahenden Gegenverkehrs ausreichend ist. Aus dem gleichen Grund kann auch eine Berücksichtigung der Länge des Gegenverkehrsfahrzeugs entfallen. Als gemeinsame Referenz für die Angabe der Fahrzeugpositionen wird die Startposition des Überholers $x^{(A)}(0) \stackrel{!}{=} 0$ angenommen, der Zeitpunkt $t = 0$ markiert dabei lediglich den Ausgangspunkt einer konkreten Berechnung und kann – eine entsprechende Anpassung der übrigen Parameter vorausgesetzt – frei gewählt werden, typisch ist der Zeitpunkt des Überholbeginns von Fahrzeug „A“.

Alle Fahrzeuge des Überholmodells mit den entsprechenden Parametern sind in der Übersicht in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Abstände

Als Ergebnis der Anwendung des Überholmodells sind neben den Fahrzeugpositionen hauptsächlich die auf deren Basis ermittelten Abstände der beteiligten Fahrzeuge relevant. Diese tragen in den folgenden Betrachtungen die Bezeichnungen aus Abbildung 2.8. Da die Positionen der Fahrzeuge zeitlich variabel sind, gilt dies ebenso für die Abstände.

⁹Anhang H: StVO §5.

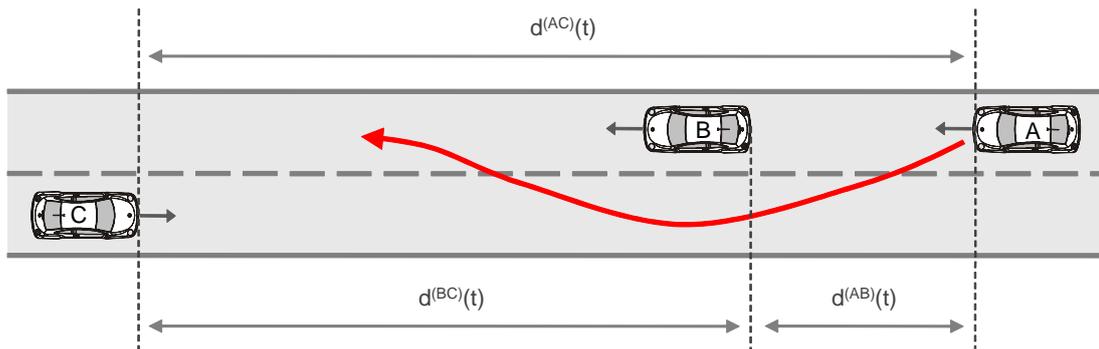


Abbildung 2.8: Bezeichnungen der Abstände zwischen den Fahrzeugen im Überholmodell.

2.2.1 Modellierung des Beschleunigungsverlaufs

Bereits in der Beschreibung des *Idealtypischen Überholvorgangs* wurden einige Vereinfachungen vollzogen, die eine Einschränkung des allgemeinen Falls darstellen. So wurde angenommen, dass weder das überholte Fahrzeug „B“, noch das entgegenkommende Fahrzeug „C“ ihre Geschwindigkeit ändern, sie zeigen also keine beschleunigte Bewegung. Im Unterschied dazu, weist der Überholer „A“ typischerweise eine Beschleunigung $a^{(A)} \neq 0$ auf. Der folgende Abschnitt beschreibt die Modellierung dieser Bewegung mit dem Ziel einer größtmöglichen Repräsentativität für den realen Überholfall.

Konstante Beschleunigungsleistung

Die Mehrzahl aller im öffentlichen Straßenverkehr anzutreffenden Fahrzeuge besitzt einen Antrieb mit einem Verbrennungsmotor und einem Stufengetriebe. Aus dieser Kombination resultiert ein Verlauf, der näherungsweise dem einer konstanten Antriebsleistung entspricht, sofern von Zugkraftlücken abgesehen wird¹⁰. Das Beschleunigungsverhalten eines solchen Fahrzeugs kann somit in einer einfachen Näherung als „Beschleunigung mit konstanter Antriebsleistung“ betrachtet werden¹¹. Das dieser Arbeit zugrundeliegende Überholassistenzsystem soll in erster Linie die prinzipielle Möglichkeit bewerten, ob ein Überholen bei Abruf maximal verfügbarer Beschleunigung durchführbar ist. Hierbei wird unterstellt, dass die genutzte Getriebestufe während der Beschleunigung immer so gewählt wird, dass dem Motor die höchstmögliche Ausgangsleistung entnommen werden kann. Aus dem Ansatz einer konstant verfügbaren Nettogleistung P_{netto} , die der tatsächlich zur Fahrzeugbeschleunigung nutzbaren Leistung unter der Annahme konstanter Fahrwiderstände entspricht, ergibt sich aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltung) der Ansatz

$$E_{\text{kin}}(t) = E_{\text{kin}}(t_0) + P_{\text{netto}}t. \quad (2.5)$$

Mit der Formel für die kinetische Energie $E_{\text{kin}} = \frac{m}{2}v^2$ folgt

$$\frac{m}{2}v(t)^2 = \frac{m}{2}v_0^2 + P_{\text{netto}}t. \quad (2.6)$$

¹⁰Braess/Seiffert (2007): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik S. 261.

¹¹Donges (2003): Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht 4/56 [2003] S. 211.

Diese Gleichung, die jetzt das eindimensionale Bewegungssystem vollständig beschreibt, kann nach der Geschwindigkeit $v(t)$ aufgelöst werden:

$$v(t) = \sqrt{v_0^2 + 2 \frac{P_{\text{netto}}}{m} t}. \quad (2.7)$$

Hieraus folgt durch Integration die Stammfunktion. Für die Anfangsbedingung $x^{(A)}(0) = 0$ ergibt sich die zurückgelegte Distanz somit als bestimmtes Integral zu:

$$\begin{aligned} \int_0^t v(\tau) \, d\tau &= \int_0^t \sqrt{v_0^2 + 2 \frac{P_{\text{netto}}}{m} \tau} \, d\tau \\ &= \left[\frac{m}{3P_{\text{netto}}} \left(v_0^2 + 2 \frac{P_{\text{netto}}}{m} \tau \right)^{\frac{3}{2}} \right]_0^t \\ &= \frac{m}{3P_{\text{netto}}} \left(\left(v_0^2 + 2 \frac{P_{\text{netto}}}{m} t \right)^{\frac{3}{2}} - v_0^3 \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Mit den dargestellten Zusammenhängen kann also eine Bestimmung aller für den Beschleunigungsvorgang bedeutsamen Größen durchgeführt werden, vorausgesetzt die für das Beschleunigen verfügbare Netto-Antriebsleistung P_{netto} ist bekannt.

Vergleich mit realen Beschleunigungsvorgängen

Um abzuschätzen, welche Präzision der Ansatz einer konstanten Beschleunigungsleistung ermöglicht, werden verschiedene, orientierende Fahrversuche durchgeführt. Als Maßstab wird hierbei die Dauer eines Überholvorgangs herangezogen. Zwei Fahrzeuge „A“ und „B“ fahren dazu in einer Entfernung von etwa 150 m in Folgefahrt, ohne Relativgeschwindigkeit. Fahrzeug „A“ führt nun einen Beschleunigungsvorgang mit maximal verfügbarer Leistung durch, während Fahrzeug „B“ weiterhin mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Als Beispiel für einen typischen Relativweg zwischen Überholer und überholtem Fahrzeug, der inklusive charakteristischer Aus- und Einschereabstände eine vollständige Vorbeifahrt repräsentiert, wird ein Wert von 45 m angenommen. Anschließend wird die Zeit gemessen, die das beschleunigte Fahrzeug für das Absolvieren des definierten Aufholwegs benötigt, mit dieser Vorgehensweise kann die reale Dauer eines typischen Überholvorgangs gemessen werden. Die so bestimmten Werte können anschließend mit der Zeit verglichen werden, die die entsprechende Prädiktion dieser Dauer ergibt. Der hierfür notwendige Leistungswert wurde so gewählt, dass eine möglichst gute Anpassung an die Messungen resultiert. Diese Vorgehensweise kann bei der Parametrierung eines Überholassistenten analog durchgeführt werden, da sich dieser Wert aus wenigen Beschleunigungsversuchen ermitteln lässt. Das Ergebnis der erläuterten Fahrversuche ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Die beiden Plots zeigen die Resultate aus Fahrversuchen mit zwei unterschiedlichen Fahrzeugen, einem BMW 540i und einem Mercedes S430 (Anhang D). Die Beschleunigungsfahrten wurden aus verschiedenen Geschwindigkeiten zwischen 40 und 100 km/h durchgeführt. Die Balken repräsentieren die absoluten Abweichungen vom gemessenen Wert, die sich beim Vergleich aus Messung und Prädiktion ergeben, angegeben sind jeweils die Maximal-, bzw. Minimalwerte und die durchschnittliche Abweichung. Die größten Differenzen ergeben sich in einer Größenordnung von etwa 0,4 s, die Durchschnittswerte liegen weit darunter. Vor dem Hintergrund der Schlichtheit der gezeigten Prädiktion werden die erzielten Abweichungen als akzeptabel

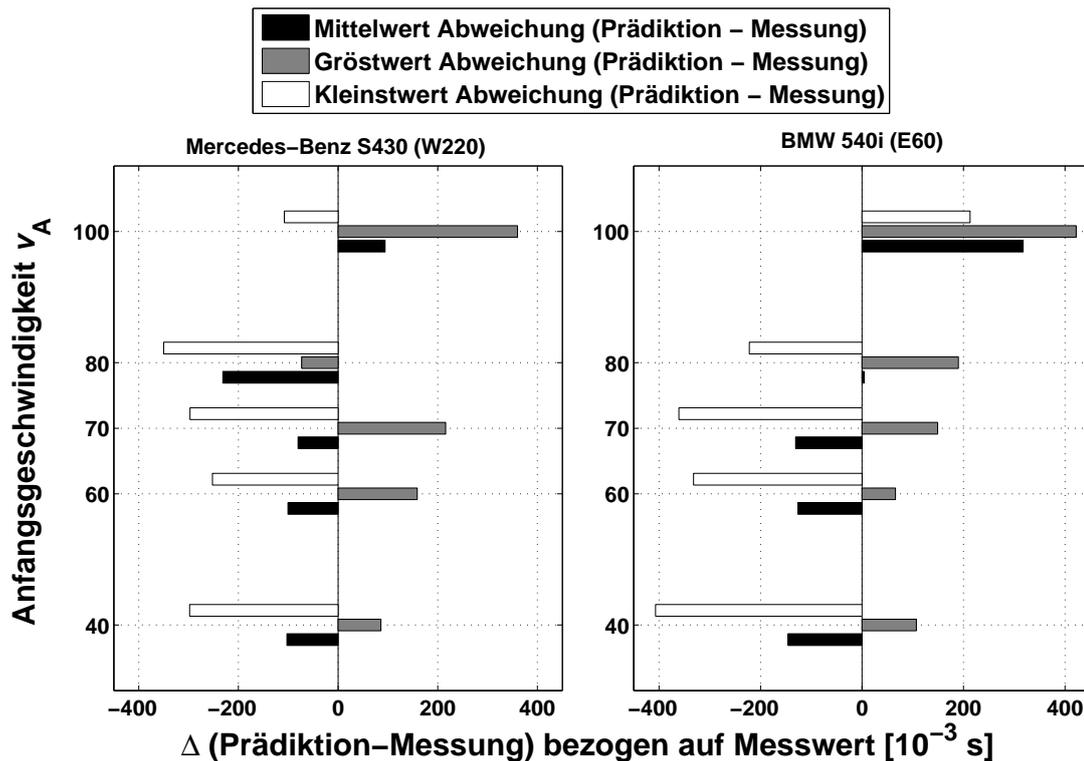


Abbildung 2.9: Abweichungen der benötigten Zeit um eine Aufholstrecke von 45 m zu einem vorausfahrenden Fahrzeug zu absolvieren, von der entsprechend prädizierten Dauer. Die größten Abweichungen liegen in einer Größenordnung von 0,4 s.

bewertet, für eine genauere Bestimmung müssen weitere Forschungsbestrebungen dahingehend unternommen werden, wie die Modellierung des Beschleunigungsverlaufes weiter optimiert werden kann.

2.2.2 Simulation eines Überholvorgangs mit Parametervariation

Analog zur Darstellung der Position aller beteiligten Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Zeit in Abbildung 2.2 können mit den gewählten Modellen nun Überholvorgänge zwischen den Zeitpunkten „Beginn des Überholvorgangs“ und „Ende des Überholvorgangs“ simuliert werden. In Abbildung 2.10 ist eine solche Simulation dargestellt. Die verschiedenen Zeitverläufe der Position des überholenden Fahrzeugs repräsentieren unterschiedliche Antriebsleistungen P_{netto} . Das gezeigte Modell des idealtypischen Überholmanövers ermöglicht die Abbildung des gesamten Überholvorgangs. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Zeitpunkte und Überholphasen identifiziert.

2.3 Charakteristische Zeitpunkte und Überholphasen

Der in den obigen Betrachtungen vollständig beschriebene Überholvorgang besitzt verschiedene charakteristische Grenzzeitpunkte, die in Abbildung 2.11 durch gestrichelte, vertikale Linien gekennzeichnet sind. Als Kriterium für den Grenzzeitpunkt 1 (*Überholbeginn*), wer-

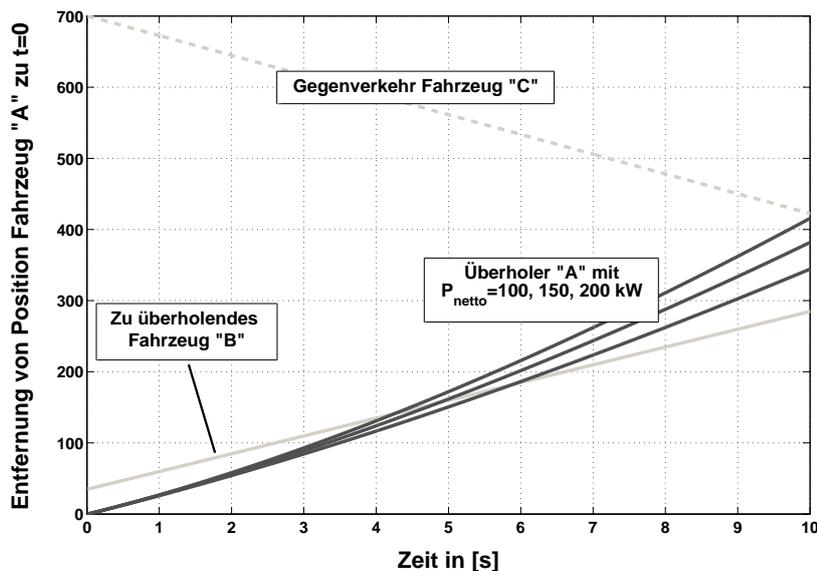


Abbildung 2.10: Simulierter Verlauf eines *idealtypischen Überholmanövers*. Die drei Verläufe für die Position des überholenden Fahrzeugs „A“ repräsentieren verschiedene zugrundegelegte Fahrzeugleistungen. Der Überholvorgang ist in allen gezeigten Fällen erfolgreich, d. h. es besteht kein Konflikt mit dem entgegenkommenden Fahrzeug.

den in der Literatur verschiedene Definitionen verwendet. So beschreibt CRAWFORD den Überholbeginn mit „[the subject]...moved the controls to begin to overtake“¹². Diese Formulierung ist als quantitatives Kriterium für den Überholbeginn aufgrund der unpräzisen Beschreibung nicht anwendbar. DURTH verwendet als Definition des Überholbeginns ein Annähern des Fahrzeugs an die Mittellinie auf einen Abstand von weniger als 25 cm¹³. Es ist zu erwarten, dass eine solche Unterschreitung, insbesondere auf schmalen Fahrbahnen auch ohne tatsächlichen Überholbeginn häufig auftritt, daher wird auch dieses Kriterium wegen seiner fehlenden Eindeutigkeit als ungeeignet betrachtet. HEGEMAN definiert den Überholbeginn, sobald „[the cars]...left front wheel touches the center line“¹⁴. Da dieser Zeitpunkt genau den Moment markiert, an dem der Fahrer des überholenden Fahrzeugs den Manövrierraum des eigenen Fahrstreifens verlässt und in den „fremden“ Bereich des linken Fahrstreifens eindringt, wird diese Definition als valide betrachtet und in dieser Arbeit angewendet. Für die Betrachtung eines Überholassistentensystems besitzt die Festlegung des Überholbeginns jedoch nur untergeordnete Bedeutung, da für die korrekte Wahl des Aktivitäts-Modus eines Überholassistenten lediglich die Frage von Bedeutung ist, ob der Fahrer einen Überholvorgang beabsichtigt oder nicht. Diese Erkennung kann auf Basis der Kombination verschiedener Kriterien realisiert werden und wird von SCHMITT ausführlich beschrieben¹⁵. Ein weiterer charakteristischer Zeitpunkt ist das Ende des Überholvorgangs, in der Abbildung mit der Ziffer „3“ gekennzeichnet. Auch hier existieren in der Literatur verschiedene Ansichten zur quantitativen Definition dieses Zeitpunktes: FASTEN-

¹²Crawford (1963): The overtaking driver S. 154.

¹³Durth/Habermehl (1986): Überholvorgänge S. 2.

¹⁴Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 15.

¹⁵Schmitt/Habenicht/Isermann (2009): Odometrie.

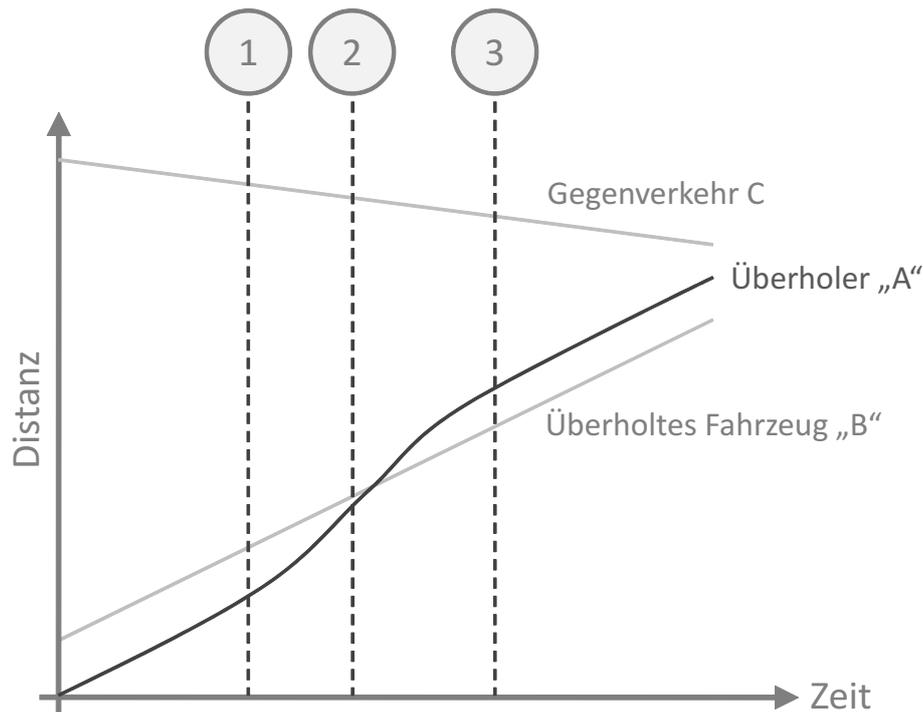


Abbildung 2.11: Charakteristische Grenzzeitpunkte, die während eines Überholvorgangs auftreten können. 1: Überholbeginn, 2: Letztmöglicher unkritischer Abbruch, 3: Überholende.

MEIER sieht allgemein Fahrstreifenwechselmanöver nach der „*Positionierung des Fahrzeugs in der Mitte der Zielspur*“ als abgeschlossen¹⁶. Dies ist offensichtlich kein praktikables Kriterium, da beispielsweise bei der Berücksichtigung von Fahrern mit außermittig nach links versetzter Fahrweise innerhalb des eigenen Fahrstreifens nach dieser Definition die Möglichkeit besteht, dass der Überholvorgang zu keiner Zeit als abgeschlossen betrachtet werden kann. Analog zur Bestimmung des Überholbeginns definiert HEGEMAN diesen Zeitpunkt als „...[the] left back wheel has passed the center line“¹⁷. Dies ist genau der Moment, zu dem der Überholer den Gefahrenbereich „linker Fahrstreifen“ verlässt und wird somit als geeignetes Kriterium für das Ende eines Überholmanövers betrachtet und daher in dieser Arbeit als Kriterium für das Ende eines Überholvorgangs verwendet.

Der in Abbildung 2.11 eingefügte Grenzzeitpunkt „2“ indiziert den Zeitpunkt des sogenannten *letztmöglichen unkritischen Abbruchs*. Bei der Betrachtung der Möglichkeiten, wie ein begonnenes Überholmanöver vom Fahrer aufgrund einer Systemwarnung durch die Teilmanöver *Abbremsen* und *Wiedereinscheren* abgebrochen werden kann, können zwei Arten unterschieden werden:

- **Unkritischer Überholabbruch:** Hier überschreitet die Vorderkante des Überholers während des gesamten Bremsvorgangs nicht die Position der Hinterkante des Vorderfahrzeugs, beide Fahrzeuge sind also zu keiner Zeit lateral überdeckt. Durch Anwendung einer vordefinierten Maximalverzögerung ist ein Wiedereinscheren möglich, ohne dass hierfür eine Vergrößerung der Distanz zwischen diesen beiden Fahrzeugen notwendig wird.

¹⁶Fastenmeier et al. (2001): Spurwechselvorgänge im Verkehr S. 17.

¹⁷Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 15.

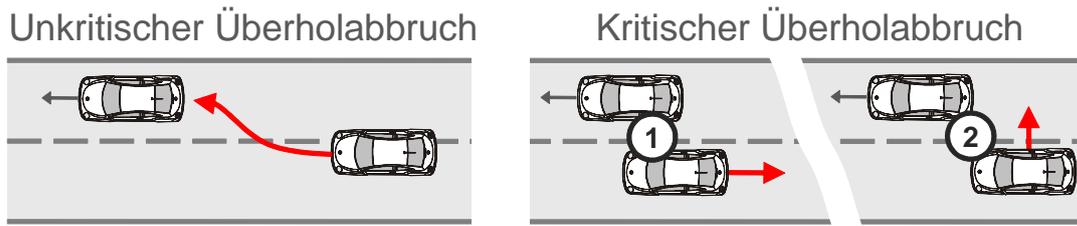


Abbildung 2.12: Unkritischer und kritischer Überholabbruch: Sobald der Überholer zur Durchführung eines Überholabbruchs durch eine entsprechende Relativgeschwindigkeit hinter das zu überholende Fahrzeug zurückfallen muss, liegt ein kritischer Überholabbruch vor, andernfalls ein unkritischer.

- **Kritischer Überholabbruch:** Im zweiten Fall ist der Überholvorgang bereits soweit fortgeschritten, dass das überholende Fahrzeug nicht unmittelbar auf den rechten Fahrstreifen wiedereinscheren kann. Zur Entschärfung der Situation ist hier zunächst eine Abbremsung auf eine positive Relativgeschwindigkeit erforderlich, um nach dem Zurückfallen hinter dem zu überholenden Fahrzeug einzusichern.

Beide Situationen sind in Abbildung 2.12 gezeigt. Den Bezeichnungen *unkritisch* und *kritisch* liegt die Annahme zugrunde, dass ein ein kritischer Überholabbruch durch den Fahrer von diesem ein erhebliches Maß an Koordinationsfähigkeit verlangt und die Fahrerbeanspruchung weitaus größer ist als im unkritischen Fall. Der Grenzzeitpunkt im Verlauf eines Überholmanövers, welcher gerade noch einen unkritischen Überholabbruch ermöglicht, ist in Abbildung 2.11 als Zeitpunkt „2“ gekennzeichnet. Zu jedem Zeitpunkt des Überholvorgangs kann – bei Annahme bestimmter Randbedingungen – berechnet werden, ob ein unkritischer Abbruch möglich ist.

2.3.1 Möglichkeit des unkritischen Überholabbruchs

Da der unkritische Überholabbruch als Reaktion auf eine Systemwarnung erfolgen soll, muss der Einfluss einer Reaktionszeit berücksichtigt werden. In dieser Zeitspanne, die nach dem Beginn beispielsweise einer akustischen Warnung des Fahrers beginnt, wird davon ausgegangen, dass der Fahrer seinen Überholvorgang unbeeinflusst fortsetzt, d. h. auch die zum Überholen gewählte Beschleunigung aufrechterhält. Die Reaktionszeit endet mit der Reaktion des Fahrers auf die Warnung, dem sogenannten Reaktionszeitpunkt. Der Abstand $d^{(AB)}$ zwischen Überholer und zu überholendem Fahrzeug bestimmt sich nach Ablauf der Reaktionszeit zu

$$d^{(AB)}(T_{reaktion}) = d_0^{(AB)} - (v_0^{(A)} - v^{(B)})T_{reaktion} - \frac{1}{2}a_0^{(A)}T_{reaktion}^2. \quad (2.9)$$

Hierbei stellen die Parameter

$$d_0^{(AB)} = d^{(AB)}(0) \quad (2.10)$$

$$v_0^{(A)} = v^{(A)}(0) \quad (2.11)$$

$$v^{(B)} = v^{(B)}(0) \quad (2.12)$$

$$a_0^{(A)} = a^{(A)}(0) \quad (2.13)$$

Größen dar, die von der Umfeldsensorik zu ermitteln sind, um die hier gezeigte Prüfung auf eine unkritische Abbrechbarkeit des Überholmanövers durchzuführen. Die Reaktionszeit $T_{reaktion}$ ist in einem plausiblen Rahmen zu wählen. Für Zeiten $t > T_{reaktion}$ wird angenommen dass der Fahrer als Reaktion auf die Warnung eine Verzögerung mit einer Stärke von $a_{abbruch}^{(A)}$ vornimmt. Der entsprechende Verlauf nach Ablauf der Reaktionszeit lässt sich mit $\tau = t - T_{reaktion}$ durch

$$d^{(AB)}(\tau) = d^{(AB)}(T_{reaktion}) - (v_0^{(A)} + a_0^{(A)}T_{reaktion} - v^{(B)})\tau + \frac{1}{2}a_{abbruch}^{(A)}\tau^2 \quad (2.14)$$

ermitteln. Da geprüft werden soll, ob mit der eingeleiteten Verzögerung ein Wiedereinschleichen hinter dem Fahrzeug „B“ möglich ist, wird mit Test auf

$$d^{(AB)}(\tau) \stackrel{!}{=} d_{min}^{(AB)} \quad (2.15)$$

festgestellt, ob für den weiteren zeitlichen Verlauf mit appliziertem Abbruchmanöver eine Unterschreitung des minimal akzeptieren Abstandes $d_{min}^{(AB)}$ auftritt. Nach τ aufgelöst:

$$\begin{aligned} \tau(d^{(AB)}) &= \frac{1}{a_{abbruch}^{(A)}} \cdot (v_0^{(A)} + a_0^{(A)}T_{reaktion} - v^{(B)}) \\ &+ (v_0^{(A)2} + 2v_0^{(A)}a_0^{(A)}T_{reaktion} - 2v_0^{(A)}v^{(B)}a_0^{(A)2}T_{reaktion}^2 \\ &- 2a_0^{(A)}T_{reaktion}v^{(B)} + v^{(B)2} - 2a_{abbruch}^{(A)}d_{min}^{(AB)\frac{1}{2}}). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Eine Betrachtung der Diskriminante dieses Ausdrucks

$$\begin{aligned} D &= v_0^{(A)2} + 2v_0^{(A)}a_0^{(A)}T_{reaktion} - 2v_0^{(A)}v^{(B)}a_0^{(A)2}T_{reaktion}^2 \\ &- 2a_0^{(A)}T_{reaktion}v^{(B)} + v^{(B)2} - 2a_{abbruch}^{(A)}d_{min}^{(AB)} \end{aligned} \quad (2.17)$$

lässt nun direkt ein Urteil darüber zu, ob ein unkritischer Überholabbruch bei gegebener kinematischer Ausgangslage und der maximalen Verzögerung erfolgreich durchführbar ist. Dies ist bei $D < 0$ der Fall, bei $D > 0$ ist kein unkritischer Abbruch möglich. In der Situation mit $D = 0$ nähert sich der Überholer beim Abbruch genau dem minimal akzeptierten Wert $d_{min}^{(AB)}$ an, ohne ihn zu unterschreiten. Das geschilderte Szenario stellt somit den Grenzfall dar. Die vorgestellten Berechnungen erlauben die Bewertung einer begonnenen Überholsituation hinsichtlich der Gefährlichkeit, die ein Überholabbruch zum betrachteten Zeitpunkt mit sich bringt. Deshalb sind sie beispielsweise als Kriterium für die Ermittlung des spätesten Zeitpunktes nutzbar, zu welchem gefährliche Umfeldobjekte spätestens erkannt werden müssen, um einen noch unkritischen Überholabbruch zu ermöglichen.

Die in Abschnitt 2.3 vorgestellten drei Grenzzeitpunkte unterteilen einen Überholvorgang nun in vier Phasen: *Vor Überholbeginn*, *Möglichkeit des unkritischen Überholabbruchs*, *Möglichkeit eines kritischen Überholabbruchs* und *Nach dem Überhol-Ende*. Da während der ersten und in der letzten Phase offenbar kein Assistenzbedarf besteht, kann der Fahrer in den beiden übrigen eine Unterstützung erfahren, sobald ein gefährliches Überholmanöver erkannt wird. Soweit ein unkritischer Abbruch möglich ist, erscheint die Warnung des Fahrers angemessen, da dieser zu diesem Zeitpunkt mutmaßlich noch selbst in der Lage ist, das begonnene Überholmanöver sicher zu beenden. Es besteht hier also kein Grund für stärkere Eingriffe in die Fahrsituation. Falls die Gefahr allerdings erst zu einem Zeitpunkt

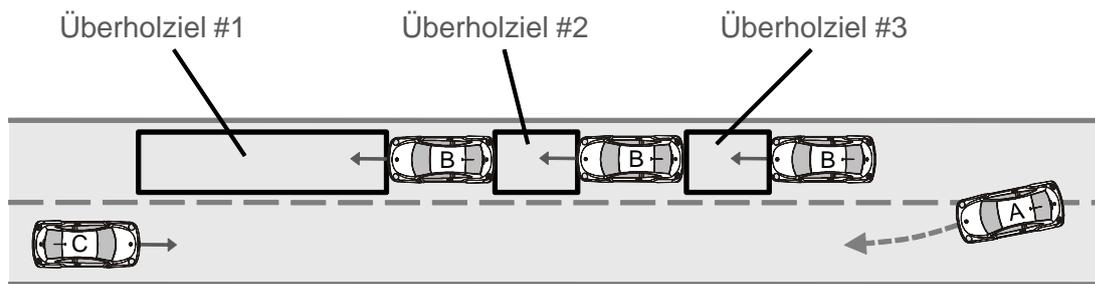


Abbildung 2.13: Überholziele bezeichnen eindimensionale Leerbereiche entlang des Fahrstreifens, die der Überholer zum Beenden des Überholvorgangs nutzen kann. Sie können sowohl zwei Fahrzeuge umfassen, die in die gleiche Richtung fahren wie der Überholer, oder aus einer Kombination zwischen einem solchen Fahrzeug und einem entgegenkommenden. (Anmerkung: Zur deutlicheren Darstellung sind die Überholziele zweidimensional skizziert, sie besitzen jedoch tatsächlich keine modellierte Breite.)

erkannt werden kann, zu dem nur noch ein kritischer Abbruch möglich ist, erfordert ein Überholabbruch ein weitaus komplexeres Handlungsmuster vom Fahrer. Hier bestünde beispielsweise die Möglichkeit, dem Fahrer durch automatische Ansteuerung der Bremse den Aufbau der notwendigen Relativgeschwindigkeit zum überholten Fahrzeug zu erleichtern.

Das grundsätzliche Ziel eines Assistenzsystems für Überholsituationen liegt in einer möglichst frühen Warnung bei erkannter Gefahr, bei einer Betrachtung der Grenzzeitpunkte also unmittelbar nach dem Überholbeginn innerhalb der Phase des möglichen unkritischen Abbruchs. Zu diesem Zeitpunkt ist die Kritikalität meist gering und es sind nur einfache, vom Fahrer selbst durchführbare Maßnahmen notwendig, um die Situation zu entschärfen.

2.4 Überholziele und Systemarchitektur

Nach dem Beginn eines Überholvorgangs bieten *Überholziele* eine Möglichkeit, diesen erfolgreich zu beenden. Diese Lücken können sowohl zwischen zwei Fahrzeugen mit der gleichen Fahrtrichtung wie das EGO-Fahrzeug bestehen als auch zwischen einem solchen und einem Gegenverkehrsfahrzeug gebildet werden. Es werden somit Leerbereiche zwischen detektierten und als relevant bewerteten Objekten repräsentiert, die für ein Einschernen des Überholers nach Abschluss eines Überholvorgangs geeignet sind, Abbildung 2.13. Die Überholziele wurden in dieser Arbeit als Objekt im Sinne der Objektorientierung (OOP)¹⁸ modelliert. Hierbei handelt es sich um die Abbildung eines realen Objekts in eine Softwarestruktur, die dessen Eigenschaften möglichst präzise kapselt. In einem solchen Objekt *Überholziel* sind die Positionen und Geschwindigkeiten der die Lücke begrenzenden Fahrzeuge abgelegt, so dass auf Basis dieser Informationen beispielsweise eine Prädiktion darüber möglich ist, ob die Lücke zum Zeitpunkt des Überhol-Endes zu eng ist.

In Abbildung 2.14 ist die Systemarchitektur einer Umfelderkennung skizziert, die sowohl die Erkennung als auch eine Bewertung von detektierten Überholzielen leistet. Hierzu können zu jedem Zeitpunkt alle momentan erkannten Überholziele in einer internen Repräsentation des Fahrzeugumfelds gespeichert werden. Dabei werden aus den Objekten im

¹⁸Oestereich (2006): Softwareentwicklung S. 39.

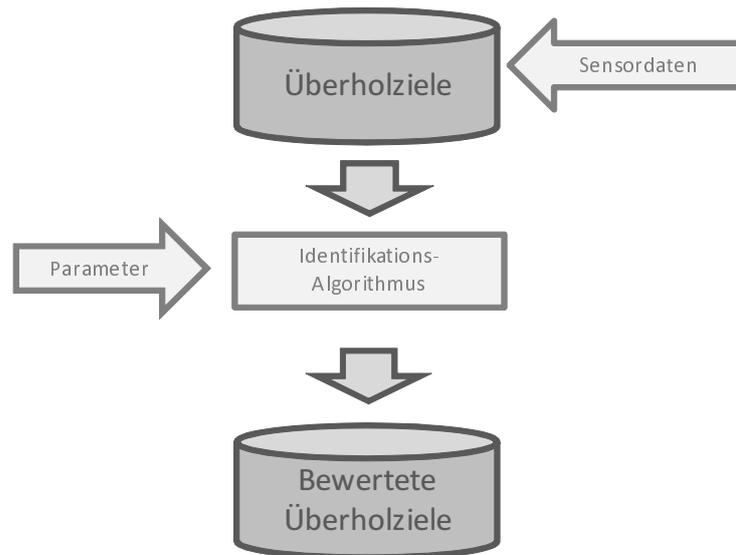


Abbildung 2.14: Konzept zur Erstellung einer Liste von Objekten vom Typ *Überholziel*, auf deren Grundlage eine Bewertung dieser Objekte für das erfolgreiche Beenden eines Überholvorgangs durchgeführt werden kann.

Fahrzeugumfeld zunächst Überholziel-Objekte im Sinne der Objektorientierten Programmierung generiert. Die Überholziel-Objekte werden im folgenden Funktionsblock durch einen Identifikationsalgorithmus hinsichtlich ihrer Eignung für eine gefahrlose, erfolgreiche Beendigung des Überholmanövers bewertet. Um eine derartige Bewertung durchführen zu können, werden verschiedene Parameter zur Systemauslegung benötigt.

Zusammengefasst stellen die systemintern gespeicherten Objekte vom Typ *Überholziel* eine vollständige Umfeldrepräsentation als Grundlage für eine Überholassistentenfunktion dar.

2.4.1 Überholassistent PRORETA II

Die im letzten Abschnitt vorgestellte Systemarchitektur zur Detektion und Bewertung von Überholzielen wurde im Rahmen der Forschungskoooperation PRORETA prototypisch implementiert. Das dabei entstandene Fahrerassistenzsystem bildet die Grundlage für die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen.

Forschungskoooperation

PRORETA ist eine interdisziplinäre Forschungskoooperation zwischen der Technischen Universität Darmstadt und der Continental AG mit dem übergreifenden Ziel, Einsatzmöglichkeiten zu untersuchen, die Fahrerassistenzsysteme für die Realisierung eines unfallvermeidenden Fahrzeugs bieten. Im zweiten Projekt der Kooperation – PRORETA II – wurden in den Jahren 2006-2009 Gegenverkehrsszenarien betrachtet, um Unfälle im Rahmen von Überholvorgängen auf Landstraßen zu vermeiden.

Systembeschreibung

Als Projektergebnis liegt die Ausarbeitung eines Assistenzkonzeptes für Überholsituationen vor, das prototypisch in einem Versuchsträger umgesetzt und im Oktober 2009 auf dem August-Euler-Forschungsflugplatz einem Publikum aus Presse und Fahrzeugherstellern präsentiert wurde¹⁹.

Das vorgestellte Fahrzeug ist in der Lage, anhand der Informationen inertialer Sensorik und einer Fahrstreifenmarkierungserkennung eine Überholabsicht des Fahrers zu identifizieren und die Position und Geschwindigkeiten des vorausfahrenden und entgegenkommenden Verkehrs zu bestimmen. Auf Basis dieser Informationen wird der zeitliche Verlauf des Überholmanövers prädiziert und festgestellt, ob sich aus diesem Ablauf eine gefährliche Situation ergibt. Ist dies der Fall, wird der Fahrer durch geeignete visuelle und auditive Signale zu einem Zeitpunkt gewarnt, zu dem er das begonnene Manöver noch ohne größere Gefährdung der Beteiligten *unkritisch* beenden kann²⁰.

2.5 Fazit

Als Ergebnis liegt die Strukturierung und Klassifikation von Überholvorgängen vor. Das eingeführte Modell des *idealtypischen Überholvorgangs* beinhaltet alle Elemente, die zur vollständigen Beschreibung eines Überholmanövers notwendig sind. Einen zentralen Gesichtspunkt stellt hierbei die Beschleunigung des Überholers dar, die über einen Ansatz konstanter Beschleunigungsleistung modelliert ist. Weiterhin ist der Überholvorgang durch verschiedene charakteristische Grenzzeitpunkte in Überholphasen aufgeteilt, in denen im Fall eines gewünschten Abbruchs des begonnenen Überholmanövers unterschiedliche Anforderungen an den Fahrer hinsichtlich der Manöverkomplexität bestehen. Das Ziel der Umfelderkennung eines Fahrerassistenzsystems für Überholsituationen liegt in der Warnung des Fahrers vor einem gefährlichen Überholmanöver spätestens zu einem Zeitpunkt, zu dem noch ein sogenannter *unkritischer Überholabbruch* möglich ist. Die entsprechenden Kriterien sind präzise definiert.

Das vorgestellte Objekt *Überholziel* fasst alle Eigenschaften beobachteter Objekte zusammen, die zur Bewertung der Gefährlichkeit einer Überholsituation bedeutsam sind. Als Abbildung eines Systems, welches diese Überholziele identifiziert, existiert eine Systemarchitektur, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Grundlage für die detaillierte Betrachtung der in dieser Struktur enthaltenen Funktionsblöcke dient. Ein Umfelderkennungssystem nach dem so definierten Muster stellt die Basis für Warnentscheidungen für ein Überholassistenzsystem dar.

¹⁹ams (2009): Forschungsprojekt S. 14.

²⁰Isermann et al. (2009): Fahrerassistenz in Überholsituationen S. 525.

3 Bewertung von Überholvorgängen - Probandenstudie

3.1 Einführung

3.1.1 Motivation

Bereits in Abschnitt 1.1 wurde deutlich gemacht, dass das menschliche Wahrnehmungssystem mit der zuverlässigen Bewertung der Gefährlichkeit von Überholsituationen zu einem frühen Manöverzeitpunkt offenbar überfordert ist. In Abschnitt 2.4.1 wurde daher ein prototypisches Fahrerassistenzsystem beschrieben, welches den Autofahrer in dieser anspruchsvollen Situation unterstützen kann. Dies wird dadurch erreicht, indem der Fahrer rechtzeitig vor dem Beginn eines Manövers gewarnt wird, welches als gefährlich erkannt wurde. Um ein solches System so gestalten zu können, dass Autofahrer Warnungen als plausibel empfinden und hierdurch eine maximale Akzeptanz zu erreichen, werden verschiedene Parameter benötigt, die in den in diesem Abschnitt beschriebenen Experimenten ermittelt werden.

Am Ende jedes Überholmanövers mit auftretendem Gegenverkehr existiert eine zeitliche Lücke zwischen dem Überholer und dem entgegenkommenden Fahrzeug, die ein mehr oder minder sicheres Wiedereinscheren auf den rechten Fahrstreifen ermöglicht. Die Zeitlücke bezeichnet dabei einen Wert, der ähnlich einer *time-to-collision* (TTC) als Quotient aus dem Abstand und der Relativgeschwindigkeit der beiden Fahrzeuge zum Zeitpunkt des Manöverabschlusses bestimmt werden kann. Allgemein ist die TTC nur bei Vorliegen einer Kollisionstrajektorie definiert, bei HEGEMAN wird die Verwendung des alternativen Begriffs *Post-Encroachment-Time* (PET) diskutiert¹. Aus Gründen der größeren Verbreitung des TTC-Begriffs wird dort auf die Verwendung der PET jedoch verzichtet. In der vorliegenden Arbeit wird analog vorgegangen.

Das vorgeschlagene Überholassistenzsystem bewertet die Gefährlichkeit einer Situation über eine Prädiktion der oben beschriebenen TTC. Ein negativer Wert bedeutet in diesem Fall offensichtlich die Gefahr einer Kollision und soll somit unzweifelhaft zu einer Warnung durch die verwendeten HMI-Schnittstellen führen. Auf der anderen Seite wird der Fahrer jedoch nicht generell das Ausbleiben einer Warnung bei entsprechenden Werten mit positivem Vorzeichen akzeptieren. Das Unterlassen einer Systemreaktion bei einer nur sehr geringen zeitlichen Distanz zum Gegenverkehr am Manöver-Ende wird hier wahrscheinlich als nichtplausibel, als *Falsch-Negativ*-Systemreaktion² wahrgenommen. Für eine gute Akzeptanz des beschriebenen Systems ist es jedoch gleichfalls nicht förderlich, die Schwelle des zeitlichen Abstandes, ab deren Überschreitung keine Warnung erfolgt, sehr weit nach oben zu verschieben. Vermutlich wäre die Folge einer solchen Parametrierung ein häufiges

¹Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 21.

²Das System warnt nicht, der Fahrer bewertet den weiteren Verlauf des Manövers jedoch als gefährlich.

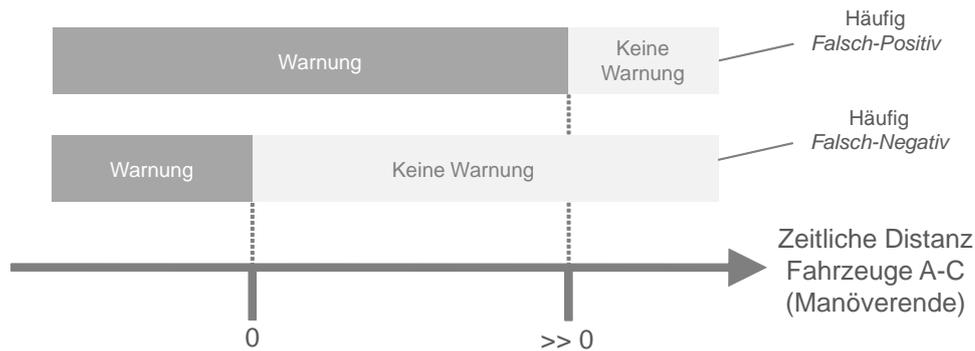


Abbildung 3.1: Liegt der Schwellwert für die Erkennung eines gefährlichen Überholmanövers auf Basis des prädizierten zeitlichen Abstandes zum Manövrierende niedrig, so sind unplausible Systemreaktionen als *Falsch-Negativ*-Fehler zu erwarten. Liegt der Schwellwert dagegen bei sehr großen Werten, sind häufige *Falsch-Positiv*-Fehler wahrscheinlich.

Auftreten von *Falsch-Positiv*-Fehlern, da nun auch in Situationen gewarnt würde, die der Fahrer als problemlose Überholmöglichkeit bewertet. Abbildung 3.1 illustriert die Situation. Es liegt die Schlussfolgerung nahe, dass zwischen den gezeigten Extremwerten ein Parameter existiert, der im Bezug auf die zu erwartenden Fehler als optimal anzusehen ist bzw. der Wert des Parameters in einem bestimmten Spektrum wählbar ist, so dass weder *Falsch-Positiv*- noch *Falsch-Negativ*-Fehler zu erwarten sind. Eindeutige Hinweise auf Forschungsbedarf zur notwendigen Ermittlung dieser Parameter findet sich in der Dissertation von HEGEMAN, die in ihrer Arbeit einen Überholassistenten im Fahrsimulator untersucht hat, der dem hier vorgeschlagenen ähnelt, im Unterschied zu diesem jedoch über eine grüne und rote Signalleuchte anzeigt, ob Überholvorgänge in der jeweiligen Situation sicher durchführbar sind oder nicht. Bei der Auswertung der Versuchsreihen konnte folgende Beobachtung gemacht werden³:

„Some participants thought the assistant’s threshold for the green sign was too low: The assistant displays a green sign while I see an oncoming vehicle!, whereas other participants thought the assistant’s threshold was too high: The assistant displays a red sign while I could easily overtake the preceding vehicle.“

Hier zeigt sich der erwartete Effekt: In den Simulatorversuchen traten sowohl *Falsch-Positiv*- als auch *Falsch-Negativ*-Fehler auf.

Neben der richtigen Wahl des Schwellwertes für eine Systemwarnung ist die korrekte Prädiktion der Dauer eines Überholvorgangs für die Funktion des skizzierten Überholassistentensystems entscheidend. Zu diesem Zweck wird ein weiterer Auslegungsparameter benötigt, der zumutbare Einscherabstand zwischen Überholer und zu überholendem Fahrzeug zum Zeitpunkt des Manöver-Endes. Offenbar hat dieser Wert einen direkten Einfluss auf den prädizierten zeitlichen Abstand der Fahrzeuge „A“ und „C“ zum Ende des Überholvorgangs. Der Einfluss eines weiteren, vor dem Fahrzeug „B“ fahrenden Fahrzeugs „B2“ auf das Einscherverhalten wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Beide diskutierten Parameter, der Schwellwert für eine Überholwarnung und der zumutbare Einscherabstand, sind offenbar abhängig von der fahrerindividuellen Situations-

³Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 107.

einschätzung bzw. dem spezifischem Fahrerverhalten. Daher liegt die Bestimmung dieser Werte durch eine empirische Studie unter Einbeziehung von Probanden nahe.

3.1.2 Einordnung in die Überholzieldetektion

Die oben diskutierten Parameter werden benötigt, um im Rahmen der Struktur des in dieser Arbeit untersuchten umfelderfassenden Systems eine valide Bewertung von Überholmöglichkeiten durchführen zu können. Die Übersicht in Abbildung 3.2 zeigt die Stelle in der vorgeschlagenen Systemstruktur, an dem diese Informationen als Eingangsgröße verwendet werden. Überholziele, die von der Umfeldsensorik erkannt wurden, müssen zur

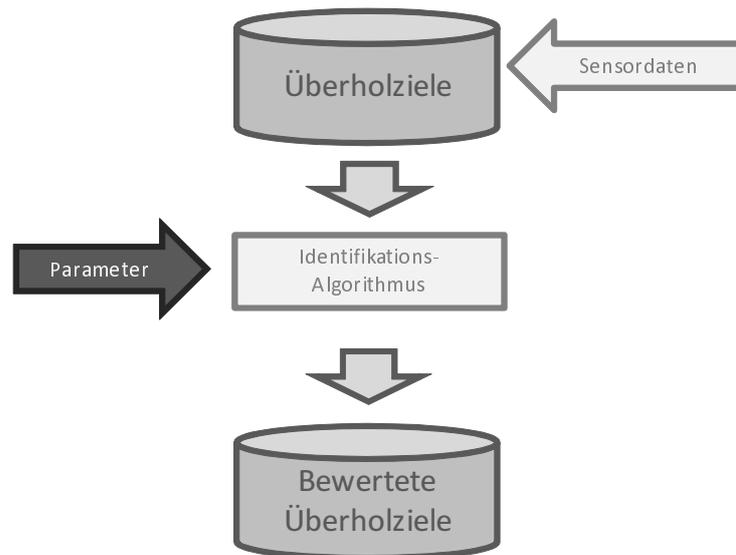


Abbildung 3.2: Der Identifikations-Algorithmus benötigt eine korrekte Parametrierung, um unplausible Systemreaktionen zu vermeiden.

Entscheidung, ob eine Warnung erfolgen soll, durch einen entsprechenden Algorithmus bewertet werden. Dieser, hier als *Identifikationsalgorithmus* bezeichnete Funktionsblock, benötigt für seine korrekte Funktion die in diesem Kapitel ermittelten Parameter als Eingangsgröße.

3.2 Systemparameter für ein Überholassistenzsystem

3.2.1 TTC, Overtaking Margin (OM) und Adequate Overtaking Margin (AOM)

Für die Bewertung, wie kritisch ein Überholmanöver endet, ist bei einem idealtypischen Manöver der Zeitpunkt heranzuziehen, der das höchste Gefahrenlevel besitzt. Da der sichere Abschluss des Überholens prinzipiell durch den herannahenden Gegenverkehr beschränkt ist, ist es naheliegend hierzu die Position der Fahrzeuge „A“ und „C“ zum kritischsten Zeitpunkt zu betrachten. Offenbar liegt der gesuchte Zeitpunkt am Ende des Überholvorgangs, kurz bevor das Wiedereinscheren auf den rechten Fahrstreifen beendet ist. Für die Anordnung des Überholers zum Gegenverkehr in diesem Augenblick werden in der Literatur zwei

verschiedene Größen betrachtet: Zum einen die geometrische Distanz, zum anderen wird der TTC-Wert genutzt, der diese Distanz mit der momentanen Relativgeschwindigkeit ins Verhältnis setzt. DURTH verwendet die Distanz und begründet dies mit der Aussage, dass in Verkehrsbeobachtungen keine Abhängigkeit der gemessenen Abstände von der Relativgeschwindigkeit zu diesem Zeitpunkt ermittelt werden konnte⁴. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass mit der dort gewählten Methodik der Beobachtung „normaler“ Überholvorgänge im öffentlichen Straßenverkehr keine explizite Betrachtung von Grenzsituationen durchgeführt wurde. Eine mögliche Folge dieser Einschränkung ist, dass die Zahl der Fälle, in denen „knapp“ überholt wurde, für eine Erkennbarkeit einer solchen Abhängigkeit aufgrund der niedrigen Zahl der beobachteten Manöver nicht ausreichend war. Die meisten Literaturquellen ziehen zur Bewertung von Kollisionsgefahren zwischen Fahrzeugen, die sich aufeinander zubewegen, die *time-to-collision* (TTC) heran. Dieser Quotient aus Abstand und Relativgeschwindigkeit zweier Objekte bewertet die verbleibende Zeit, bis eine Kollision zwischen diesen beiden Objekten eintritt, vorausgesetzt, diese behalten sowohl den Kollisionskurs als auch die momentane Relativgeschwindigkeit bei^{5,6}. Auch bei der Entwicklung von sogenannten Collision Avoidance Systemen (CAS) ist die Anwendung der TTC weit verbreitet⁷. Unabhängig von der Wahl des Kriteriums – Distanz oder TTC zwischen den Fahrzeugen „A“ und „C“ zum Ende des Überholvorgangs – ist für die Umsetzung eines Überholassistentensystems nach der Darstellung im vorigen Kapitel die Festlegung eines Grenzwertes notwendig, der als Kriterium für die Aktivierung einer Warneinrichtung dient. Dieser Grenzwert wird in dieser Arbeit als *Overtaking Margin (OM)* bezeichnet. Aufgrund der häufigeren Berücksichtigung der entsprechenden Werte in der Literatur als zeitliche Angabe beschränken sich die folgenden Beschreibungen auf die Darstellung des *OM* als Zeit. Die korrespondierenden Ergebnisse der Untersuchung mit einer Betrachtung der Distanzwerte kann Anhang A entnommen werden.

Wenn, wie in Abbildung 3.3 für die Betrachtung eines Nutzerkollektivs in idealisierter Weise skizziert, davon ausgegangen wird, dass bei sehr niedrigen, respektive sehr hohen Werten für den *OM* ein starkes Wachstum der *Falsch-Negativ-* bzw. *Falsch-Positiv-Fehler* zu erwarten ist, sind drei grundsätzliche Situationen denkbar:

1. Es existiert ein Bereich in dessen Rahmen der Overtaking Margin *OM* gewählt werden kann, so dass eine fehlerfreie Parametrierung des Systems möglich wird (Abbildung 3.3 oben).
2. Für eine vorgegebene Fehler-Toleranzgrenze existiert ein Bereich oder ein einzelner Wert für die Wahl des *OM*, bei dem beide Fehlerarten die gegebene Toleranzgrenze nicht überschreiten (Abbildung 3.3 Mitte).
3. Für eine vorgegebene Fehler-Toleranzgrenze existiert **kein** Bereich oder ein einzelner Wert für die Wahl des *OM*, bei dem beide Fehlerarten die gegebene Toleranzgrenze nicht überschreiten (Abbildung 3.3 unten).

⁴Durth/Habermehl (1986): Überholvorgänge S. 32.

⁵Minderhoud/Bovy (2001): Time-to-collision Measures S. 90.

⁶van der Horst/Hogema (1993): Time-to-collision and CAS S. 4.

⁷Winner/Hakuli/Wolf (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme S. 535.

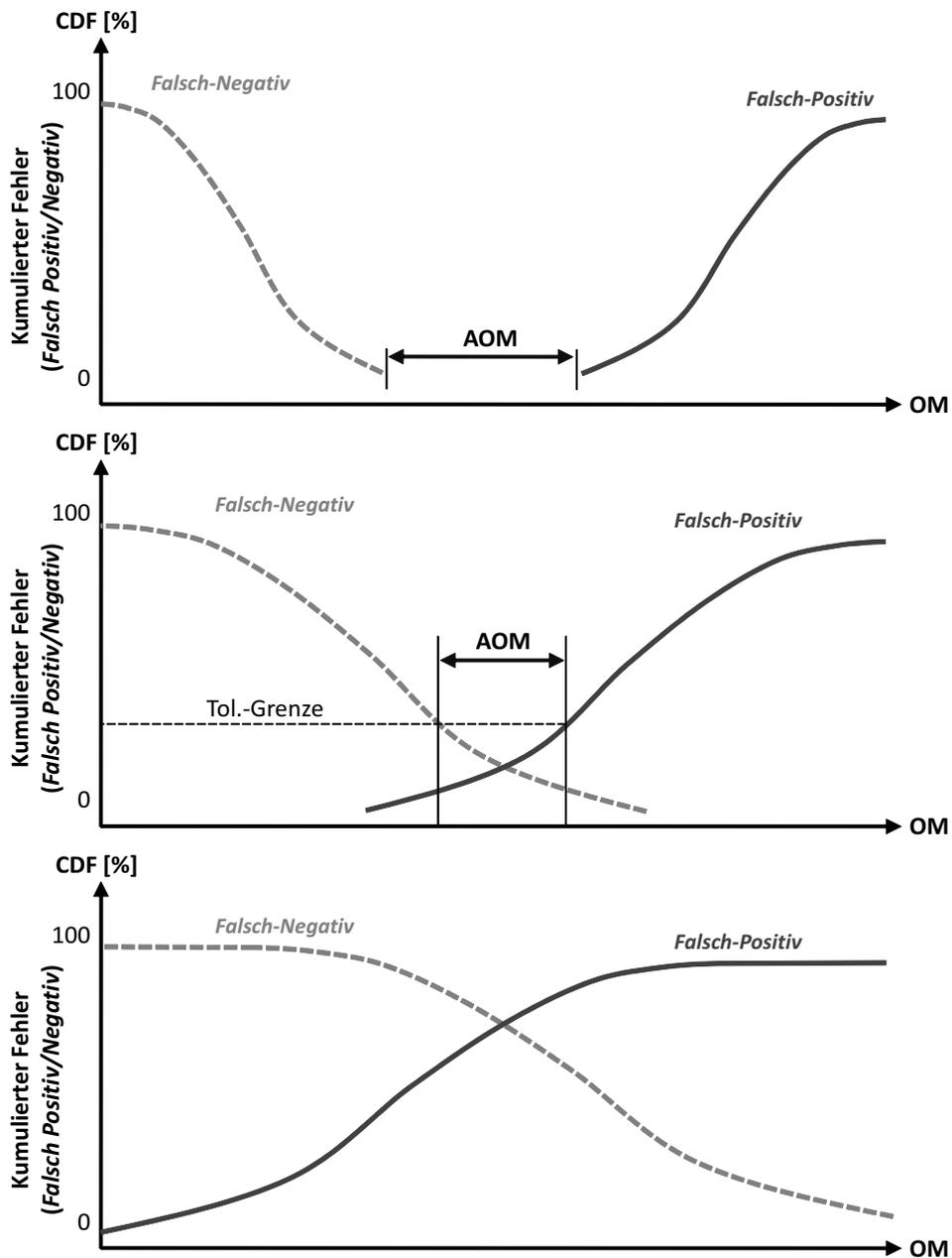


Abbildung 3.3: Erwartete idealisierte Verläufe der kumulierten *Falsch-Positiv*- bzw. *Falsch-Negativ*-Fehler für die Betrachtung eines Nutzerkollektivs (cumulative distribution function), in Abhängigkeit des gewählten *OM*: Oben: Null-Fehler Parametrierung möglich; Mitte: Parametrierung mit geringer Fehlererwartung möglich; Unten: Parametrierung nur mit hoher Fehlertoleranz durchführbar (hohe Fehlererwartung).

Falls die beiden Kurven also einen Schnittpunkt aufweisen, kann der Schluss gezogen werden, dass kein *AOM* existiert, der beide Fehlerarten – *Falsch-Positiv*- und *Falsch-Negativ* – auf den Erwartungswert 0 reduziert. In diesem Fall liegt nach Ansicht des Autors ein guter Wert für die Wahl des *AOM* in einer möglichst großen Balance zwischen den zu erwartenden Fehlerarten, daraus resultiert die Empfehlung, den Parameter *AOM* am Schnittpunkt beider Verläufe zu wählen.

Ein Wert für die Wahl des *OM*, der eine im Bezug auf die realen Verläufe optimale Wahl darstellt, wird als *Adequate Overtaking Margin (AOM)* bezeichnet. Das Hauptziel der in diesem Kapitel vorgestellten Probandenstudie ist die Ermittlung des realen Verlaufes der idealisierten Darstellungen aus Abbildung 3.3 und somit valider *AOM*-Werte. Mit einer entsprechend angepassten Systemauslegung wird erwartet, dass bei Nutzern des vorgeschlagenen Überholassistenten eine Maximierung der Akzeptanz erreicht wird.

3.2.2 Einscherabstand nach Manöverende

Um bereits zu einem frühen Zeitpunkt die Entscheidung treffen zu können, ob ein vom Fahrer begonnenes Überholmanöver gefährlich ist, muss der weitere Verlauf des Manövers prädiziert werden. Dies erfordert die Kenntnis des minimalen Abstandes des EGO-Fahrzeugs vom Überholten am Manöverende, den der Fahrer des überholenden Fahrzeugs noch als zumutbar akzeptiert. Nicht betrachtet wird hierbei der Eindruck, den der Fahrer des überholten Fahrzeugs von dieser Situation erfährt, da der Überholer auch bei normalen Überholvorgängen die Pflicht hat, sicherzustellen, dass jener nicht beeinträchtigt oder belästigt wird. Der Abstand der beiden Fahrzeuge zum Zeitpunkt des Überhol-Endes wird als *Einscherabstand* bezeichnet. Da auch in diesem Fall eine deutliche Abhängigkeit vom spezifischen Fahrerverhalten zu erwarten ist, empfiehlt sich hier die Ermittlung einer Verteilungskurve der minimalen Einscherabstände einer Probandengruppe, die dem Systementwickler eine quantitative Grundlage für die korrekte Gestaltung der Prädiktion eines Überholvorgangs gibt.

3.3 Bisherige Forschungsarbeiten

Es existieren verschiedene Forschungsarbeiten zur Analyse menschlichen Verhaltens bei Überholmanövern, auch im Bezug auf die damit verbundenen Werte, die in dieser Arbeit als Systemparameter benötigt werden. Prinzipiell wird neben der Möglichkeit des Probandenversuchs auch die Beobachtung von Überholsituationen im öffentlichen Straßenverkehr angewendet. Die Arbeiten sind für die folgenden Betrachtungen nach Art der eingesetzten Experimente in Realfahrzeugversuche und Untersuchungen unter dem Einsatz von Fahrsimulatoren gruppiert.

3.3.1 Manöverbeobachtungen mit Realfahrzeugen

Die Nutzung von Realfahrzeugen zur Beobachtung des Fahrerverhaltens wurde in der Literatur auf zwei verschiedene Arten beschrieben und durchgeführt, zum einen durch die Beobachtung von Überholvorgängen im unbeeinflussten, öffentlichen Straßenverkehr, zum anderen bei der Durchführung von Fahrversuchen mit Probanden auf abgesperrten Teststrecken.

Untersuchungen im öffentlichen Straßenverkehr

1986 führte DURTH eine umfassende Untersuchung von Überholvorgängen auf Landstraßen durch⁸. Hintergrund war die Sammlung von Informationen zur Verbesserung der Richtlinien für den Entwurf im Straßenbau. Mit Videokameras, die auf erhöhten Standorten angebracht wurden, konnte dabei der normale, unbeeinflusste Verkehrsfluss auf verschiedenen einbahnigen Straßen mit Regelquerschnitten⁹ kleiner als 14 aufgezeichnet und einer Analyse hinsichtlich der 653 beobachteten Überholvorgänge unterzogen werden. Dabei wurden bei allen Überholfällen die Daten

- Abstände der beteiligten Fahrzeuge
- Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge
- Wegstrecken während des Überholvorgangs
- Überholdauer

erfasst und dokumentiert. Bei den gemessenen Abständen des Überholers vom entgegenkommenden Fahrzeug zum Ende der Überholmanövers – in der Publikation als „Sicherheitsabstand“ bezeichnet – konnten die Autoren keine Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zwischen den beteiligten Fahrzeugen nachweisen¹⁰, es ergeben sich also keine Aussagen zum zeitlichen Endabstand im Sinne eines TTC-ähnlichen Wertes. Zudem wurde bei den Analysen ein im Unterschied zur vorliegenden Arbeit abweichendes Kriterium für den Zeitpunkt des Überholmanöver-Endes definiert. Dieser wird erst dann angenommen, wenn das überholende Fahrzeug nach dem Wiedereinschwenken auf den rechten Fahrstreifen einen Mindestabstand von 25 cm zur Mittellinie überschreitet. Bei einer Definition gemäß Kapitel 2.3, also bei einem Überhol-Ende beim Überfahren der Mittellinie durch das hintere linke Rad des Überholers ergeben sich entsprechend höhere Werte für die Distanz, die auf Basis der bei DURTH gemachten Angaben nicht exakt rekonstruiert werden kann. Abbildung 3.4 zeigt die Summenhäufigkeiten aller gemessenen Distanzen unterhalb einer Schranke von 150 m. Der geringste Abstand, der bei den Beobachtungen festgestellt werden konnte, liegt demnach bei etwa 30 m. Ausgehend von einer Abschätzung der Relativgeschwindigkeit von 200 km/h entspricht dieser Wert einer zeitlichen Distanz von ca. 0,55 s. Bei einer, aus verschiedenen Stichproben gewonnenen, typischen Quergeschwindigkeit des Überholers zum Zeitpunkt des Überhol-Endes von $v_y \approx 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ergibt sich eine Dauer von ca. 0,17 s für das Absolvieren der Lateraldistanz von 0,25 m. Eine Abschätzung für den zeitlichen Abstand zwischen Überholer und Gegenverkehr nach dem in dieser Arbeit verwendeten Kriterium für das Ende eines Überholmanövers liegt folglich in Summe bei etwa 0,7 s.

Die größte Einschränkung der Anwendbarkeit dieser Publikation für die Bestimmung von Parametern für ein Überholassistenzsystem liegt darin begründet, dass hier keine expliziten Grenzwerte ermittelt wurden. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Mehrzahl der

⁸Durth/Habermehl (1986): Überholvorgänge.

⁹Eine ausführliche Darstellung der Fahrbahnabmessungen, die sich aus den Regelquerschnitten ergeben, findet sich im Anhang.

¹⁰Durth/Habermehl (1986): Überholvorgänge S. 32.

¹¹Durth/Habermehl (1986): Überholvorgänge S. 31.

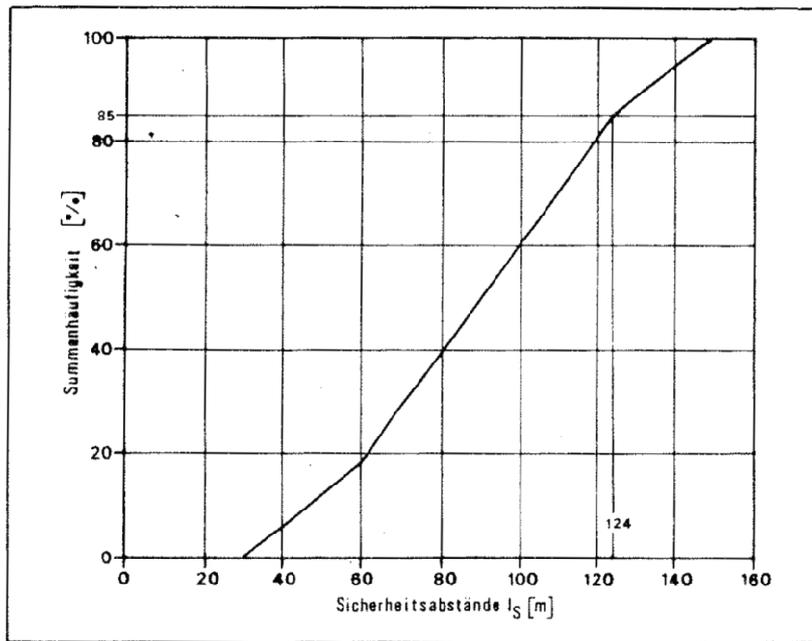


Abbildung 3.4: Summenhäufigkeiten der Sicherheitsabstände unterhalb einer Schwelle von 150 m aus den Verkehrsbeobachtungen zu Überholvorgängen von Durth und Habermehl 1986¹¹

Überholmanöver, die auf öffentlichen Straßen durchgeführt werden, in Situationen stattfindet, bei denen der Abstand zum Gegenverkehr großzügig bemessen ist. Überdies kann durch die rein passive Beobachtung keine Bewertung der konkreten Überholsituationen stattfinden. Eine Situation, in der Fahrer einen Überholvorgang durchführen, diesen aber im Nachhinein als zu gefährlich einstufen würden, kann aus den gewonnenen Messdaten nicht erkannt werden. Weiter ist die bereits erwähnte Vernachlässigung des Einflusses der Relativgeschwindigkeit kritisch zu bewerten, da eine solche Annahme beispielsweise in Überholsituationen mit für den Überholer klar auszumachender niedriger Relativgeschwindigkeit nicht plausibel ist. Einschränkungen gelten auch für die Ergebnisse für den Einscherabstand¹², der Verlauf der entsprechenden Summenhäufigkeit ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Auch hier kann aufgrund der fehlenden Befragungsmöglichkeit keine belastbare quantitative Grenze gezogen werden, welche der gemessenen Werte vom Überholer im Nachhinein als „zu knapp“ bewertet würden, da sich die Überholsituation in ihrem Verlauf beispielsweise als knapper darstellte, als vom Fahrer des überholenden Fahrzeugs zu Überholbeginn angenommen. Weiter können aufgrund der Beobachtung von Überholvorgängen mit mutmaßlich sehr weit entferntem Gegenverkehr sehr große Einscherabstände auftreten, da der Fahrer hier keine Veranlassung sieht, früh auf den eigenen Fahrstreifen zu wechseln. Der für die Auslegung eines Assistenzsystems entscheidende Wert des minimal akzeptierten Abstands kann aus den Untersuchungen von DURTH nicht ermittelt werden.

Auch in der Dissertation von HEGEMAN sind Ergebnisse einer Serie von Beobachtungen von Überholvorgängen auf niederländischen Landstraßen dargestellt. Diese wurden von dem überholten Fahrzeug aus aufgezeichnet, einem sogenannten „Instrumented Vehicle“, welches mit geeigneten Sensoren ausgestattet wurde, um verschiedene Größen zu

¹²Durth/Habermehl (1986): Überholvorgänge S. 31.

¹³Durth/Habermehl (1986): Überholvorgänge S. 31.

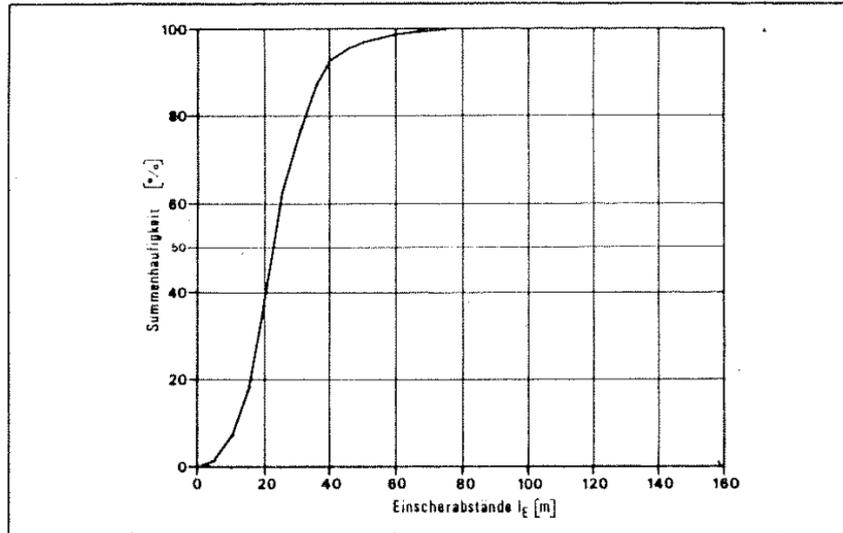


Abbildung 3.5: Summenhäufigkeiten der Einschereabstände der Verkehrsbeobachtungen zu Überholvorgängen von Durth und Habermehl 1986¹³

erfassen, während dieses von anderen Fahrzeugen überholt wurde. Das „Instrumented Vehicle“ bewegte sich dabei auf einer Straße mit einer gesetzlichen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h mit Geschwindigkeiten zwischen 70 und 90 km/h, so dass Überholungen provoziert wurden. Auf diese Weise konnten 48 Manöver beobachtet werden. Etwa 10 % dieser Manöver endeten mit einem zeitlichen End-Abstand zwischen Überholer und Gegenverkehr von weniger als 3 s, der kleinste gemessene Wert lag bei 1,2 s¹⁴. Die sehr geringe Anzahl von lediglich 5 Werten, die unterhalb einer Schwelle von 3 s lagen, schränkt die Ableitbarkeit von Grenzwerten aus dieser Analyse deutlich ein. Darüberhinaus konnte hier ebenfalls keine Befragung der Fahrer der überholenden Fahrzeuge durchgeführt werden, inwieweit knappe zeitliche End-Abstände durch Fehleinschätzungen der Überholsituation begründet waren. Die Ergebnisse hinsichtlich der Analyse des Einschereabstandes zeigen Werte von im Mittel 32,5 m bei einer Standardabweichung von 12,2 m¹⁵.

Für den minimalen Endabstand, der nach Beendigung eines Überholmanövers zwischen dem Überholer und dem Gegenverkehr verbleiben soll, nennt OTTEN¹⁶ einen Wert von 150 m. Dieser Wert sei in der Literatur „oft genannt“, jedoch werden keine näheren Angaben zu Quellen, Begründungen oder Bestimmungsmethoden für diesen Wert dokumentiert. Aus der Arbeit von DURTH lässt sich zudem erkennen, dass dieser Abstand in der Praxis häufig unterschritten wird.

Von TAPIO wurde 2003 in Finnland eine Untersuchung mit ähnlicher Methodik wie bei DURTH durchgeführt¹⁷. Hier wurden Überholvorgänge jedoch nicht von erhöhten Beobachtungspunkten, sondern von einem über der Straße fliegenden Hubschrauber aus aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Die angegebenen Medianwerte für den zeitlichen Abstand zum Ende der beobachteten Überholvorgänge liegen bei 3,8 s in Situationen mit Überholung eines Lkw und bei 4,8 s bei Überholung eines Pkw. Eine Nutzung dieser Werte

¹⁴Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 29.

¹⁵Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 27.

¹⁶Otten/Habermehl (1989): Überholverhalten von Kraftfahrern S. 46.

¹⁷Tapio (2003): Overtaking on two-lane rural roads.

als Auslegungskriterium für ein Überholassistenzsystem ist nicht anwendbar, da hier jeweils nur der Median angegeben ist und so die entsprechenden Grenzwerte nicht ersichtlich sind.

Untersuchungen auf Teststrecken

CRAWFORD führte im Jahr 1963 Probandenversuche zum Überholverhalten von Kraftfahrern durch¹⁸. Hierbei mussten 8 Versuchspersonen verschiedene Überholaufgaben bewältigen. In einem Teilversuch wurden Probanden aufgefordert, aus einer Folgefahrt heraus ein Überholmanöver mit Gegenverkehr zu starten, sobald eine Signallampe, die hinter der Heckscheibe des zu überholenden Fahrzeugs angebracht war, erlosch. Das Manöver sollte jedoch nur dann ausgeführt werden, wenn den Probanden die Situation als ungefährlich erschien. Die Geschwindigkeit des zu überholenden als auch des entgegenkommenden Fahrzeugs wurde in zahlreichen Wiederholungen des Experiments variiert, aufgezeichnet

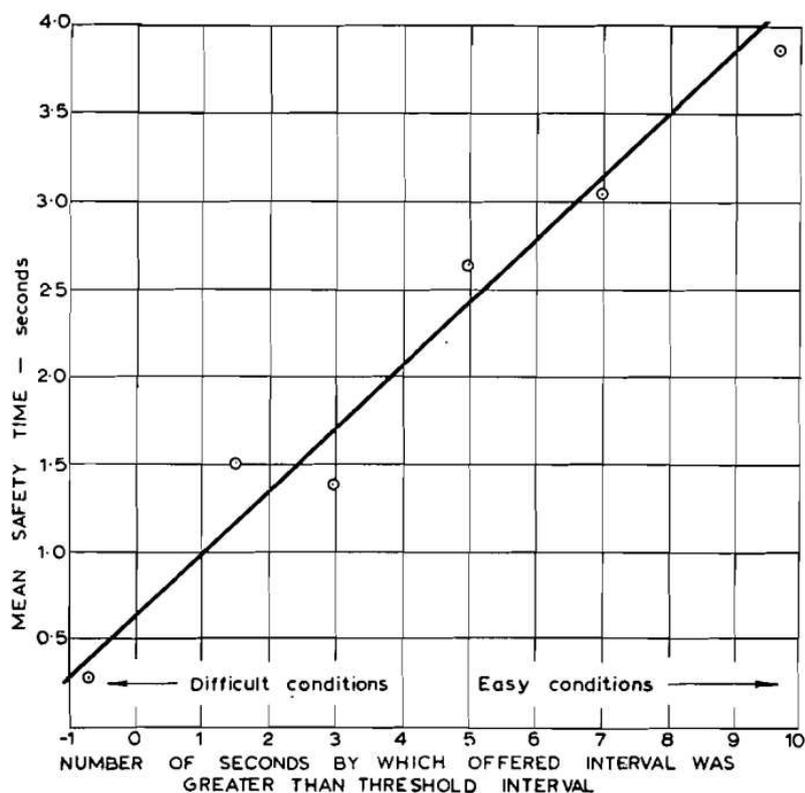


Abbildung 3.6: Mittlere „safety time“ in Abhängigkeit der Differenz der „interval time“, die dem Probanden im Versuch geboten wurde, und der „interval time“, zu der noch genau 50 % der Versuchspersonen einen Überholvorgang starten (Quelle: Crawford 1963¹⁹).

wurden jeweils Distanzen und Geschwindigkeiten zu Beginn und am Ende des Manövers. Die Angaben zu den Kriterien, die das Ende des Überholmanövers definieren, sind nicht deutlich erkennbar. CRAWFORD bezeichnet den zeitlichen Abstand zwischen dem Überholer und dem Gegenverkehr zum Zeitpunkt des Manöver-Endes als „safety time“. Die

¹⁸Crawford (1963): The overtaking driver.

¹⁹Crawford (1963): The overtaking driver S. 159.

zusammengefassten Ergebnisse dieses Versuchs sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Auf der Abszisse ist die Differenz der sogenannten „interval time“, die dem Probanden im Versuch vorlag, und der „interval time“, bei der gerade noch die Hälfte aller Versuchspersonen einen Überholvorgang beginnt, der „threshold-time“, aufgetragen. Die „interval time“ ist definiert als die Dauer vom Erlöschen des Signallichtes im zu überholenden Fahrzeug bis zum Erreichen der gleichen longitudinalen Position der Front des Gegenverkehrs und des zu überholenden Fahrzeugs. Dieser Wert ist also ein Maß für die Dauer zwischen Überholaufforderung und dem vollständigen Schließen des Überholziels. Die Ordinate trägt die dazugehörigen zeitlichen Abstände zwischen Überholer und Gegenverkehr zum Manöverende des durchgeführten Überholvorgangs. Es ist zu erkennen, dass – je nachdem wie knapp sich die gebotene Situation darstellt – Werte für die „safety time“ zwischen etwa 0,25 und 3,8 s variieren²⁰. Bei einem zu Überholbeginn präsentierten Überholziel mit exakt dem Wert der „threshold-time“ ergibt sich eine „safety time“ von etwa 0,6 s. Auch der Einscherabstand wird von CRAWFORD ausgewertet: Abhängig von der Kritikalität schwankt dieser Wert in einem Bereich zwischen 3,05 und 12,2 m²¹. Der sehr niedrige Minimalwert ist ein Indiz dafür, dass hier tatsächlich Grenzfälle betrachtet wurden, wie sie für die Parametrierung eines Überholassistentensystems benötigt werden. Auch kann vermutet werden, dass der Überholer bei einem sehr knappen Manöver im Vertrauen darauf früher einschert, dass sich der Fahrer des überholten Fahrzeugs kooperativ verhält und dem Überholer durch Abbremsen ein sicheres Einscheren ermöglichen möchte. Einschränkungen bei der Anwendbarkeit der Ergebnisse von CRAWFORD betreffen zum einen die geringe Probandenzahl von 8 Personen. Außerdem ist die Zusammensetzung des Kollektivs nicht dargestellt und somit die Repräsentativität nicht zu beurteilen. Es ist jedoch erwähnt, dass alle Versuchsfahrer männlich sind und aus dem gleichen studentischen Umfeld stammen. Ebenfalls ist das hohe Alter der Untersuchung von 47 Jahren zu beachten, Leistung und Fahrverhalten durchschnittlicher Fahrzeuge haben sich seit der Zeit der Durchführung der Experimente ebenso wie die Verkehrsdichte und damit allgemeine Fahrgewohnheiten signifikant verändert. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die ausgeführten Überholmanöver nach Versuchsende nicht von den Fahrern bewertet wurden. So ist es beispielsweise möglich, dass ein Manöver mit einer sehr knappen „safety time“ vom Proband zwar ausgeführt wurde, dies von der Testperson jedoch in einer späteren Bewertung als Fehlentscheidung eingeschätzt, und somit für die Bestimmung von Grenzparametern nicht nutzbar wäre.

3.3.2 Untersuchungen in Fahrsimulatoren

In ihrer Dissertation beschreibt HEGEMAN die Durchführung einer knappen, orientierenden Studie in einem Fahrsimulator, mit dem Ziel der Abschätzung, welches Entwicklungspotential Fahrerassistenzsysteme für Überholsituationen aufweisen²². Zu diesem Zweck wurde in einem statischen Fahrsimulator ein entsprechendes Assistenzkonzept implementiert. Den je 12 Probanden beiderlei Geschlechts wurde eine Verkehrssituation auf einer Landstraße mit Gegenverkehr präsentiert. Sobald das Assistenzsystem eine Lücke im simulierten Gegenverkehr erkannte, die zur Durchführung eines ungefährlichen Überholvorganges ausreichend bemessen war, wurde der Fahrer hierüber über das Aufleuchten einer grünen Lampe informiert, die in den Verkehrsampel-ähnlichen HMI-Aufbau integriert wurde. Dieses Signal

²⁰Crawford (1963): The overtaking driver S. 159.

²¹Crawford (1963): The overtaking driver S. 160.

²²Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 83.

wurde den Versuchspersonen zuvor als Indikator für die Systemaussage „Situation sicher - es kann überholt werden“ mitgeteilt. Die Probanden wurden gebeten, die gleichen Szenen sowohl unter Einsatz des Überholassistenten als auch ohne diese Unterstützung zu fahren, um in verschiedenen Befragungen nach Abschluss der Versuche Hinweise zu Akzeptanzfragen zu bekommen. Bei den Experimenten wurden die Fahrer mit konstruierten Situationen langsam fahrender Fahrzeuge auf dem eigenen Fahrstreifen konfrontiert, um eine Überholabsicht zu erzeugen. Zur gleichen Zeit wurde Gegenverkehr simuliert, die Lücken zwischen den entgegenkommenden Fahrzeugen wurden dabei mit fortschreitender Versuchsdauer immer größer. Die Fahrer wurden angewiesen, langsame Fahrzeuge vor ihnen zu überholen, sobald ihnen die Situation als ausreichend sicher erschien. Als Kriterium für das Aufleuchten der grünen Lampe wurde ohne Berücksichtigung sonstiger Parameter eine Lücke zwischen den entgegenkommenden Fahrzeugen von 10 s angenommen, diese Einstellung wurde von den Probanden jedoch mehrheitlich als unplausibel zurückgewiesen. Dieses Resultat ist ein guter Indikator dafür, dass die Schwelle des Abstandes zum Gegenverkehr, ab deren Unterschreitung ein Überholassistentensystem eine Warnung ausgibt, nicht beliebig zu größeren Werten hin verschoben werden darf, um keine für Fahrer unplausiblen Systemaussagen zu bekommen. Insgesamt wurden 358 Überholvorgänge mit eingeschaltetem und 331 Manöver mit abgeschaltetem Überholassistentensystem aufgezeichnet. Die kleinste gemessene Gegenverkehrs-TTC zum Ende der jeweiligen Manöver in beiden Zuständen lag bei 0,1 s, die gemessenen Mittelwerte bei 3,0 s mit Assistent und 2,5 s ohne Assistent²³. Die außergewöhnlich niedrigen Werte für den Minimalwert lassen die Vermutung zu, dass es sich hierbei um Situationen handelt, in denen die Verkehrssituation von den Fahrern falsch eingeschätzt wurde. Ein zentraler Nachteil der durchgeführten Untersuchung liegt in der für Simulatorversuche allgemein kritischen Frage der Übertragbarkeit auf reale Situationen. Diese konnte im Rahmen der Arbeit von HEGEMAN nicht nachgewiesen werden, insbesondere sind hier Nachteile zu vermuten, da nur ein einfacher, statischer Fahrsimulator angewendet wurde. Weiterhin können aufgrund des bei Überholvorgängen erhöhten Gefahrenlevels Differenzen bei der Reaktion der Fahrer bzgl. Risikobereitschaft angenommen werden. Überdies kann die Übertragbarkeit aufgrund der Tatsache bezweifelt werden, dass nach der Auswertung der Überholversuche der Probanden festgestellt wurde, dass in 4 % der Fälle eine Kollision mit dem Gegenverkehr erfolgt war²⁴. Dies steht offenbar in einem starken Missverhältnis zum Geschehen im realen Straßenverkehr, weshalb die Autorin bei einer konkreten Absicht zur Entwicklung eines Überholassistentensystems als Methode die Durchführung einer Pilot-Studie empfiehlt²⁵.

Eine weitere Forschungsarbeit mit Simulatorexperimenten zum Überholverhalten von Kraftfahrern wurde von OTTEN erstellt²⁶. Insgesamt konnten 233 Überholvorgänge im Simulator der damaligen Daimler-Benz AG durchgeführt und ausgewertet werden. Bei dem Simulator handelte es sich um ein Modell mit Bewegungssystem, d. h. der Fahrer erfährt beispielsweise bei Beschleunigungen des simulierten EGO-Fahrzeugs einen entsprechenden Eindruck²⁷. Hierbei wurden den Probanden langsamfahrende Hindernisfahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von 60 bzw. 80 km/h bei gleichzeitigem Auftreten von Gegenverkehr mit einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h dargeboten, da davon ausgegangen wur-

²³Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 100.

²⁴Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 111.

²⁵Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 112.

²⁶Otten/Habermehl (1989): Überholverhalten von Kraftfahrern.

²⁷Drosdol/Panik (1985): Driving Simulator.

de, dass solche „Hindernisse“ zur Durchführung von Überholvorgängen animieren. Sobald ein Fahrzeug überholt wurde und 10 m hinter dem Überholer zurückgefallen war, wurde es vor dem EGO-Fahrzeug erneut eingeblendet. An Werten, die in diesem Rahmen relevant sind, wurde lediglich die Distanz zum entgegenkommenden Fahrzeug aufgezeichnet, der Einscherabstand wurde nicht erfasst. Die Ergebnisdarstellung dieser Arbeit lässt die Aussage zu, dass der Anteil an Überholungen mit einer End-Distanz zwischen Überholer und Gegenverkehr von unter 100 m bei ca. 27 % liegt. Bei der gegebenen Geschwindigkeit des entgegenkommenden Fahrzeugs von 80 km/h und einer mittleren Geschwindigkeit der überholenden Fahrzeuge bei Manöver-Ende von 109 km/h resultiert daraus eine abgeschätzte zeitliche Distanz von etwa 1,9 s.

3.3.3 Fazit

Es existieren bereits verschiedene Untersuchungen zum Überholverhalten von Autofahrern. Für die Auslegung eines entsprechenden Assistenzsystemes sind jedoch Informationen über Grenzfälle notwendig, beispielsweise ab welchem zeitlichen End-Abstand zum entgegenkommenden Fahrzeug Fahrer einen Überholvorgang als gefährlich einstufen. Diese Daten können aus Beobachtungen von Alltagsüberholungen nur unzureichend abgeleitet werden. Studien in Simulatoren weisen häufig eine zweifelhafte Übertragbarkeit auf reale Situationen auf, insbesondere, da bei Überholvorgängen ein potentiell hoher Gefahreindruck durch rasch nahenden Gegenverkehr auftritt, der aufgrund der inhärenten Ungefährlichkeit des Simulatorversuchs dort nicht, oder nur mit großem Aufwand, vermittelt werden kann. Die Forschungsarbeit von CRAWFORD weist in eine vergleichbare Richtung wie die vorliegende Arbeit, da dort durch Fahrversuche auf einem abgesperrten Testgelände Schwellen für bestimmte kinematische Bedingungen ermittelt wurden, bei denen Autofahrer einen Überholvorgang starten oder unterlassen. Aufgrund des hohen Alters der Untersuchung und der nicht transparenten Zusammenstellung des Probandenkollektivs kann diese Arbeit jedoch nicht als repräsentativ für die Situation im heutigen Straßenverkehr angesehen werden. Zusammenfassend finden sich – obschon Überholvorgänge in der Vergangenheit bereits Gegenstand einzelner Untersuchungen waren – keine Ergebnisse, die eine valide Parametrisierung eines Überholassistentensystems gestatten, wie es in dieser Arbeit vorgeschlagen wurde.

3.4 Experimente mit Probanden und Ergebnisse

3.4.1 Methodik

Die Probandenstudie gliedert sich in 3 verschiedene Versuche, jeweils ein Versuch für die Ermittlung des unteren und oberen Grenzwertes des OM und ein weiterer Versuch, um die minimalen Werte für die Prädiktion von Einscherabständen zu bestimmen. In den folgenden Kapiteln wird zunächst die Zusammensetzung des Probandenkollektivs näher beleuchtet, bevor die genutzten Messmittel und Experimente beschrieben werden.

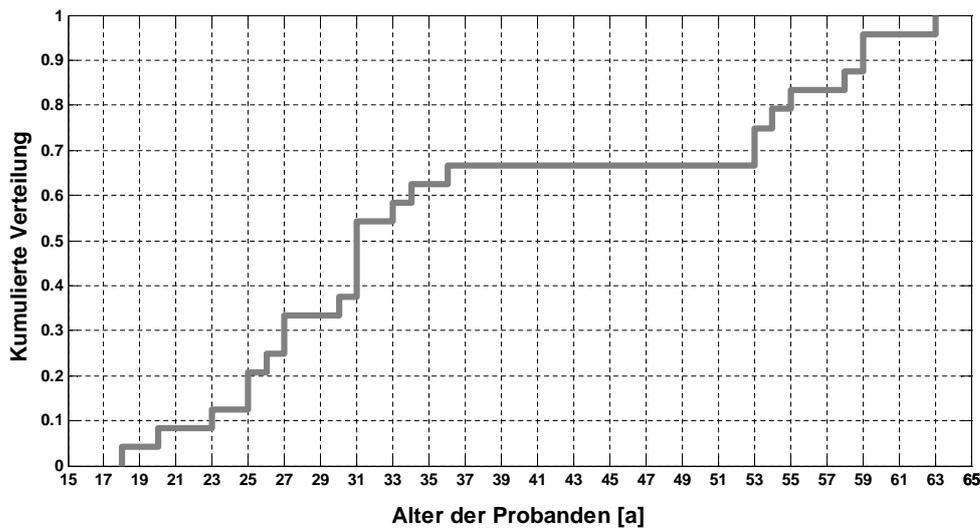


Abbildung 3.7: Kumulierte Verteilung des Lebensalters der Versuchspersonen im Probandenkollektiv

3.4.2 Beschreibung des Probandenkollektivs

Die zentrale Herausforderung bei der Auswahl eines Probandenkollektiv ist die Repräsentativität der Stichprobe in Bezug auf die angestrebte Grundgesamtheit. Da im Rahmen der hier durchgeführten Versuche keine besondere Gewichtung einer bestimmten Gruppe stattfinden soll, wird eine Gleichverteilung bei zentralen Kriterien angestrebt, sowie versucht, sogenannte Klumenstichproben – also Häufungen von Vertretern einer bestimmten Gruppe – zu vermeiden. Nach der Empfehlung von BUBB ist es für die Ermittlung der benötigten Probandenzahl notwendig, die Unterscheidungskriterien zu definieren, nach denen die Gleichverteilung erfolgen soll²⁸. Zu diesem Zweck wurden die Kriterien Geschlecht, Alter und Fahrpraxis festgelegt. Das Kriterium Alter wird dabei in 3 Klassen aufgeteilt, jünger als 30 Jahre, älter als 50 Jahre und der Bereich zwischen diesen Grenzen. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Versuche reichte das Altersspektrum der Versuchspersonen von 18-63 Jahren, die genaue Verteilung des Lebensalters der Probanden ist in Abbildung 3.7 aufgezeigt. Die beiden übrigen Kriterien wurden in jeweils zwei Klassen aufgeteilt, bei der Fahrpraxis wurden Personen mit einer Fahrleistung von weniger als 20.000 km im Jahr von Personen unterschieden, die diese Grenze überschritten. Die benötigte Probandenzahl für eine Gleichverteilung bezüglich der definierten Kriterien ergibt sich bei einer Gesamtzahl von k Kriterien und n_i Klassen für die i -te Eigenschaft aus der Permutation

$$n \geq \prod_{i=1}^k n_i = 2 \cdot 2 \cdot 3 = 12. \quad (3.1)$$

Damit jede Eigenschaftskombination mehrmals im Kollektiv zu finden ist, wird von BUBB empfohlen, die ermittelte Zahl mit einem Faktor zwischen 3 und 10 zu multiplizieren²⁹. Diese Empfehlung steht vor dem Hintergrund, die Möglichkeit zu schaffen, die Ergebnisse

²⁸Bubb (2003): Probanden S. 27.

²⁹Bubb (2003): Probanden S. 28.



Abbildung 3.8: Versuchsstrecke auf dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim. Die Strecke besitzt eine Fahrstreifenmarkierung, die in den Schlüsseleigenschaften wie beispielsweise Abmessungen und Reflexionseigenschaften, der Situation auf einer deutschen Landstraße vergleichbar ist.

nach den verschiedenen Probandeneigenschaften auswerten zu können. Da bei der hier vorliegenden Untersuchung die Ermittlung eines Gesamtwertes im Vordergrund liegt und keine derartige Aufschlüsselung erfolgen soll, wird der Faktor hier lediglich mit 2 gewählt. Somit resultiert eine benötigte Zahl von 24 Versuchspersonen. Die Probanden wurden entsprechend den benötigten Profilen aus einer Datenbank ausgewählt und erhielten für ihre Teilnahme keine Bezahlung.

3.4.3 Teststrecke und Versuchsfahrzeuge

Alle Probandenversuche wurden auf dem August-Euler-Flugplatz in Darmstadt Griesheim durchgeführt, der aufgrund der langen, geraden Start- und Landebahn für die Durchführung von Überholmanövern geeignet ist (Anhang F.1). Auf einem Teilstück sind Fahrbahnmarkierungen angebracht, die in Ausführung, Farbe und Abmessungen denen einer deutschen Landstraße mit einem Regelquerschnitt von 10,5 entsprechen. Der markierte Abschnitt besitzt eine Länge von 500 m. Die entstehende Szene ist in Abbildung 3.8 gezeigt. Da die Fahrbahn eine größere Breite aufweist als die markierte Straße, ist auf beiden Seiten der Versuchsstrecke Ausweichraum für Notfälle vorhanden. Abbildung 3.9 zeigt den Versuchsträger, der während der Studie von den Probanden gefahren wurde. Im Fond des Fahrzeugs befindet sich ein Computer-Terminal, das dem Versuchsleiter die Aufzeichnung von Geschwindigkeit und Distanz zum entgegenkommenden Fahrzeug – gemessen von einem fahrzeugfesten Radar-Sensor – ermöglicht. In Kapitel 2.3 wurde das Ende eines Überholmanövers mit dem vollständigen Eintritt des EGO-Fahrzeugs in den Bereich des rechten Fahrstreifens definiert. Um die Erkennbarkeit dieses entscheidenden Zeitpunkts in den Messdaten identifizieren zu können, wurde in dieser Arbeit eine sogenannte *Wheel Cam* eingesetzt, die oberhalb des linken Hinterrades des EGO-Fahrzeugs befestigt ist. Im Erfassungsbereich dieser Kamera befindet sich die Reifenflanke und ein Teil der Straße seitlich des Reifens. Wie aus der rechten Seite der Abbildung ersichtlich, kann der Zeitpunkt

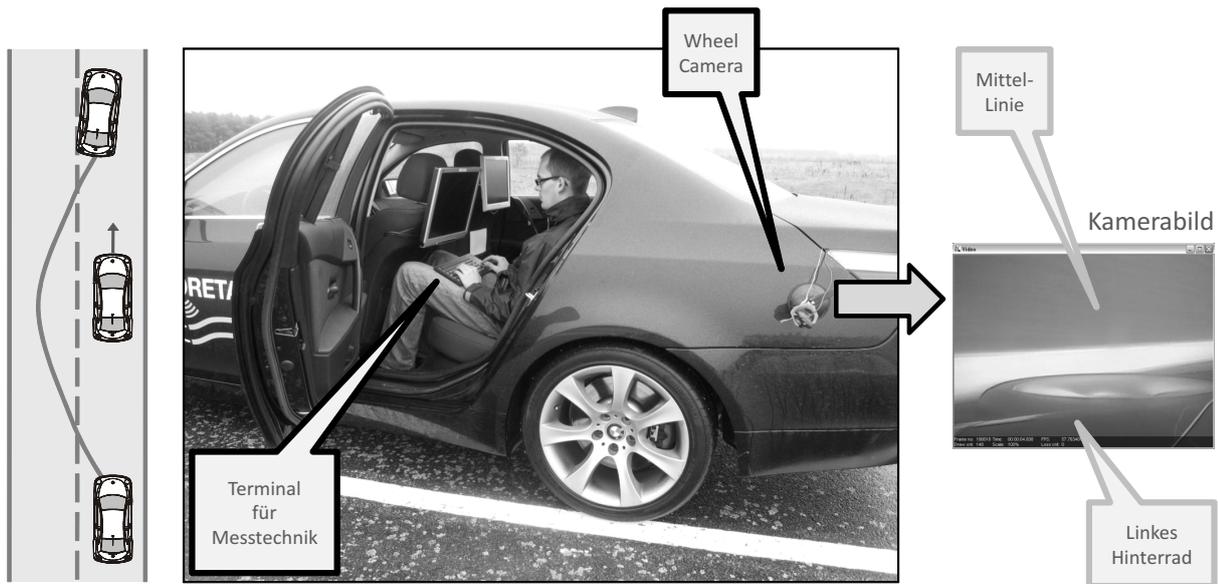


Abbildung 3.9: Messfahrzeug mit Terminal zum Zugriff auf die Messtechnik im Fond: Der Zeitpunkt des Endes des Überholmanövers kann aus den Aufzeichnungen der *Wheel Cam* rekonstruiert werden.

des Überhol-Endes durch das Beobachten der Straßen-Mittellmarkierung unter dem Reifen erkannt und bei der Auswertung in den Messdaten markiert werden. Durch die Messung am Reifen anstelle der linken Hinterkante des Fahrzeugs ergibt sich bei dieser Methode eine Abweichung von der Definition des Überhol-Endes. Diese ist proportional zu

$$\Delta_{lateral} = S \cdot \sin \psi. \quad (3.2)$$

$\Delta_{lateral}$ quantifiziert den Fehler und S ist der Abstand von Fahrzeug-Hinterkante und Hinterachse entlang des Fahrzeugs. ψ bezeichnet den Gierwinkel zur Straße in diesem Moment. Bei $S \approx 1\text{m}$ und einem Maximalwinkel von $\psi \approx 5^\circ$, der in zahlreichen, selbst durchgeführten Fahrversuchen mit dynamischem Fahrstreifenwechsel nie überschritten wurde, ergibt sich eine diesbezügliche Abweichung von etwa 4 cm. Dieser Wert liegt in der Größenordnung der Breite der Fahrstreifenmarkierung und wird vernachlässigt.

3.4.4 Vorversuche

Um Ausreißer-Effekte, beispielsweise durch die Bildung eines Mittelwerts mindern zu können, sollen von jedem Versuch mehrere Wiederholungen gefahren werden. Hierbei besteht die Möglichkeit, dass sich durch Gewöhnungseffekte Messwerte, die am Anfang der Versuchsreihe gewonnen wurden, im Schnitt signifikant von denen unterscheiden, die in einem der späteren Versuche aufgezeichnet wurden. Um einen solchen Effekt zu identifizieren, wurden Vorversuche mit 4 Probanden durchgeführt, die nicht zur Probandengruppe der Hauptversuche gehören. Da der Kern der Hauptexperimente in der Untersuchung der individuellen Bedrohungsempfindung durch entgegenkommende Fahrzeuge liegt, wurde ein einfacher Versuchsaufbau mit einem entgegenkommenden Fahrzeug gewählt. Die Probanden erhielten die Anweisung, einem entgegenkommenden Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen solange entgegenzufahren, wie ihnen die Situation als „nicht bedrohlich oder unangenehm“

erscheint. Aufgezeichnet wurde der zeitliche Abstand zum Gegenverkehr nach der Rückkehr auf den rechten Fahrstreifen. In Abbildung 3.10 sind die Ergebnisse, die TTC nach dem abgeschlossenen Wiedereinscheren für die durchgeführten Versuche in zeitlicher Reihenfolge dargestellt. Das Bild zeigt qualitativ keinen erkennbaren Trend oder eine systematische

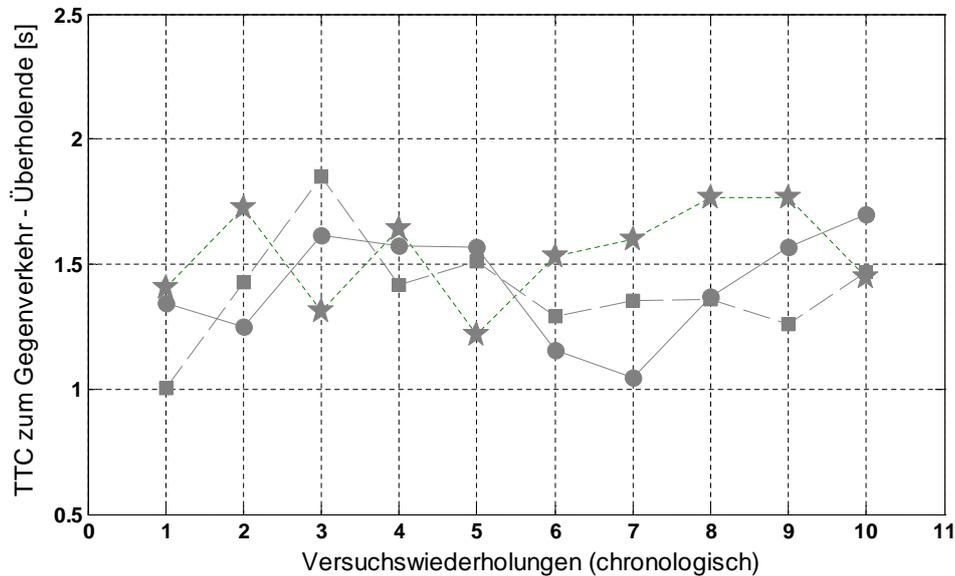


Abbildung 3.10: Vorversuche zur Beurteilung des Gewöhnungseffektes von Probanden an einer gebotenen Situation mit Gegenverkehr. Es ergeben sich diesbezüglich keine offensichtlichen Effekte, auch die entsprechende Anwendung eines statistischen Tests (Mann-Kendall-Trendtest) bestätigt dies.

Abweichung „früher“ Messwerte von „späteren“. Um diesen Eindruck quantitativ zu bestätigen, wurde der sogenannte Mann-Kendall-Trendtest durchgeführt^{30,31}. Die Null-Hypothese lautet bei diesem Test „Es existiert kein Trend“ und kann für alle dargestellten Verläufe aus den Vorversuchen auf einem Signifikanzniveau von 5% nicht verworfen werden. Da somit keine systematische Änderung der durch die Probandenversuche ermittelten Werte über die chronologische Abfolge der Versuchsreihe nachgewiesen werden kann, wird die Reihenfolge der Messwerte nicht berücksichtigt und keine Messwerte aufgrund ihrer Position in der Erfassungsreihenfolge verworfen.

3.4.5 Ablauf Probandenversuche

Alle Probanden unterzogen sich verschiedenen Fahrsituationen, während deren Durchführung war zu jeder Zeit ein Testleiter im Fond des Versuchswagens präsent. Vor jeder Testfahrt konnten sich die Probanden in einer 20-minütigen Eingewöhnungsphase mit der Leistungscharakteristik des Fahrzeugs vertraut machen. Die Versuchspersonen wurden hierzu gebeten, während der Gewöhnungszeit einige Manöver mit maximaler Beschleunigung auszuführen, ausgehend von Geschwindigkeiten, die im Bereich der späteren Versuche lagen.

³⁰Mann/Whitney (1947): Statistical Test S. 50.

³¹Kendall/Gibbons (1990): Rank Correlation Methods S. 76.

Im Anschluss wurden insgesamt 4 verschiedene Versuche durchgeführt, die Gesamtdauer des Durchlaufs für einen Probanden lag im Bereich von 1,5 Stunden.

3.4.6 Experimente

Subjektiver Eindruck: Landstraße

Um bei der Auswertung eine Einschätzung darüber zu bekommen, wie stark sich bei den Probanden der Eindruck des Befahrens einer normalen Landstraße einstellt, wird nach Anlehnung an OTTEN UND HABERMEHL die Verteilung der gewählten Geschwindigkeiten der Probanden bei freier Fahrt ermittelt, um diese anschließend mit repräsentativen Daten aus dem öffentlichen Straßenverkehr zu vergleichen³². Zu diesem Zweck wurde jeder Versuchsperson die Aufgabe erteilt, die markierte Straße auf dem Versuchsgelände ohne Beteiligung eines anderen Fahrzeugs in der Art und Weise entlangzufahren, wie sie dies auf einer durchschnittlichen Landstraße mit einer Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h tun würde. Der Wortlaut der Anweisung lautete:

„Fahren Sie die Strecke so entlang, als wenn Sie auf einer entsprechenden Landstraße unterwegs wären, es herrscht kein explizites Tempolimit, es gilt das Verkehrszeichen 282 (Aufhebung aller Streckenverbote) [wird dem Proband gezeigt].“

Die Geschwindigkeit wurde vom Testleiter auf einem vorher unauffällig markierten Punkt etwa in der Mitte der Teststrecke aufgezeichnet, der Ort der Markierung wurde so gewählt, dass sich die Personen sicher in stationärer Fahrt befanden und die zu bestimmende Geschwindigkeit nicht durch Beschleunigungs- oder Verzögerungseffekte beeinflusst wur-

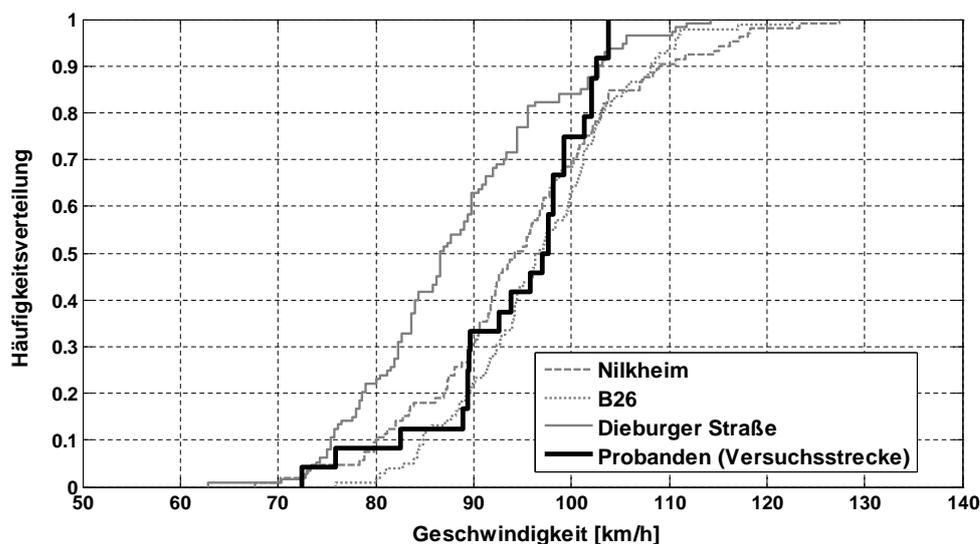


Abbildung 3.11: Häufigkeitsverteilung der in freier Fahrt gewählten Geschwindigkeiten der Versuchspersonen auf dem Testgelände in Darmstadt/Griesheim (dunkel) vor dem Hintergrund entsprechender Geschwindigkeiten im öffentlichen Straßenverkehr (hell).

³²Otten/Habermehl (1989): Überholverhalten von Kraftfahrern S. 24.

Unterer Grenzwert AOM

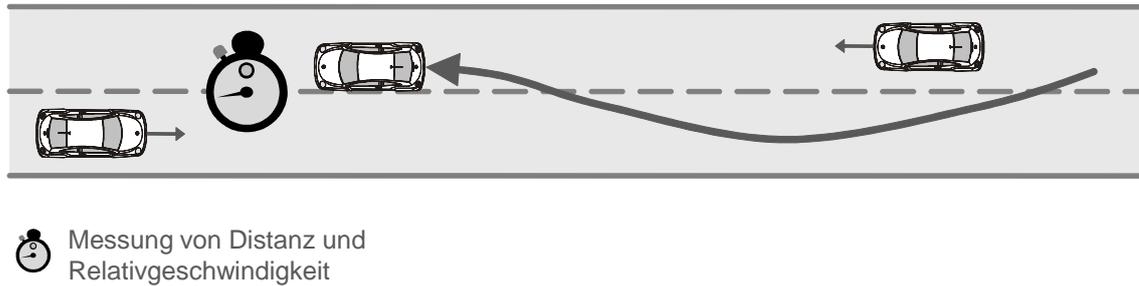


Abbildung 3.12: Aufbau des Probandenversuchs zur Ermittlung einer minimalen zeitlichen Distanz zwischen Überholer und Gegenverkehr zum Zeitpunkt des Endes des Überholmanövers.

de. Die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Werte ist in Abbildung 3.11 aufgetragen. Die dunkle Linie steht hierbei für den Verlauf der oben erläuterten Geschwindigkeiten der 24 Probanden, die 3 weiteren – hellen – Kurven sind Vergleichswerte von Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr, die auf verschiedenen Landstraßen um Darmstadt mit einem stationären Radarsensor aufgezeichnet wurden. Es wurden dabei nur Werte von Fahrzeugen aufgenommen, die sich in freier Fahrt befanden, die ihre Eigengeschwindigkeit also unabhängig von etwaigen, vorausfahrenden Fahrzeugen wählen konnten, die Höchstgeschwindigkeit lag jeweils bei 100 km/h. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Verläufe qualitativ ähneln, das Verhalten der Probanden liegt also innerhalb des Spektrums der Geschwindigkeiten, die auf Landstraßen üblicherweise gewählt werden. Es wird vermutet, dass sich ein Eindruck der Szenerie auf den Fahrer, der sich deutlich von dem einer normalen Landstraße unterscheidet, in den hier aufgezeichneten Geschwindigkeiten ersichtlich werden würde. Da dies aus den vorliegenden Daten nicht erkennbar ist, wird von einer repräsentativen Versuchsumgebung ausgegangen.

Ermittlung des unteren Grenzwertes für den AOM

Beim zweiten Versuch wird der Proband aufgefordert, ein vor ihm fahrendes Fahrzeug zu überholen, während ein weiteres Fahrzeug – für ihn sichtbar – entgegenkommt. Das Wiedereinscheren am Überhol-Ende soll dabei nicht – wie bei einem normalen Manöver – möglichst rasch vor dem überholten Fahrzeug stattfinden, sondern so spät, dass eine bestimmte Unbehagensschwelle nicht überschritten wird. Ziel ist hier die Ermittlung des zeitlichen Abstandes zum Gegenverkehr zum Zeitpunkt des Überhol-Endes, den der Fahrer als noch akzeptabel einstuft. In Abbildung 3.12 ist eine Skizze der Versuchsdurchführung dargestellt. Unmittelbar vor dem Beginn des zweiten Versuchs wurde dem Proband die Durchführung kurz erläutert. Die Anweisungen für die vom Proband zu treffende Wahl des Einscherzeitpunkts wurde allen Versuchspersonen auch hier in exakt dem gleichen Wortlaut übermittelt, um Varianzen durch unterschiedliche Wortwahl zu minimieren. Die Anweisung lautete:

*„Folgen Sie dem vor Ihnen fahrenden Fahrzeug in einem Abstand von etwa 20 m. Überholen Sie dann nach dem Erreichen der Fahrbahnmarkierungen das vor Ihnen fahrende Fahrzeug und scheren Sie danach **spätmöglichst** wieder auf den rechten Fahrstreifen ein, jedoch rechtzeitig, so dass keine gefährliche oder*

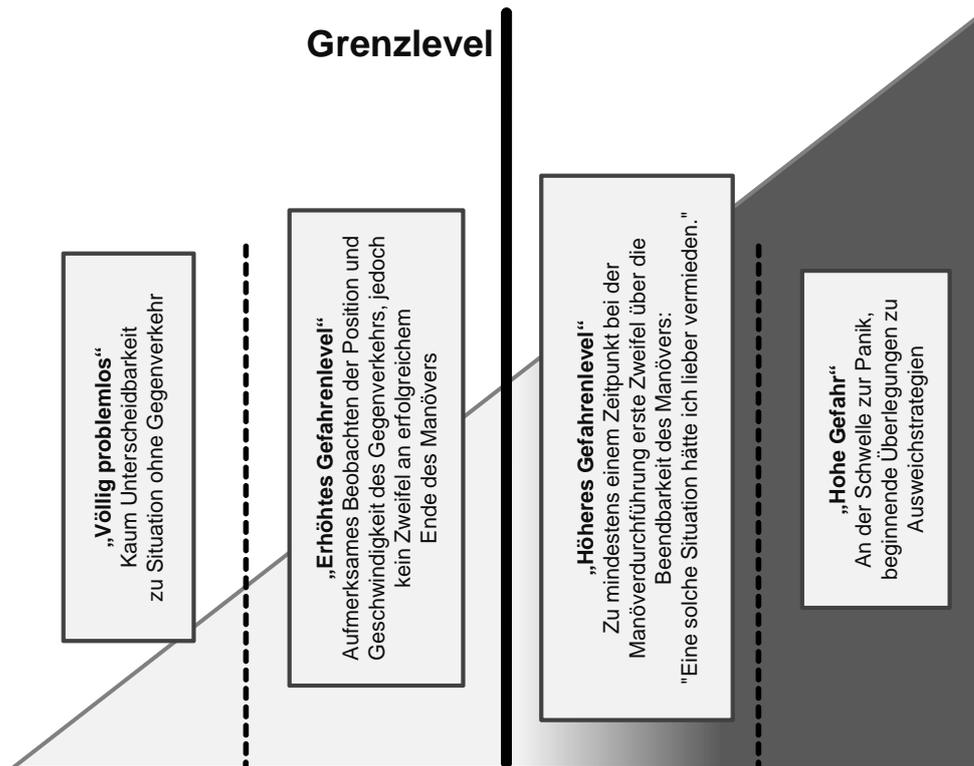


Abbildung 3.13: Maßstab zur Bewertung des kritischsten Momentes nach Durchführung eines Überholmanövers. Wiederholungen, die von den Probanden als rechts vom Grenzlevel eingestuft werden, wurden bei der Auswertung der Versuche nicht berücksichtigt, da es sich hierbei offenbar um eine Fehleinschätzung des Probanden handelt.

Ihnen unangenehme Situation entsteht. Fahren Sie ansonsten so, wie Sie das auf einer normalen Landstraße tun würden, d. h. z. B. mit Blinkerbetätigung beim Aus- und Einscheren.“

Der Startpunkt der beiden Fahrzeuge „A“ und „B“ wurde so gewählt, dass beim Erreichen des markierten Bereichs der Startbahn eine stationäre Folgefahrt sichergestellt war. Der Proband wurde gebeten, den Abstand der Folgefahrt zum zu überholenden Fahrzeug bei etwa 20 m zu wählen, ein Wert der in der Größenordnung realer Ausscherabstände liegt³³. Der Fahrer des Gegenverkehrs „C“ wählte sein Startmoment so, dass er etwa zur gleichen Zeit in den markierten Bereich einfuhr, wie das Fahrzeug „A“. Die Geschwindigkeit des zu überholenden Fahrzeugs „B“ lag bei 80 km/h, da dieser Wert als typisch für langsam fahrende Fahrzeuge auf einer Landstraße angenommen werden kann, die durch ihr Verhalten Überholmanöver der Folgefahrzeuge provozieren. Das entgegenkommende Fahrzeug fuhr entweder 60 oder 100 km/h, 3 mal die niedrigere Geschwindigkeit, 6 mal die höhere, woraus sich eine Gesamtwiederholungszahl von 9 ergibt. Der Fahrer des entgegenkommenden Fahrzeugs „C“ konnte die Reihenfolge der gewählten Geschwindigkeiten frei wählen, so dass – im Stil eines Doppelblindversuchs – neben dem Proband auch der Versuchsleiter nicht über die momentan gefahrene Gegenverkehrsgeschwindigkeit informiert war. Bei den Versuchen besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dass der Proband die Situation falsch

³³Hegeman (2008): Assisted Overtaking S. 24.

Oberer Grenzwert AOM

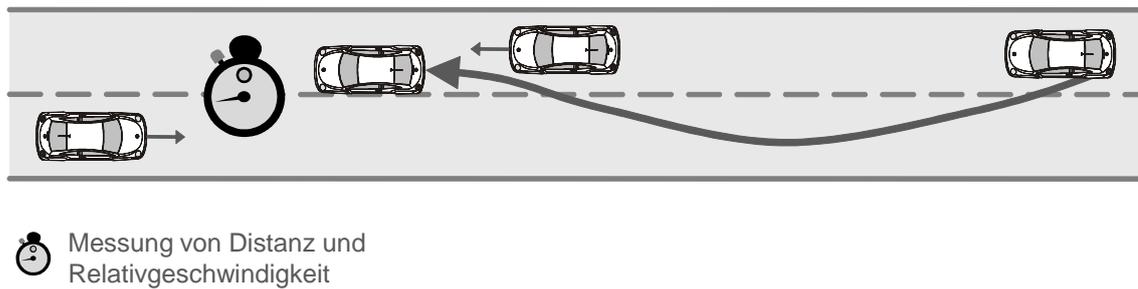


Abbildung 3.14: Aufbau des Probandenversuchs zur Ermittlung des oberen Grenzwertes des AOM. Der Testleiter gibt dem Proband eine Überholaufforderung, so wird ermittelt, welche Überholmanöver mit welchem zeitlichen End-Abstand zum Gegenverkehr von Fahrern noch als sicher eingestuft werden.

einschätzt, und den während der Versuchsdurchführung von ihm gewählten zeitlichen End-Abstand nach dem Versuch als zu gering einstuft. Um den Versuchspersonen eine solche Bewertung zu ermöglichen, wurden diese unmittelbar nach der Versuchsdurchführung befragt, wie sie die gerade erlebte Situation einstufen. Als Maßstab diente hierbei eine selbst entwickelte, 4-stufige Skala, um den entstandenen Bedrohungsdruck des Probanden im kritischsten Moment des Manövers einzuordnen, Abbildung 3.13. Alle Testläufe, bei denen eine Einstufung rechts der eingezeichneten Grenzlinie erfolgte, wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Ermittlung des oberen Grenzwertes für den AOM

Das Experiment zur Ermittlung eines oberen Grenzwertes für den AOM ähnelt von seinem Grundaufbau dem obigen. Wie in Abbildung 3.14 gezeigt, soll ein Überholvorgang durchgeführt werden, hier ohne die Anweisung, dass der Proband mit dem Testfahrzeug möglichst lange auf dem linken Fahrstreifen verbleiben soll. Vielmehr gibt der Testleiter dem Proband nach dem Losfahren und der Aufnahme einer stationären Folgefahrt hinter Fahrzeug „B“ zu einem bestimmten Zeitpunkt die Aufforderung, einen Überholvorgang zu beginnen, das entgegenkommende Fahrzeug „C“ fährt mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Der Proband hat die Anweisung, nur zu überholen, falls er die Situation als sicher einschätzt. Falls dies nicht der Fall ist, soll die Überholung unterbleiben und die Aufforderung ignoriert werden. Der genaue Wortlaut der Anweisungen lautet:

*„Folgen Sie dem vor Ihnen fahrenden Fahrzeug in einem Abstand von etwa 20 m. Zu einem bestimmten Zeitpunkt fordert Sie der Versuchsleiter zum Überholen auf. Führen Sie dieses durch, wenn Ihnen die Situation für einen Überholvorgang **absolut** ungefährlich erscheint. Halten Sie die Situation in diesem Augenblick dagegen für zu gefährlich, überholen Sie bitte nicht. Sie brauchen Ihre Entscheidung nicht zu begründen oder zu kommentieren. Bitte verhalten Sie sich wie gewohnt, also z. B. mit Blinkerbetätigung. Auch ein leichtes Nach-Links-Fahren, um den Gegenverkehr besser sehen zu können, ist gestattet.“*

Der Testleiter wählt den Zeitpunkt der Aufforderung nach seiner Erfahrung möglichst nah an der Grenzsituation, bei der der Fahrer indifferent zwischen der Entscheidung „Überholen“ oder „Nicht überholen“ steht. Das Experiment wird solange wiederholt, bis jeweils mindestens 5 Manöver durchgeführt und 5 Manöver zurückgewiesen wurden. Zusammen mit der „knappen“ Überholaufforderung durch den Testleiter lässt dies erwarten, dass ermittelt werden kann, welche Überholmanöver gerade noch durchgeführt werden und mit welchen zeitlichen End-Abständen zum Gegenverkehr diese assoziiert sind. Diese Daten repräsentieren die obere Grenze des *AOM*, da bei einer Parametrierung des Überholassistenten mit einem höheren Schwellwert in Situationen gewarnt werden würde, die der Fahrer noch als sicher einschätzt, ein *Falsch-Positiv*-Fehler würde entstehen. Das Signal des Testleiters besitzt neben der reinen Indikatorfunktion auch einen expliziten Aufforderungscharakter. Dieser Effekt ist beabsichtigt und imitiert eine inhärente Überholabsicht des Fahrers, die dieser beispielsweise nach einer längeren Fahrt hinter einem langsamfahrenden Fahrzeug vermuten lässt.

Ermittlung des minimalen Einscherabstandes

Für die Ermittlung des Einscherabstandes wird kein entgegenkommendes Fahrzeug benötigt. Der Proband fährt in diesem Versuch ein normales Serienfahrzeug ohne spezielle Messtechnik und überholt das Messfahrzeug. Der Testleiter – in dessen Fond – kann aus seiner Perspektive über die Informationen des Radar-Sensors und des parallel aufgezeichneten Videobilds einer Frontkamera sowohl den Zeitpunkt des Manöverendes (durch die Überschreitung der Mittellinie mit dem linken Hinterrad) als auch Abstand und Relativgeschwindigkeit des Probandenfahrzeugs zu diesem Zeitpunkt bestimmen, Abbildung 3.15. Das Messfahrzeug „B“ fährt in diesem Versuch mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h, die Versuchsperson wird angewiesen, bei einer vorher definierten Position an der Strecke den Überholvorgang zu beginnen und zu dessen Ende so knapp wie vertretbar wieder einzuscheren. Die zitierte Anweisung lautet:

*„Folgen Sie dem vor Ihnen fahrenden Fahrzeug in einem Abstand von etwa 20 m. Nach der Vorbeifahrt an den Pylonen überholen Sie das Fahrzeug vor Ihnen und scheren Sie nach dem Vorbeifahren **frühestmöglich** wieder ein, ohne allerdings den Fahrer des überholten Fahrzeugs zu gefährden oder zu belästigen.“*

Jeder Proband führte den Versuch insgesamt 5 mal durch.

3.4.7 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse aus den beschriebenen Experimenten zur Ermittlung der Auslegungsgrenzen des *AOM* sind in Abbildung 3.16 dargestellt. Die qualitativen Verläufe entsprechen den erwarteten aus Darstellung 3.3. Es werden jeweils die kumulierten Häufigkeiten gezeigt. Die beiden oberen Plots zeigen hellgrau das Ergebnis der Versuche „Unterer Grenzwert *AOM*“ für die verschiedenen Gegenverkehrsgeschwindigkeiten von 60 bzw. 100 km/h, der untere Plot repräsentiert die Gesamtheit aller Messwerte, die nicht nach dieser Geschwindigkeit differenziert wurden. In jedem Diagramm sind weiterhin die Resultate von zwei verschiedenen Auswertemethoden aufgeführt, zum einen wurden die kleinsten gemessenen TTC-Werte für jeden Proband ermittelt, zum anderen der Median aller gemessenen TTC's für jede Versuchsperson. Die ebenfalls eingefügten Verläufe für den Versuch „Oberer

Minimale Einscherdistanz

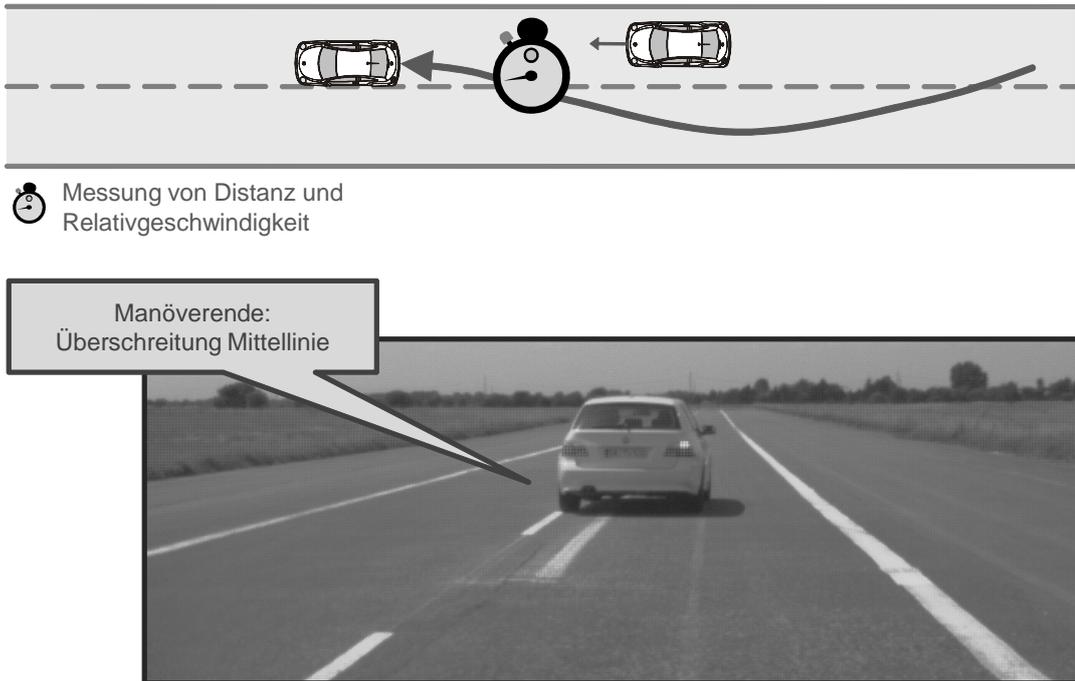


Abbildung 3.15: Beim Versuch zur Ermittlung der Einscherdistanzen überholt der Proband das Messfahrzeug, aus diesem heraus wird der Zeitpunkt des Manöver-Endes sowie die Größen Distanz und Relativgeschwindigkeit in diesem Moment bestimmt.

Grenzwert AOM “ sind für alle drei Darstellungen identisch, da hier keine unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Gegenverkehrs untersucht wurden und sich die Auswahl des kleinsten gemessenen TTC-Wertes direkt aus der Versuchsmethodik ergibt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Messungen bei niedriger Gegenverkehrsgeschwindigkeit zu höheren Werten tendieren. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich in der unzureichenden Wahrnehmung dieses Geschwindigkeitswertes zu finden, die Probanden nehmen offenbar hier eine höhere Geschwindigkeit des entgegenkommenden Fahrzeugs an, obschon dies im Versuch nicht der Fall ist. Ebenfalls kann den Verläufen entnommen werden, dass alle drei Kurven einen Schnittpunkt aufweisen, es existiert daher kein AOM , bei dem beide Fehlerarten einen Erwartungswert von 0 besitzen. Zur Identifikation eines einzelnen Wertes für eine konkrete Auslegungsempfehlung wird daher der Schnittpunkt der Kurven gewählt. Da die zu erwartenden Geschwindigkeiten des Gegenverkehrs auf Landstraßen ohne entsprechende Beschränkungen in der Größenordnung von 100 km/h liegt, ist für eine Betrachtung der realistischsten Fälle das mittlere Diagramm heranzuziehen. Wenn für die Ermittlung der unteren AOM -Grenze der Verlauf des kleinsten gemessenen Wertes zugrundegelegt wird, ergibt sich die Lage des AOM bei ca. 1,4 s. Die Nutzung des kleinsten gemessenen Wertes kann durch die Absicht motiviert werden, dass hier ein Grenzwert ermittelt werden soll.

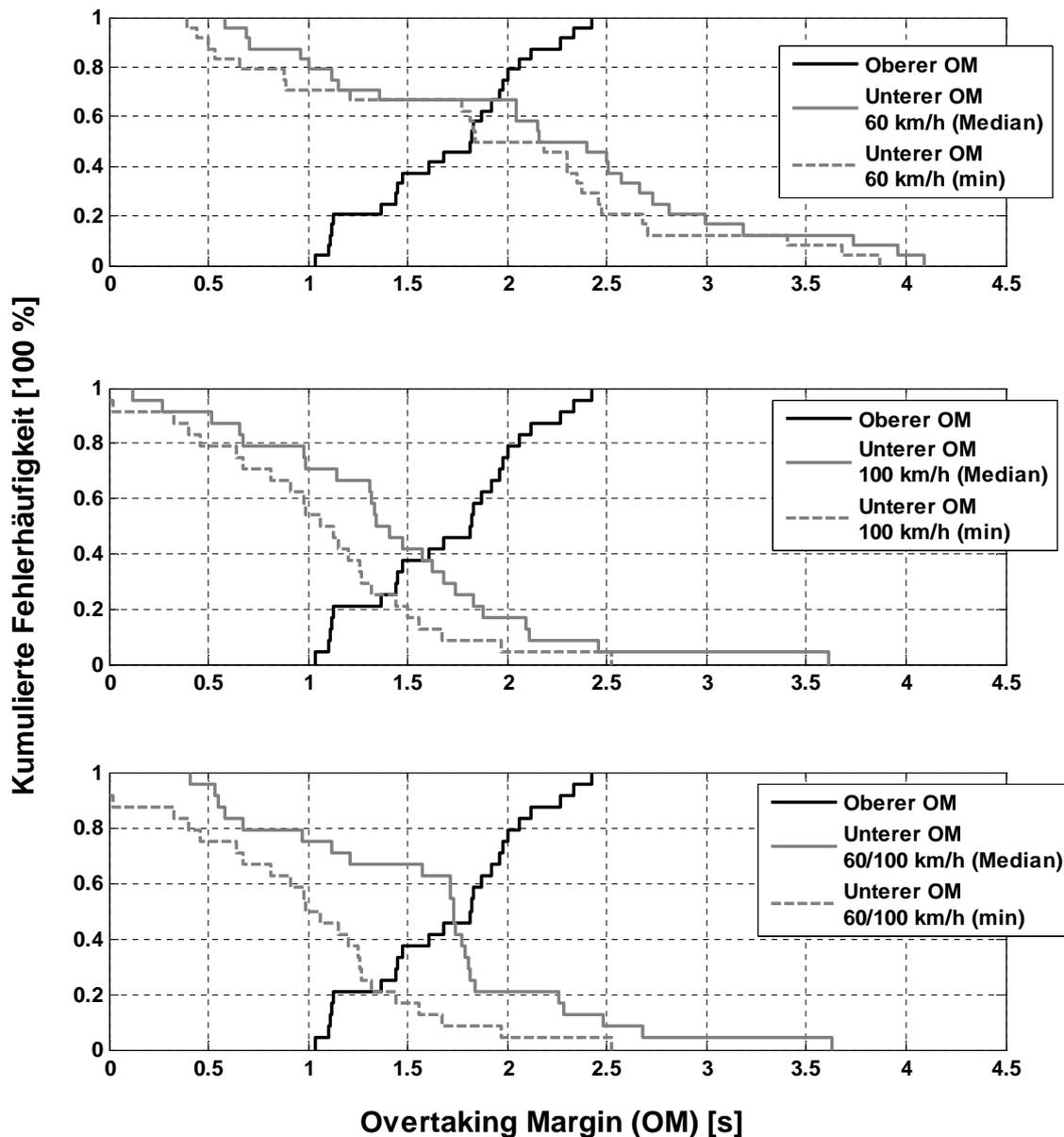


Abbildung 3.16: Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung der unteren bzw. oberen Schranken für die Wahl des AOM. Die Verläufe für die untere Grenze (hellgrau) sind nach der Auswertemethode unterschieden (Minimalwert oder Median der Wiederholungen eines Probanden), die drei Plots repräsentieren die unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Gegenverkehrs und das zusammengefasste Ergebnis ohne Unterscheidung nach der Gegenverkehrsgeschwindigkeit.

Aus der Betrachtung in Abbildung 3.16 kann somit kein globaler Wert für den *AOM* ermittelt werden, der die Auslegung eines Überholassistentensystems so gestattet, dass keine unplausiblen Systemreaktionen auftreten. Dies bezieht sich jedoch auf die Gesamtheit aller Fahrer bzw. die betrachtete Stichprobe. Ferner besteht die Möglichkeit, dass ein *fahrerindividueller AOM* existiert, der diese Anforderung erfüllt. Hierzu werden in Abbildung 3.17 die beiden in den Versuchen „Unterer Grenzwert *AOM*“ und „Oberer Grenzwert *AOM*“ ermittelten Werte für jeden Probanden aufgetragen. Eine *fahrerindividuelle* Wahl eines *AOM* ist dann möglich, wenn bei jeder Einzelbetrachtung die Werte der oberen Grenze über den

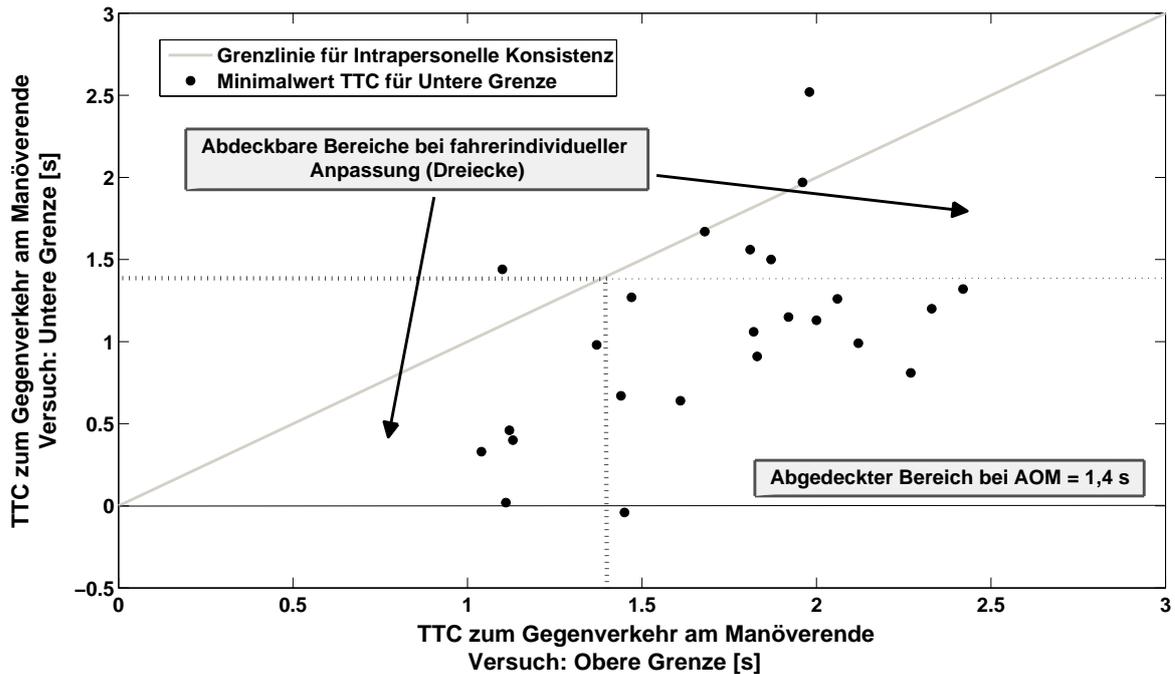


Abbildung 3.17: Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung einer oberen und unteren Grenze für den *AOM*: Jeder Punkt steht für ein Wertepaar eines Probanden. Die Marker repräsentieren die Resultate für die kleinste gemessene TTC aller Wiederholungen des Versuchs zur Ermittlung der unteren Grenze mit einer Gegenverkehrsgeschwindigkeit von 100 km/h. Punkte, die oberhalb der Winkelhalbierenden liegen, weisen auf eine intrapersonelle Inkonsistenz hin, für diese Personen lässt sich kein *AOM* ermitteln. Alle Personen, deren Marker unterhalb der Winkelhalbierenden liegen, können mit einem fahrerindividuell angepassten *OM* zufriedengestellt werden.

Werten der unteren Grenze liegen, da dann ein Bereich existiert, in dem ein für den jeweiligen Fahrer geeigneter Grenzwert liegt. Im Diagramm sind daher die beiden relevanten Werte gegeneinander aufgetragen, alle Punkte, die oberhalb der eingezeichneten Winkelhalbierenden liegen, weisen eine Verschränkung des Wertepaares auf, d. h. die obere Grenze aus den Versuchen liegt für diese Probanden tiefer als die untere. Dies sind Fälle einer in dieser Arbeit als *intrapersonelle Inkonsistenz* bezeichneten Situation, für diese Personen ist also tatsächlich kein *AOM* ermittelbar. Aus der Darstellung kann man erkennen, dass dies bei Betrachtung der kleinsten gemessenen TTC für den Versuch zur Ermittlung der unteren Grenze für 2 Personen bzw. etwa 8 % der Probanden der Fall war. Zusammengefasst ist also zu erwarten, dass dieser Anteil von Personen in der Grundgesamtheit nicht mit einer Systemauslegung nach dem hier dargelegten Muster zufriedengestellt werden kann, auch

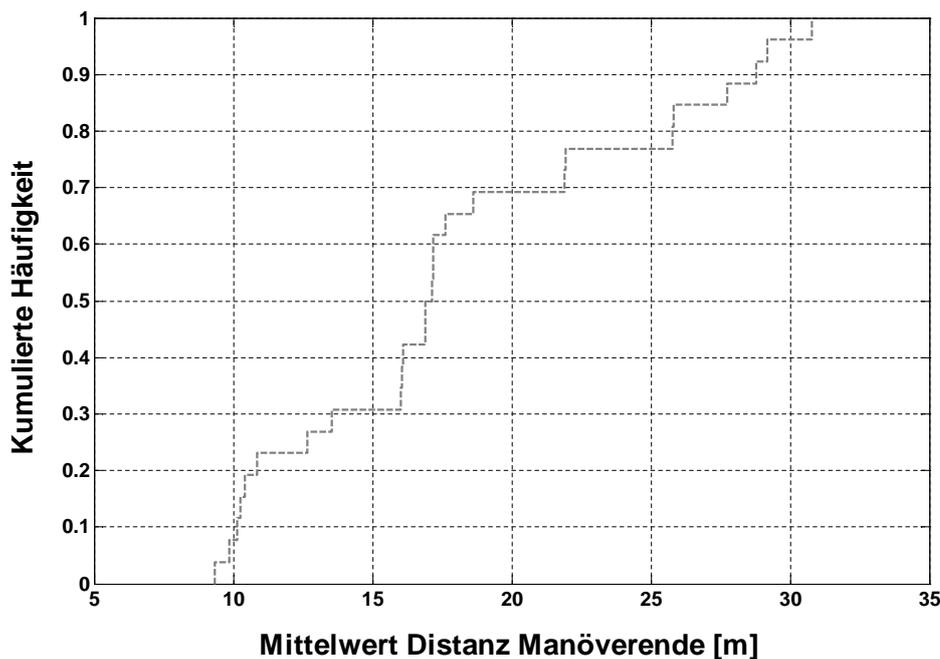


Abbildung 3.18: Kumulative Verteilungsfunktion der gemessenen Einscherabstände, die Probanden überholten ein mit 80 km/h fahrendes Fahrzeug.

wenn diese Auslegung fahrerspezifisch gewählt wird. Die vorliegende Datensituation zeigt, dass mindestens ein Teil der Probanden sich für die Durchführung eines Überholmanövers entscheidet, obschon die am Ende des Manövers resultierende TTC knapper ist als die TTC, die im Versuch zur Ermittlung der unteren AOM-Grenze als gerade noch akzeptabel bewertet wurde. Es wird vermutet, dass der Grund hierfür in der nicht anonymen, im Gespräch mit dem Testleiter kommunizierten Beurteilung der gerade gefahrenen Versuche zu suchen ist. Hier könnte der Effekt aufgetreten sein, dass durchgeführte Überholmanöver im Nachgang der Versuche als ungefährlich beurteilt wurden, da eine andere Angabe das Eingeständnis einer Fehlentscheidung mit sich gebracht hätte. Ein weiterer, denkbarer Grund liegt in der Eigenschaft des ermittelten unteren Grenzwertes, dass er tendenziell eine obere Abschätzung repräsentiert. Die Fahrsituation wird vom Proband vermutlich a-priori als „sicher“ beurteilt und es existieren zudem keine Belohnungsanreize für das Erreichen besonders knapper, zeitlicher Endabstände.

Abbildung 3.18 zeigt die kumulative Verteilungsfunktion der ermittelten Einscherabstände. Die Werte haben ein Spektrum von etwa 9 - 31 m. Der aufgezeichnete Verlauf gestattet nun eine Wahl dieses Parameters, der sich an der zugestandenen Toleranz gegenüber zu engem Einscheren orientiert. Würde für den Einscherabstand ein Wert im Bereich von etwa 26 m verwendet werden, wäre zu erwarten, dass ungefähr 20 % der Fahrer der Grundgesamtheit diese Distanz als zu knapp einschätzen würden, da sie in den Versuchen mit der entsprechenden Anweisung einen höheren Wert wählten. Die übrigen 80 % akzeptieren eine Situation in der sie durch die aktuelle Fahrsituation zum Einscheren gezwungen sind, da beim Versuch sogar noch niedrigere Werte gewählt wurden. Es ist denkbar, dass die Geschwindigkeit des Überholers sowie die Relativgeschwindigkeit zum überholten Fahrzeug am Manöver-Ende mit den Werten der gewählten Einscherdistanzen korreliert ist.

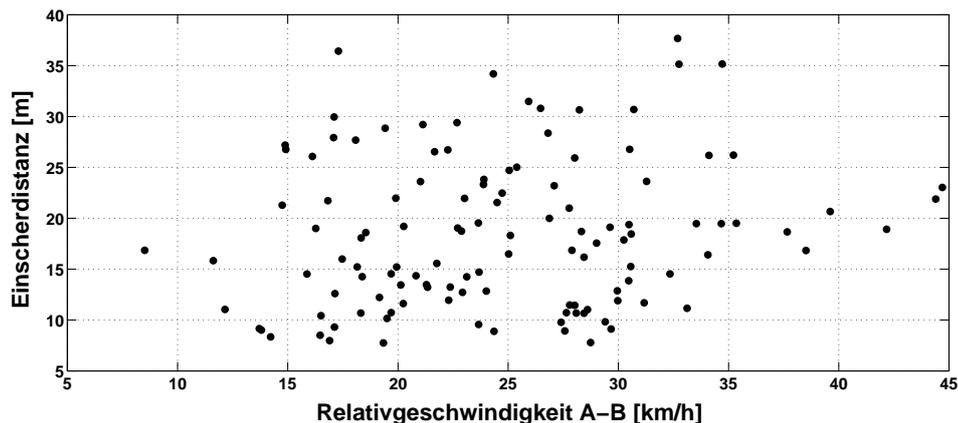


Abbildung 3.19: Einscherdistanzen, die von den Probanden gewählt wurden in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit des Überholers zum überholten Fahrzeug am Zeitpunkt des Überholmanöver-Endes.

Abbildung 3.19 zeigt die von jedem Proband gewählte Einscherdistanz jeweils gegen diese Größen aufgetragen. Offenbar zeigen die Größen keine Korrelation, eine entsprechende Hypothese ist auch durch den Mann-Kendall-Trendtest nicht wiederlegbar.

3.5 Fazit

Als Ergebnis liegt eine Probandenstudie zur Ermittlung der zentralen Parameter zur Auslegung eines Überholassistentensystemes vor. Insgesamt 24 Personen nahmen an den Versuchen teil. Die Auswahl der Probanden wurde unter Berücksichtigung der Kriterien Alter, Fahrpraxis und Geschlecht als gleichverteilt angestrebt.

Im Fokus der Untersuchungen steht der sogenannte *AOM*, der die Entscheidungsschwelle definiert, ab welcher prädizierten TTC am Ende des Überholmanövers eine Warnung vor einem gefährlichen Überholmanöver erfolgen soll oder nicht. Als Resultat konnte kein Wert ermittelt werden, der für die Gesamtheit aller Autofahrer die vollständige Vermeidung von *Falsch-Positiv*- bzw. *Falsch-Negativ*-Fehlern bei der Auslegung eines Systems nach dem in dieser Arbeit vorgestellten Muster erwarten lässt. Ein vorgeschlagener Wert, der die erwarteten Fehlerarten in eine gleichgewichtete Balance bringt, liegt bei einem *AOM* von 1,4 s. Mit dieser Parametrierung sollten sich nach den vorliegenden Versuchsergebnissen 60 % aller Fahrer mit einer solchen Auslegung in jeder Situation zufrieden zeigen. Die quantitative Darstellung der Ergebnisse gestattet zudem eine Systemauslegung mit verschobenen Präferenzen in Bezug auf die Tolerierbarkeit der beiden Fehlerarten. Auch konnte gezeigt werden, dass für ein Anteil von etwa 8 % der Probanden aufgrund der Versuchsergebnisse kein *AOM* ermittelt werden kann, da die Obergrenze für den *AOM* unterhalb der entsprechenden Untergrenze liegt. Ein weiterer wichtiger Parameter, der nur durch eine empirische Untersuchung valide bestimmbar ist, ist die minimale Einscherdistanz, bei der Fahrer die Bereitschaft zeigen, am Ende eines Überholmanövers hinter dem zu überholenden Fahrzeug einzuscheren. Mit einem ermittelten Wert von 27 m kann der Schluss gezogen werden, dass ein Anteil von etwa 80 % aller Autofahrer eine Einscherdistanz unterhalb dieser Schwelle akzeptiert. Es konnte keine Korrelation der fahrerindividuellen Einscherdistanz mit der

Relativgeschwindigkeit zwischen Überholer und überholtem Fahrzeug festgestellt werden.

4 Umfeldwahrnehmung

4.1 Anforderungen an Sensoren für ein Überholassistenzsystem

Offenbar erfordert ein Assistenzkonzept für Überholsituationen die Einschätzung der aktuellen Gefahrenlage. Als Grundlage hierfür ist die entsprechende Erfassung der an einem Überholvorgang beteiligten Fahrzeuge im Umfeld des Fahrzeugs notwendig. Anforderungen an eine solche Umfeldwahrnehmung umfassen dabei, neben der durch das Messprinzip des Sensors definierten Detektierbarkeit erforderlicher Größen, einen ausreichend bemessenen, geometrischen Sichtbereich, der die Position der zu detektierenden Objekte einschließt. Im Bereich Strahlsensorik, für den Einsatz als Datenquelle für Fahrerassistenzsysteme, wird dieser Sichtbereich üblicherweise durch Sichtweite sowie Öffnungswinkel in vertikaler und horizontaler Richtung charakterisiert, Abbildung 4.1. Da das Anwendungsfeld des Überholassistenzsystems auf Situationen beschränkt sein soll, die vom Fahrer grundsätzlich einsehbar sind, ist zu erwarten, dass die gesetzten Anforderungen in der horizontalen Dimension relativ gut erfüllbar sind. Ähnlich zeigt sich die Situation für den Erfassungsbereich in vertikaler Richtung. Die meisten marktverfügbaren Umfeldsensoren erreichen hier Werte, die eine problemlose Funktion auch auf Strecken mit größeren Steigungen oder Gefällen gestatten. Die mutmaßlich zentrale Anforderung wird somit durch die Sensor-sichtweite gebildet, da – um das grundsätzliche Ziel der möglichst frühen Warnung des

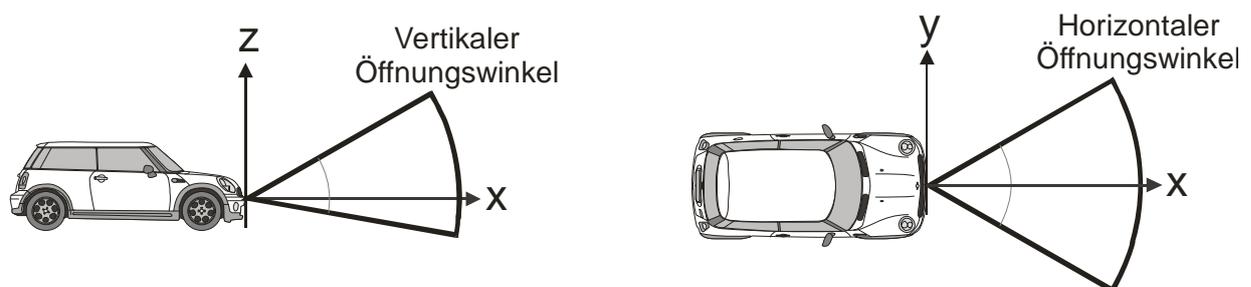


Abbildung 4.1: Vertikaler und horizontaler Öffnungswinkel als Bestandteile des Erfassungsbereiches eines Fahrzeug-Umfeldsensors.

Fahrers zu erreichen – eine Erfassung von entgegenkommenden Fahrzeugen erforderlich ist, die sich zu diesem Zeitpunkt noch in großer Distanz befinden. Daher werden in diesem Kapitel sowohl theoretische Betrachtungen als auch umfassende praktische Experimente im Bereich dieses Anforderungsfelds Sensorsichtweite beschrieben und durchgeführt.

In der Literatur existieren nur wenige Arbeiten, die zur Bestimmung einer notwendigen Sichtweite herangezogen werden können. Häufig liegen lediglich grobe Abschätzungen vor, unter welchen Randbedingungen eine Überholmöglichkeit besteht oder in welchen Situationen sich ein solches Manöver verbietet. Das hier skizzierte Assistenzsystem für gefährliche

Überholmanöver soll in den Fällen aktiv werden, in denen sich Gegenverkehr zu Überholbeginn in Distanzen befindet, die mehrheitlich unterhalb der zum sicheren Überholen benötigten Sichtweite liegen. Insofern können Untersuchungen aus Verkehrsbeobachtungen zum Überholverhalten von Fahrern im öffentlichen Straßenverkehr Hinweise darauf geben, welche Mindest-Sichtweiten von Autofahrern für die Bewertung eines Überholmanövers als „sicher“ gewünscht werden. OTTEN UND HABERMEHL berichten, dass sich auf Grundlage von Daten aus einer solchen Verkehrsbeobachtung erkennen lässt, dass nur wenige Überholvorgänge stattfinden, bei denen die Sichtweite am Beginn des Überholvorgangs einen Wert von 450 m unterschreitet. Bei der Auswertung von Simulatorversuchen konnte ein entsprechender Wert von etwa 400 m festgestellt werden¹. Da die hier durchgeführte Verkehrsbeobachtung jedoch nicht explizit knappe Überholmanöver fokussiert, sind diese Zahlen lediglich als Anhaltswert für eine untere Schranke der benötigten Sensorsichtweiten zu sehen, da offenbar bei höheren Sichtweiten Überholmanöver in größerer Zahl durchgeführt werden, die als nicht kritisch anzunehmen sind. Weiterhin ist ein isolierter Wert für die benötigte Sensorsichtweite nicht plausibel, da hier eine Vielzahl von Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind, so zum Beispiel die Beschleunigungsfähigkeit des EGO-Fahrzeugs. Die Ergebnisse der genannten Untersuchung dienen daher der Zielrichtung der betrachteten Veröffentlichungen für die Anlage von Straßen, die die Ermittlung pauschaler Werte für die Gesamtbetrachtung von Überholvorgängen und daher einer Vielzahl von Fahrzeugen ermitteln soll. Exakte Betrachtungen benötigter Überholsichtweiten aus der Perspektive eines einzelnen Fahrzeugs standen nicht im Zentrum der Forschung, für die Ableitung von Anforderungen an eine Umfelderkennung für ein Überholassistenzsystem sind diese jedoch notwendig. Weitere Literatur zu diesem Thema existiert zur Definition straßenbaulicher Voraussetzungen für sichere Überholvorgänge: In den *Richtlinien zur Anlage von Straßen, Teil I: Linienführung (RAS-L)*², der Grundlage für den Straßenbau in der Bundesrepublik Deutschland, werden die benötigten Sichtweiten, die dem Fahrer für einen sicheren Überholvorgang geboten werden müssen, als „Überholsichtweite“ angegeben. Diese wird als Summe der Strecken

- Weg des Überholers,
- Weg des nächsten Fahrzeugs des Gegenverkehrs während der Überholdauer und
- Sicherheitsabstand zwischen Überholer und nächstem Gegenverkehrsfahrzeug

betrachtet und tabellarisch in Abhängigkeit von der sogenannten Geschwindigkeit v_{85} angegeben (Tabelle 4.1). Da diese Werte auf einem sehr einfachen Überholmodell basieren und eine prinzipielle Überholmöglichkeit für eine Vielzahl von verschiedenen Fahrzeugen sicherstellen soll, sind die Sichtweiten vermutlich an den notwendigen Werten für Fahrzeuge mit geringer Motorleistung orientiert. Somit eignen sich die hier aufgeführten Werte nicht für die Auslegung eines Assistenzsystems, das sich an der konkreten Leistungsfähigkeit des zugrundeliegenden Fahrzeugs orientieren sollte, um eine valide Systemreaktion zu erreichen. Zusammenfassend sind alle bisherigen Betrachtungen als Grundlage für die quantitative Ermittlung von erforderlichen Mindestreichweiten für ein Überholassistenzsystem nicht geeignet.

¹Otten/Habermehl (1989): Überholverhalten von Kraftfahrern S. 43.

²FGSV (1995): RAS-L S. 34.

Tabelle 4.1: Erforderliche Überholsichtweiten für Straßen der Kategoriegruppe A (außerhalb bebauter Gebiete, anbaufrei und mit Verbindungsfunktion), Quelle: Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L), 1995.

v_{85} [km/h]	S_u [m]
60	475
70	500
80	525
90	575
100	625

Ein generell erstrebenswertes Assistenzziel bei Auftreten einer gefährlichen Situation liegt offenbar in einer Warnung des Fahrers zu einem möglichst frühen Manöverzeitpunkt. Dieser Zeitpunkt wird durch den Überholbeginn gebildet, da erst in diesem Moment eine konkrete Überholabsicht vorliegt, auf die sich die Warnung beziehen kann. Spätestens jedoch muss die Erkennung der gefährlichen Situation kurz vor Eintritt in die in Abschnitt 2.3 definierte, dritte Überholphase *Möglichkeit eines kritischen Überholabbruchs* stattfinden, wenn die Situation vermieden werden soll, dass der Fahrer als Reaktion auf die Warnung zu einem *kritischen Abbruch* gezwungen ist.

Neben der notwendigen Mindestreichweite in Bezug auf den Gegenverkehr kann eine ähnliche Betrachtung für den Bereich der zu überholenden Fahrzeuge abgeleitet werden. Hier ist das Detektionsziel die Erkennung geeigneter Überholziele zwischen den vorausfahrenden Fahrzeugen auf dem rechten Fahrstreifen. Da in der Zeit, bis der Herannahende und der Überholer die gleiche longitudinale Distanz aufweisen, nur ein bestimmter Weg relativ zu den überholenden Fahrzeugen zurückgelegt werden kann, ist die Erfassung noch weiter entfernt liegender Bereiche nicht notwendig. Abbildung 4.2 zeigt beide abzuleitenden Detektionsreichweiten im Vergleich. Die Mindestreichweite für die Erfassung von Gegenverkehr resultiert aus der Bedingung, dass ein ausreichend großer Bereich auf dem Gegenverkehrsfahrstreifen überblickt werden muss, so dass Fahrzeug „A“ frühzeitig gewarnt werden kann, sobald eine gefährliche Situation durch ein Gegenverkehrsfahrzeug entsteht. Wird nun ein solches Fahrzeug „C“ detektiert, so kann ein Bereich auf dem rechten Fahrstreifen abgeleitet werden, der für das Fahrzeug „A“ in der momentanen kinematischen Situation erreichbar ist, bevor sich der Gegenverkehr auf eine nicht zu unterschreitende Schwelle angenähert hat. Alle potentiell erreichbaren Überholziele liegen also im Bereich der in der Zeichnung als *Detektionsdistanz: Überholziele* markierten Distanz. Per Definition liegt dieser Wert immer niedriger als der entsprechende Wert für die Mindestreichweite für Gegenverkehr, insbesondere aufgrund möglicher Differenzen bei den Anforderungen an Umfeldsensoren (Nah-, bzw. Fernbereich) ist eine separate Betrachtung hilfreich.

4.1.1 Detektionsdistanz Gegenverkehr

Modellbildung

Die Mindestreichweite für die Erfassung von Gegenverkehrsfahrzeugen, die ein Umfeldsensor aufweisen muss, um die rechtzeitige Erkennung einer gefährlichen Situation zu ermöglichen, kann aus einfachen kinematischen Zusammenhängen ermittelt werden. Der Begriff *rechtzeitig* bezieht sich dabei auf die Möglichkeit des Abbruchs des Überholmanövers durch

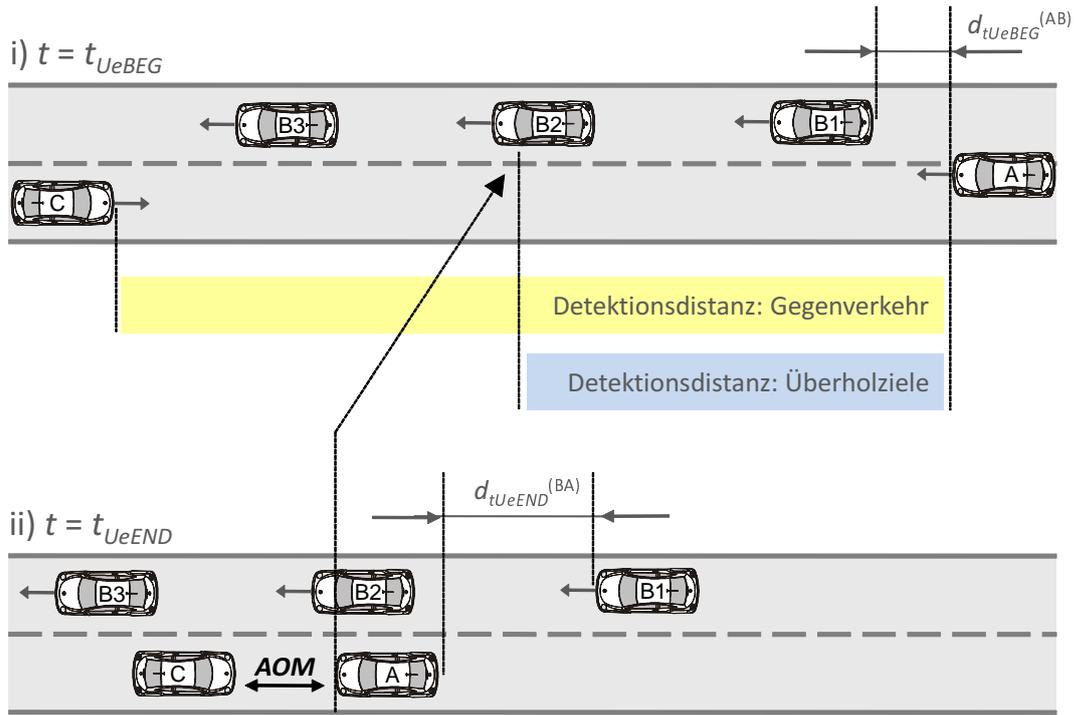


Abbildung 4.2: Erforderliche Detektionsdistanzen

den Fahrer. Diese Reichweite setzt sich aus verschiedenen Elementen zusammen. Zunächst wird ein wesentlicher Anteil durch die Strecke gebildet, die das EGO-Fahrzeug bis zum Überhol-Ende, mit t_{UeEND} bezeichnet, zurücklegen muss. Hinzu kommt der Weg, den das entgegenkommende Fahrzeug in dieser Zeitspanne zurücklegt. Schließlich muss noch die Distanz berücksichtigt werden, die zwischen dem Überholer und dem Gegenverkehr am Ende des Manövers nicht unterschritten werden darf. Diese wird aus dem AOM und der Relativ-Geschwindigkeit der beteiligten Fahrzeuge zum Manöverende berechnet. Die Überholdauer Δt_{UeDAU} , die durch die Zeitpunkte t_{UeBEG} und t_{UeEND} beschrieben wird, hängt von der – durch Beschleunigung des Fahrzeugs „A“ veränderlichen – Relativgeschwindigkeit des Überholers bezüglich des zu überholenden Fahrzeugs

$$v_{rel}^{(AB)}(t) = v^{(A)}(t) - v^{(B)} \quad (4.1)$$

ab. Das Ende des Überholmanövers t_{UeEND} wird erreicht, wenn das Integral dieser Relativgeschwindigkeit $v_{rel}^{(AB)}$ über der Zeit der von „A“ gegenüber „B“ aufzuholenden Strecke gleicht. Die Aufholstrecke d_{AHS} lässt sich aus dem anfänglichen Abstand $d_{t_{UeBEG}}^{(AB)}$, dem Einschleppabstand $d_{t_{UeEND}}^{(BA)}$ und den Längen der Fahrzeuge „A“ und „B“ zu

$$d_{AHS} = d_{t_{UeBEG}}^{(AB)} + l^{(B)} + d_{t_{UeEND}}^{(BA)} + l^{(A)} \quad (4.2)$$

berechnen. Die Überholdauer ergibt sich somit durch Auswertung des bestimmten Integrals

$$d_{AHS} = \int_{t_{UeBEG}}^{t_{UeEND}} v_{rel}^{(AB)}(\tau) d\tau. \quad (4.3)$$

Der Abstand des Überholten „B“ zum Gegenverkehr lässt sich in Abhängigkeit der Zeit durch die Formel

$$d^{(BC)}(t) = d_{t_{\text{SUeZ}}}^{(BC)} + \int_t^{t_{\text{SUeZ}}} (v^{(B)}(\tau) + v^{(C)}(\tau)) d\tau \quad (4.4)$$

bestimmen. Der Zeitpunkt t_{SUeZ} bezeichnet dabei den Augenblick, zu dem die beiden Fahrzeuge „B“ und „C“ gerade noch so weit voneinander entfernt sind, dass Fahrzeug „A“ auf den rechten Fahrstreifen einscheren kann. Dieser ergibt sich aus

$$d_{t_{\text{SUeZ}}}^{(BC)} = d_{t_{\text{UeEND}}}^{(BA)} + l^{(A)} + d_{t_{\text{UeEND}}}^{(AC)} = d_{t_{\text{UeEND}}}^{(BA)} + l^{(A)} + AOM \cdot v_{\text{rel}}^{(AC)}(t_{\text{UeEND}}). \quad (4.5)$$

Für $t_{\text{SUeZ}} = t_{\text{UeEND}}$ ist der Grenzfall erreicht, bei dem die Zeit gerade für den Überholvorgang ausreicht. Für die Erkennung aller Fälle, für die die verbleibende Zeit zum Überholen nicht ausreicht ($t_{\text{SUeZ}} \leq t_{\text{UeEND}}$), ist es also aus Sicht des Fahrzeugs „A“ notwendig, den gesamten Fahrstreifen über die Distanz $d^{(BC)}(t_{\text{UeBEG}})$ über das zu überholende Fahrzeug hinaus sensieren zu können. Als Gleichung zur Berechnung der Mindestreichweite der Umfelderkennung zu einem beliebigen Zeitpunkt t ergibt sich somit

$$R_{S,I}(t) = d^{(AB)}(t) + l^{(B)} + d^{(BC)}(t) \quad (4.6)$$

Dabei bezeichnet $d^{(AB)}(t)$ den aktuellen Abstand zwischen dem überholenden und dem überholten Fahrzeug und $l^{(B)}$ die Länge des zu überholenden Fahrzeugs.

Sichtweitenanforderungen zu Überholbeginn

Mit Gleichung 4.6 kann, bei Kenntnis der Geschwindigkeitsverläufe der beteiligten Fahrzeuge, die Anforderung an die Sensorreichweite bestimmt werden. Maßgebliche Einflussgrößen für diesen Wert liegen in den Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge „B“ und „C“, deren Verläufe, gemäß den Annahmen im idealtypischen Überholvorgang, als konstant angenommen wurden. Als direkte Folge vereinfacht sich das Integral in Formel 4.4 zu einer einfachen Multiplikation. Weiterhin wird zur Berechnung der Mindestreichweite der Zeitpunkt des Überhol-Endes t_{UeEND} benötigt. Hierzu muss Gleichung 4.3 gelöst werden. Mit $v^{(B)} = \text{const.}$ und der Modellierung von $v^{(A)}(t)$ mit konstanter Beschleunigungsleistung (Abschnitt 2.2.1) und $t_{\text{UeBEG}} = 0$ resultiert für die Aufholstrecke

$$\begin{aligned} d_{\text{AHS}} &= \int_0^{t_{\text{UeEND}}} v_{\text{rel}}^{(AB)}(\tau) d\tau \\ &= \int_0^{t_{\text{UeEND}}} v^{(A)}(\tau) d\tau - v^{(B)} t_{\text{UeEND}} \\ &= \frac{m}{3P_{\text{netto}}} \left(\left(v_0^{(A)2} + 2 \frac{P_{\text{netto}}}{m} t_{\text{UeEND}} \right)^{\frac{3}{2}} - v_0^{(A)3} \right) - v^{(B)} t_{\text{UeEND}}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Um die Zeit t_{UeEND} zu bestimmen, muss nach dieser Variablen aufgelöst werden. Dieser Vorgang wurde mit MATHEMATICA durchgeführt, einer Software zur symbolischen Berechnung. Als Ergebnis liegt ein Ausdruck

$$t_{\text{UeEND}} = f(m, P_{\text{netto}}, v_0^{(A)}, v^{(B)}, d_{\text{AHS}}) \quad (4.8)$$

vor, die detaillierte Formel ist Anhang C zu entnehmen. Mit den dargestellten Berechnungsvorschriften können nun Mindestreichweiten ermittelt werden, die eine grundsätzlich rechtzeitige Detektion von gefährlichen Situationen zu einem Zeitpunkt kurz nach Überholbeginn gewährleisten. Die unter Berücksichtigung aller Fahrwiderstände zur Fahrzeugbeschleunigung nutzbare Leistung P_{netto} besitzt offenbar einen maßgeblichen Einfluss auf diese Reichweite. Für die folgenden Berechnungen wurden Leistungswerte verwendet, die sich in empirischen Messfahrten als typisch für Fahrzeuge mit bestimmten Motor-Nennleistungen erwiesen. Abbildung 4.3 stellt als Ergebnis die benötigten Sensorreichweiten für zwei Fahrzeuge mit signifikant unterschiedlicher Motorleistung gegenüber, jeweils in Abhängigkeit der Geschwindigkeiten des zu überholenden und des entgegenkommenden Fahrzeugs. Orientiert an der Klassifikationsweise des Kraftfahrtbundesamts³ wurde dem

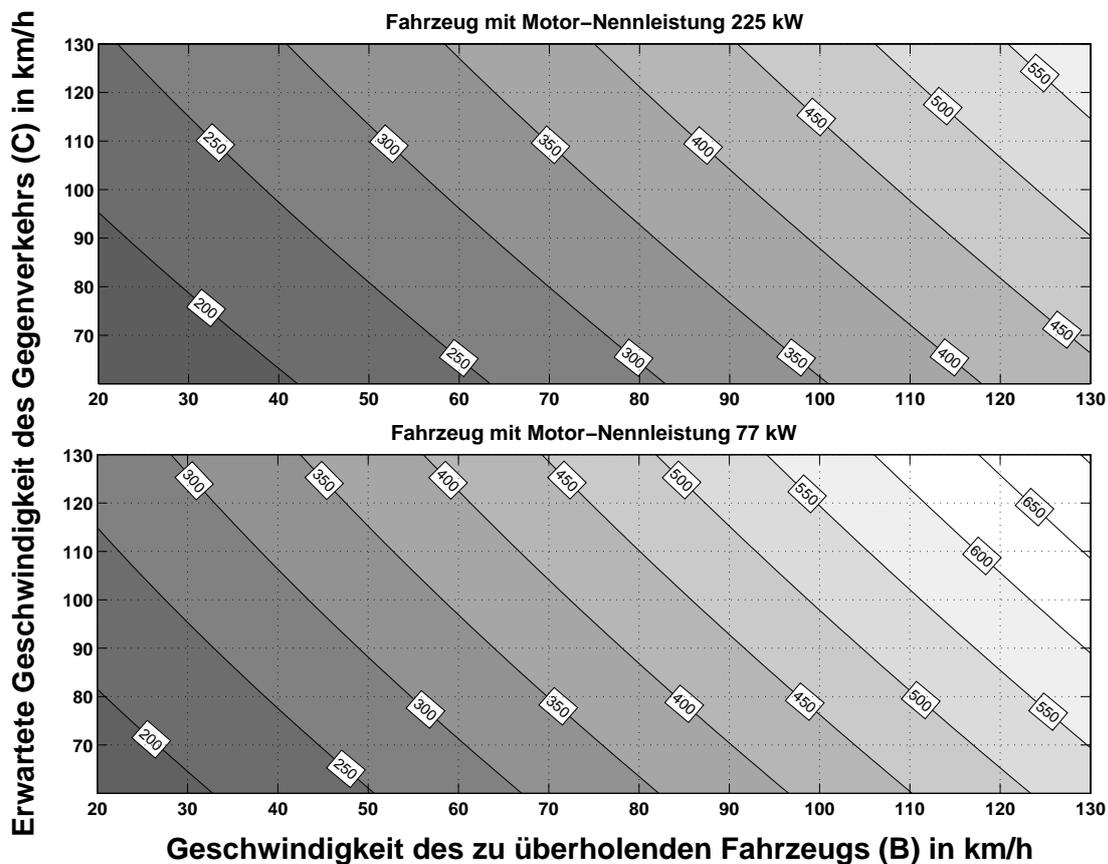


Abbildung 4.3: Isolinien gleicher Anforderungen an die Sensorreichweite (m), um Gegenverkehr ausreichend frühzeitig detektieren zu können, so dass der Fahrer im Fall einer Gefahr bereits kurz nach Überholbeginn gewarnt werden kann.

oberen Bild ein Pkw der oberen Mittelklasse mit einer Motor-Nennleistung von 225 kW zugrundegelegt, repräsentiert also ein als leistungsstark zu bezeichnendes Fahrzeug. Das untere Diagramm zeigt die entsprechenden Werte für ein typisches Fahrzeug der Kompaktklasse und einer Nennleistung von 77 kW. Aufgezeichnet sind Linien gleicher Anforderung an die Sensorsichtweite, unter der Prämisse, dass die Erkennung des Gegenverkehrs direkt

³KBA (2010): Fahrzeugsegmente.

nach Überholbeginn möglich sein soll. Für die Darstellung wurden die Parameter

$$AOM = 1,4s \quad (4.9)$$

$$d^{(AB)}(0) = 10m \quad (4.10)$$

$$d^{(BA)} = 10m \quad (4.11)$$

$$v^{(A)}(0) = v^{(B)} \quad (4.12)$$

$$l^{(A)} = 5m \quad (4.13)$$

$$l^{(B)} = 5m \quad (4.14)$$

verwendet. Erwartungsgemäß liegen die erforderlichen Werte beim schwächer motorisierten Fahrzeug im Mittel deutlich höher als beim Fahrzeug mit dem leistungsstärkeren Motor. Während beispielsweise in der oberen Abbildung für die Überholung eines Fahrzeugs mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h bei einer erwarteten Gegenverkehrsgeschwindigkeit von 120 km/h eine Reichweite von ca. 400 m notwendig ist, nähert sich dieser Wert in der Darstellung des Kompaktwagens bereits einer Distanz von 500 m.

4.1.2 Detektionsdistanz Überholziele

Für die Erkennung eines Überholziels sind, neben der Erfassung von Gegenverkehrsfahrzeugen, jene Fahrzeuge von Bedeutung, die sich auf dem rechten Fahrstreifen befinden. Um in einer Überholsituation das unmittelbar voranfahrende Fahrzeug „B“ überholen zu können, ist es notwendig, erkennen zu können, ob sich dahinter eine ausreichend große Lücke zum Beenden des Manövers befindet. Die für eine derartige Einschätzung benötigte Mindest-Sichtweite auf den rechten Fahrstreifen ist offenbar identisch mit der in Abschnitt 4.1.1 diskutierten Aufholstrecke

$$d_{AHS} = d_{t_{UeBEG}}^{(AB)} + l^{(B)} + d_{t_{UeEND}}^{(BA)} + l^{(A)}. \quad (4.15)$$

Um Fahrzeuge erkennen zu können, die sich in diesem Bereich befinden und ein Wiedereinscheren am Ende des Überholmanövers behindern, ist an die Umfelderkennung grundsätzlich die Anforderung der Abdeckung dieser Sichtweite zu stellen. Über diese Entfernung hinaus können hinter dem Fahrzeug aber noch weitere Überholziele existieren, die vom Überholer unter bestimmten kinematischen Randbedingungen erreicht werden können. Zu diesem Zweck kann die maximale Überholzeit bestimmt werden, die der Gegenverkehr noch zulässt, bis eine TTC zum Gegenverkehr von AOM erreicht wird. Der Wert der TTC in Abhängigkeit von der Zeit mit einem Betrachtungsbeginn bei $t = 0$ berechnet sich zu:

$$TTC^{(AC)}(t) = \frac{d^{(AC)}(t)}{v_{rel}^{(AC)}(t)} = \frac{d_{t_{UeBEG}}^{(AC)} - v^{(C)}t - \frac{m}{3P_{netto}} \left((v_0^{(A)})^2 + \frac{2P_{netto}t}{m} \right)^{\frac{3}{2}} - v_0^{(A)3}}{v^{(C)} + (v_0^{(A)2} + \frac{2P_{netto}t}{m})^{\frac{1}{2}}}. \quad (4.16)$$

Dieser Ausdruck kann mit MATHEMATICA nach der Zeit t aufgelöst werden, es resultiert eine Funktion

$$t_{SAUeZ} = f(m, P_{netto}, v_0^{(A)}, v^{(B)}, AOM). \quad (4.17)$$

Diese Zeit t_{SAUeZ} repräsentiert die maximale Zeit, die der Überholvorgang dauern darf, damit der AOM nicht unterschritten wird. Mit Ausdruck 2.8 kann mit

$$R_{S,r} = \frac{m}{3P_{netto}} \left((v_0^{(A)})^2 + 2\frac{P_{netto}}{m}t_{SAUeZ} \right)^{\frac{3}{2}} - v_0^{(A)3} - v^{(B)}t_{SAUeZ} \quad (4.18)$$

die Strecke berechnet werden, die das Fahrzeug „A“ in dieser Zeit relativ zu den – mit konstanter Geschwindigkeit „B“ angenommenen Fahrzeugen – aufholt. Dies entspricht der Maximalsichtweite auf den rechten Fahrstreifen, der für die Detektion potentieller Überholziele relevant ist. In Abbildung 4.4 sind Isolinien gleicher Distanzen dargestellt, die

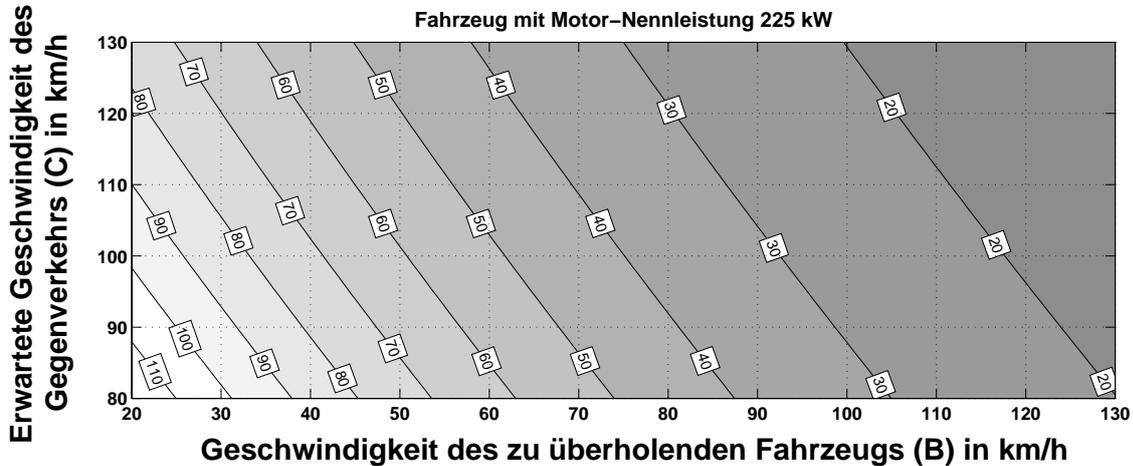


Abbildung 4.4: Reichweiten zur Erkennung von Überholzielen bei einer Detektionsdistanz für Gegenverkehr bis 400 m.

für die Erkennung von Überholzielen relevant sein können. Deutlich ist zu erkennen, dass die Bereiche, in denen diese Lücken bedeutsam werden, mit sinkenden Geschwindigkeiten der Fahrzeuge „B“ und „C“ größer werden. Verursacht wird dieser Umstand durch die in diesem Fall kürzere Überholdauer bzw. längere verfügbare Zeit, bis der Gegenverkehr auf eine kritische zeitliche Distanz herangefahren ist. Für repräsentative Szenarien liegen die Werte in der Größenordnung von etwa 40 m, bei besonders niedrigen Geschwindigkeiten $v^{(B)}$ und $v^{(C)}$ ergeben sich noch Werte im Bereich von 100 m. Bei derartigen Situationen besteht jedoch eine zunehmende Unsicherheit über die tatsächliche Erreichbarkeit der fernen Überholziele, da sich die Position der zu überholenden Fahrzeuge am Manöver-Ende aufgrund der tendenziell langen Überholdauer nur ungenau schätzen lässt.

Der prinzipiell zu beobachtende Effekt zeigt zusammenfassend, dass für die Detektierbarkeit der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen deutlich geringere Anforderungen als bei der Betrachtung von Gegenverkehr bestehen, die zumeist auch mit kamerabasierten Sensoren abgedeckt werden könnten, so dass deren prinzipielle Stärke zur Identifikation von freien Flächen zum Tragen kommen kann.

4.1.3 Betrachtung gekrümmter Straßenverläufe

In horizontaler Ausdehnung weist der Erfassungsbereich üblicher Umfeldsensoren im Automobilbereich typischerweise eine Charakteristik auf, die näherungsweise über die Form eines Kreissektors modellierbar ist. In einem solchen Modell kann der Bereich, in dem Objekte detektierbar sind, durch die Parameter Reichweite r_{\max} und den einseitigen horizontalen Öffnungswinkel θ hinreichend beschrieben werden. In der vertikalen Dimension sind die notwendigen Öffnungswinkel zum Ausgleich von Nickbewegungen des EGO-Fahrzeugs sowie zur zuverlässigen Detektion von Objekten in Fahrsituationen mit Kuppen und Senken üblicherweise ausreichend dimensioniert. Aus diesem Grund beschränken sich

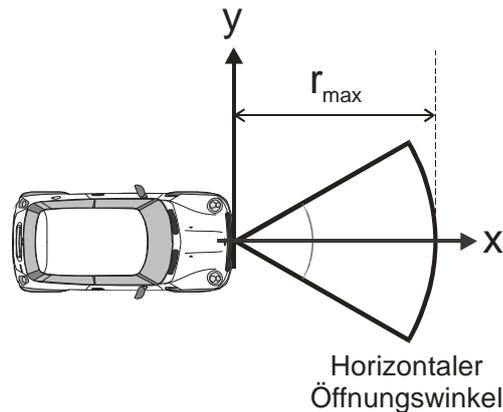


Abbildung 4.5: Horizontaler Erfassungsbereich eines Strahlsensors, modelliert als Kreissektor.

die folgenden Betrachtungen auf den Sensor-Erfassungsbereich in horizontaler Richtung, in Abbildung 4.5 ist dieser Bereich wie oben beschrieben gezeigt.

Durch einen horizontalen Öffnungswinkel $\theta > 0$ wird auch die Erfassung von Objekten auf Straßenverläufen möglich, die eine Krümmung $\kappa \neq 0$ aufweisen. Im Folgenden werden die Auswirkungen einer solchen Krümmung auf die resultierende Sensorreichweite betrachtet und quantitativ bestimmt.

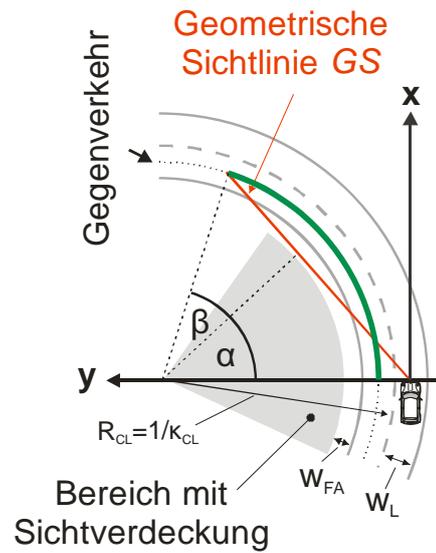
In der oberen Skizze in Abbildung 4.6 ist eine Kurvensituation dargestellt: Das EGO-Fahrzeug ist in der Mitte des eigenen Fahrstreifens positioniert, der eine Breite w_L besitzt, dabei liegt der angenommene Montageort des Strahlsensors in der Mitte der Fahrzeugfront und markiert gleichzeitig den Ursprung des verwendeten Koordinatensystems. Als Maßstab für den Vergleich der berechneten Sichtweiten wird der vom Fahrer des EGO-Fahrzeugs mindestens einsehbare Bereich gewählt. Dieser Bereich ergibt sich durch den freien Sichtbereich neben jeder Fahrbahnseite, der gemäß sogenannter „Regelquerschnitte“ definiert ist und auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland zumindest aus den Elementen „Bankett“ und „Seitentrennstreifen“ zusammengesetzt sein soll. Regelwerte für die anzunehmenden Abmessungen dieser Straßenbestandteile sind in der „Richtlinie zur Anlage von Straßen“ festgelegt, von denen bei der Neuanlage von Verkehrswegen im Normalfall nicht abgewichen werden soll⁴. Auf der Straßenseitenfläche jenseits dieses Bereiches muss mit Sichtverdeckung oder -behinderung gerechnet werden, hierzu zählen beispielsweise Lärmschutzwände, hochstehende Agrarbepflanzung oder auch ein geschlossen bewaldetes Gebiet. Im skizzierten Modell ist der Bereich der freien Sicht am Rande der Fahrbahn durch den Parameter w_{FA} berücksichtigt. Der gekrümmte Verlauf des Gegenverkehrsfahrstreifens, der für die hier zu betrachtende Detektion von Gegenverkehr relevant ist, kann durch die Sichtbehinderung nur noch in einer geringeren Distanz vom Fahrer des EGO-Fahrzeugs überblickt werden. Die seitliche Sichtbeschränkung wird als *Geometrische Sichtlinie GS* bezeichnet. Aus der oberen Skizze in Abbildung 4.6 wird deutlich, dass sich die resultierende Sichtweite auf den Verlauf des Gegenverkehrsfahrstreifens zu

$$r_{GS} = R_C (\alpha + \beta) \quad (4.19)$$

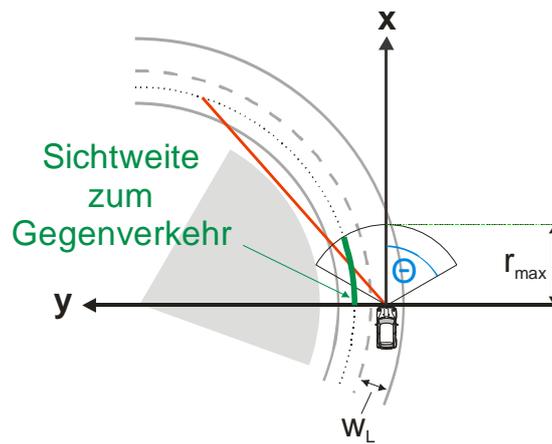
bestimmen lässt. Zu diesem Zweck werden die Winkel

⁴Durth/Habermehl (1986): Überholvorgänge S. 11.

a)
Maße



b)
Breiter
Öffnungswinkel,
geringe Reichweite



c)
Schmaler
Öffnungswinkel,
hohe Reichweite

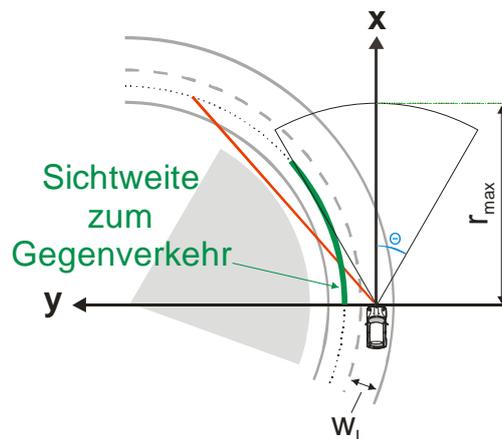


Abbildung 4.6: Veränderung der resultierenden Sichtweite eines Strahlsensors in Abhängigkeit verschiedener horizontaler Öffnungswinkel und Fahrbahnabmessungen.

$$\alpha = \arccos \frac{R_{FA}}{R_A} \quad \text{und} \quad \beta = \arccos \frac{R_{FA}}{R_C} \quad (4.20)$$

benötigt, die notwendigen Parameter resultieren dabei aus der vorliegenden Straßengeometrie (Abbildung 4.6):

$$R_A = R_{CL} + \frac{w_L}{2} \quad (4.21)$$

$$R_C = R_{CL} - \frac{w_L}{2} \quad (4.22)$$

$$R_{FA} = R_{CL} - w_L - w_{FA}. \quad (4.23)$$

Für den Fall einer Kurvenkrümmung mit identischem Betrag und umgekehrtem Vorzeichen (Rechts- anstelle einer Linkskurve) ergibt sich die Vertauschung der Werte für R_A und R_C . Aus der Änderung des Faktors R_C in Ausdruck 4.19 resultiert eine Vergrößerung der Sichtweite. Dieser Effekt ist für $w_L \ll R_C$ aber vernachlässigbar.

Für die Ermittlung von effektiven Sensorsichtweiten entlang des vorausliegenden Streckenverlaufes müssen zwei Fälle unterschieden werden: Liegt eine Krümmung der momentan befahrenen Straße vor, die kleiner als ein Grenzwert κ_{grenz} ist, so liegt der Beschränkung der Einsehbarkeit der gekrümmten Fahrbahn die kreisbogenförmige Begrenzung des Sensorerfassungsbereiches durch die maximale Reichweite zugrunde, die Situation ist in Abbildung 4.6 in der Mitte dargestellt. Ist die momentane Krümmung dagegen größer als der Schwellwert, so wird die Sichtweite durch die seitlichen Begrenzungen des Sensorerfassungsbereiches, also durch die Größe des horizontalen Öffnungswinkels bestimmt, Abbildung 4.6 unten. Die Sensorsichtweiten, die aus dieser Betrachtung resultieren, können daher als abschnittsweise definierte Funktion mit

$$r_S(w_L, \kappa_K, r_{max}, \theta) = \begin{cases} R_C \arcsin\left(\frac{x_1}{R_C}\right), & \kappa_{CL} < \kappa_{grenz} \\ R_C \arcsin\left(\frac{x_2}{R_C}\right), & \kappa_{CL} > \kappa_{grenz} \end{cases} \quad (4.24)$$

und den jeweiligen x-Werten

$$x_1 = \sqrt{r_{max}^2 - \frac{r_{max}^2 \kappa_{CL} + 2w_L}{(2 + w_L \kappa_{CL})^2}} \quad (4.25)$$

$$x_2 = \frac{2 \sin(\theta) + \sin(\theta) \kappa_{CL} w_L}{2 \kappa_{CL} (\sin(\theta)^2 + 1)} + \frac{\sqrt{4 \sin(\theta)^2 - 4 \sin(\theta)^2 \kappa_{CL} w_L + \sin(\theta)^2 \kappa_{CL}^2 w_L^2 - 8 w_L \kappa_{CL}}}{2 \kappa_{CL} (\sin(\theta)^2 + 1)} \quad (4.26)$$

berechnet werden. Die Grenz-Krümmung κ_{grenz} kann aus den Kennwerten des Sensors zu

$$\kappa_{grenz} = 2 \frac{w_L - r_{max} \sin(\theta)}{r_{max} (w_L \sin(\theta) - r_{max})} \quad (4.27)$$

bestimmt werden. Die detaillierten Herleitungen der angegebenen Zusammenhänge sind in Anhang B dargelegt.

In Abbildung 4.7 ist der Verlauf der resultierenden Sensorsichtweite $r_S(\kappa_{CL})$ gezeigt. Hierbei wurden typische Werte für die notwendigen Parameter verwendet. Außerdem ist

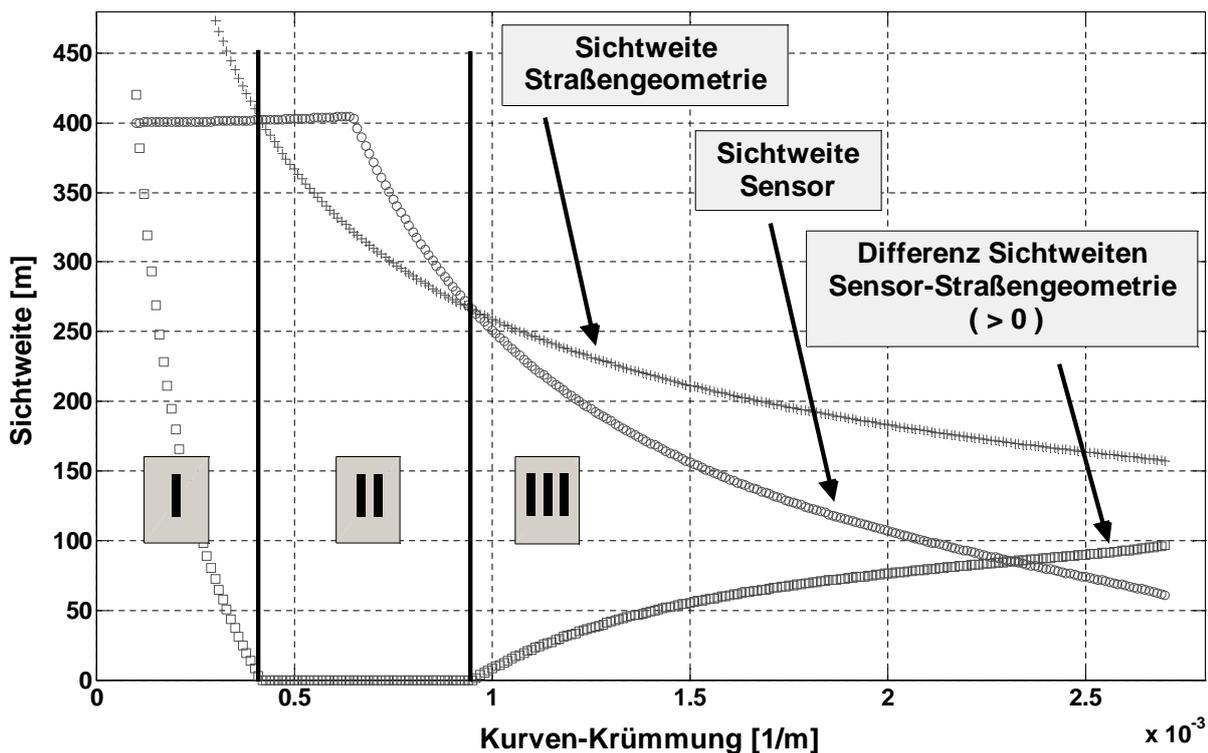


Abbildung 4.7: Verlauf der Sensorsichtweite, der geometrischen Sichtweite sowie der positiven Differenz der beiden Größen, für negative Werte wurde die Differenz zu 0 gesetzt. (Parameter: $w_L = 3,5$ m; $w_{FA} = 5$ m; $r_{max} = 400$ m; $\theta = 8^\circ$)

als Maßstab die Sichtweite des Fahrers aufgezeichnet, die sich durch den Straßenverlauf und die damit zu erwartenden Verdeckungen ergibt, Grundlage bildet die *Geometrische Sichtlinie GS*. Die dargestellte Differenz der beiden Verläufe kann nun als quantitatives Defizit der Sensorreichweite gegenüber dem Bereich aufgefasst werden, der durch den Fahrer überhaupt visuell erfassbar ist. Der Verlauf der Differenz lässt sich in drei charakteristische Zonen einteilen:

- Zone I: Hier besteht keine Sichtverdeckung. Sowohl der Fahrer, als auch der Sensor können aufgrund der gegebenen horizontalen Öffnungswinkel den gesamten – für die Bewertung der Situation erforderlichen – Verkehrsraum überblicken. Den begrenzenden Faktor im Sichtbereich des Sensors stellt in diesem Fall die maximale Sensorreichweite r_{max} dar. Für die Darstellung wurde für die visuelle Sichtweite eines Fahrers ein Wert von 5000 m gewählt. Mit zunehmender Kurvenkrümmung κ_{CL} nimmt das Sensordefizit ab.
- Zone II: In diesem Fall ist die theoretische Sichtweite des Sensors größer als die, die sich durch den Straßenverlauf ergibt, die Erfassungsleistung wird folglich nicht durch den Sensor eingeschränkt, sondern durch den sichtverdeckenden Effekt möglicher Randbebauung. Der Sensor kann hier den gesamten Raum abdecken, der auch dem Fahrer als Sichtbereich zur Verfügung steht, besitzt in diesem Fall also kein Defizit bzgl. des Sichtweite.
- Zone III: Der begrenzende Faktor für die Sichtweite des Sensors ist der horizonta-

le Öffnungswinkel, der den Sichtbereich gegenüber dem Fahrer einschränkt, dieser kann seinen horizontalen Sichtbereich durch Drehung des Kopfes annähernd beliebig wählen. Das Sensordefizit in der Sichtweite wird mit zunehmender Kurvenkrümmung κ_{CL} größer.

Das – hier am Beispiel einer Linkskurve – aufgeführte Formelwerk gestattet die quantitative Bestimmung möglicher Sichtweiten eines Strahlsensors im Bereich gekrümmter Straßenverläufe. Mit den für diese Art von Sensorik üblichen Parametern Sichtweite und Öffnungswinkel in horizontaler Dimension, kann hierdurch die direkte Ableitung von Sensoranforderungen erfolgen, die sich an den zu erzielenden Leistungsfähigkeiten des zu entwickelnden Systems bei Einbeziehung gekrümmter Fahrbahnverläufe ergibt.

4.2 Umfoldsensorik im Automobilbereich

Nachdem die für den Einsatz eines Umfoldsensors in einem Überholassistentensystem erforderlichen Sensorleistungsfähigkeiten in Bezug auf die Sichtweite quantitativ definiert wurden, wird in diesem Abschnitt ein kurzer Überblick über marktverfügbare Sensoren und deren Leistungswerte geboten, so dass sich Schlüsse über die Erfüllungsgrade der abgeleiteten Anforderungen ziehen lassen.

Es existiert eine Vielzahl von Umfoldsensoren, die im Automobilbereich Relevanz besitzen. So werden seit Anfang der neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts Ultraschallsensoren für Einparkhilfesysteme verwendet. Deren Anwendung beschränkt sich jedoch auf den unmittelbaren Nahbereich des Fahrzeugumfeldes in der Größenordnung von einigen Metern⁵. Für die Erfassung von Objekten in größeren Distanzen werden häufig Radarsensoren verwendet. Gründe hierfür liegen hauptsächlich in der hohen Zuverlässigkeit und geringen Empfindlichkeit hinsichtlich widriger Wetterverhältnisse (z. B. Nebel) sowie der hohen Toleranz gegenüber Verschmutzungen der vorderen Sensorabdeckung. Sensoren mit diesem Messprinzip wurden in Europa erstmalig für ein als Adaptive-Cruise-Control (ACC) bezeichnetes System eingesetzt, eine Assistenzfunktion, die erstmalig eine Fahrerunterstützung auf Bahnführungsebene⁶ leistete. Eine Funktionsbeschreibung findet sich beispielsweise bei WINNER⁷. Für die gleiche Anwendung werden auf dem japanischen Markt auch LIDAR-Sensoren verwendet⁸, die jedoch in den o. g. Punkten Nachteile aufweisen.

Einen sehr breiten Anwendungsbereich besitzen Videosensoren (Kameras), bei denen auf die Rohdaten (Pixelbild des Imagers) verschiedene Algorithmen angewendet werden können. Mit deren Hilfe können Objektdetektion, Objektklassifikation, Fahrbahnmarkierungserkennung, Fußgängererkennung und Verkehrszeichenerkennung realisiert werden⁹. Reichweiten und Öffnungswinkel hängen vom verwendeten Objektiv ab, Grenzen bestehen durch die beschränkte Auflösung der Imager-Chips sowie durch die Bewegungsunschärfe bei endlicher Verschlusszeit.

⁵Winner (2007): Aktive Sensoren S. 17.

⁶Donges (1982): Fahrerverhalten Sicherheit Regelung S. 184.

⁷Winner (2002): ACC S. 4.

⁸Maurer/Stiller (2005): Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung S. 15.

⁹Winner/Hakuli/Wolf (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme S. 198 ff.

Im Entwicklungsstadium befindet sich die Car-To-Car Kommunikation (C2C)^{10,11,12}. Ziel hierbei ist es beispielsweise, andere Fahrzeuge durch den Empfang eines Signals zu detektieren, das von diesen ausgesendet wird. Den Vorteilen wie hoher Reichweite und umfassenden Öffnungswinkeln stehen Nachteile wie Missbrauchs-Risiko und das Fehlen realitätsnaher Einföhrungsszenarien gegenüber.

In Tabelle 4.2 sind in Anlehnung an die Darstellung von MAURER¹³ typische Eigenschaften der verschiedenen Sensorarten in einer Übersicht zusammengestellt. An der Darstel-

Tabelle 4.2: Eigenschaften und Erfassungsbereiche typischer Umfeldsensoren, die zur Objekterkennung im Automobilbereich eingesetzt werden. Die Darstellung erfolgt in Anlehnung an Maurer.

Abkürzungen: nrs=Near-Range-Scan (Detektion im Nahbereichs-Modus); lrs=Long-Range-Scan (Detektion im Fernbereichs-Modus); d.M.=direkte Messbarkeit.

Quellen: Stüker (2004): Heterogene Sensordatenfusion Hella (2005): Technische Information Lücke/Komar/Strauss (2007): Reduced Stopping Distance IBEO (2007): IBEO Brochure Kosch (2006): Horizont Fahrerassistenz

	Radar 77 GHz	Radar 24 GHz	LIDAR	Video (Camera)	C2C (WLAN)
Distanz (d.M.)	x	x	x		x
Rel.-Geschwindigkeit (d.M.)	x	x			x
Öffnungswinkel (max.) [±°]	nrs:30 lrs:9	35	20	120	360
Reichweite (max.) [m]	nrs:60 lrs:200	50	200	50	100- 400

lung fällt die potentiell hohe Reichweite und der umfassende horizontale Öffnungswinkel der C2C-Kommunikation auf. Neben den oben genannten Nachteilen sind jedoch noch zahlreiche Forschungsfragen ungeklärt. Ein Beispiel hierfür ist die notwendige, permanente An- und Abkoppelung verschiedener Fahrzeuge zueinander (Ad-hoc-Netzwerke). Außerdem widersprechen sich die Veröffentlichungen in den Angaben zur erreichbaren Erfassungsreichweite zum Teil deutlich, woraus das große Intervall in der Tabelle im Bereich von 100-400 m resultiert^{14,15}.

Von den übrigen Sensortypen besitzen der Fernbereichs-Radar (77 GHz) und der LIDAR die höchsten Reichweiten. Für eine angestrebte Detektion von Gegenverkehr bietet ein Radar-Sensor Vorteile aufgrund seiner Fähigkeit zur direkten Messung von Relativgeschwindigkeiten. Die marktüblichen Reichweiten von 200 m sind das Ergebnis einer Opti-

¹⁰Nöcker/Metzger/Kerner (2005): Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme S. 151 ff.

¹¹Eichler/Schroth/Eberspächer (2006): Car-To-Car S. 35.

¹²Grimm/Sadekar/Popp (2007): Vehicle to Vehicle Communications S. 871.

¹³Maurer/Stiller (2005): Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung S 10.

¹⁴Nöcker/Metzger/Kerner (2005): Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme S. 162.

¹⁵Kosch (2006): Horizont Fahrerassistenz.

mierung des Sensors auf die Anwendung ACC. Aufgrund der dort eingesetzten Methode der Fahrschlauchprädiktion (s. WINNER¹⁶) sind hier keine höheren Reichweiten notwendig. Diese Auslegung kennzeichnet jedoch keine prinzipbedingte Reichweiten-Obergrenze des Sensorwirkprinzips.

Bei einer Verdopplung der Entfernung, in der ein Objekt detektiert wird, verringert sich das Signal-Rausch-Verhältnis beim LIDAR aufgrund der Wandlung des Lichtstromes in die Diodenspannung einer Photodiode um -24 dB. Beim Radar hingegen liegt die Verringerung wegen der direkten Verwendung der Leistungsgröße lediglich bei -12 dB. Da entgegenkommende Fahrzeuge möglichst früh und in größerer Entfernung erkannt werden sollen, stellt dies für die Anwendung in einem Überholassistentensystem einen weiteren Vorzug des Radar-Prinzips dar.

Aus den genannten Gründen, die gegen den Einsatz von C2C-Kommunikation und von LIDAR-Sensoren sprechen, wird im Rahmen dieser Arbeit stattdessen ein Radar-Sensor eingesetzt, der für eine Serienanwendung im ACC-Bereich eingesetzt wird, und daher als „marktverfügbar“ bezeichnet werden kann.

Fernbereichs-Radarsensor ARS 300

Der in dieser Arbeit genutzte Fernbereichs-Radarsensor ARS 300 vom Hersteller Continental besitzt für die ACC-Auslegung eine maximale Detektionsreichweite für Umfeldobjekte von 200 m und einen Gesamt-Öffnungswinkel (horizontal) von 17° ^{17,18}. Der Sensor kann entgegenkommende Fahrzeuge bis zu Relativgeschwindigkeiten von 270 km/h detektieren, eignet sich daher auch für Gegenverkehr im Überholbereich. Die realisierte Detektionsdistanz ergibt sich aus einer Anzahl von sogenannten Entfernungstoren (*Range-Gates*), in Distanz-Zellen ausgedrückte Zeiträume, in denen ein von einem Objekt reflektiertes Signal gemessen werden kann. Diese Zahl wird multipliziert mit der geometrischen Länge eines Entfernungstors, welches maßgeblich durch den Frequenzhub in der Modulation beeinflusst wird. Der ARS 300 wertet 200 Entfernungstore aus, die für die Serien-Auslegung eine Ausdehnung von 1 m besitzen. Hieraus resultiert die maximale Detektionsdistanz von 200 m. Durch eine Anpassung der Software, die die Modulation der Sensorsignalverarbeitung durchführt hin zum halben Frequenzhub, konnte die Länge der Entfernungstore auf 2 m verdoppelt werden. Es ergibt sich folglich eine neue – prinzipielle – Detektionsdistanz für die Erkennung von Umfeldobjekten von 400 m. Dies ist gemäß den Betrachtungen aus Abschnitt 4.1.1 ein Wert, der aus Sensorsicht ausreichende Leistungsfähigkeit für die Erkennung aller relevanten Objekte für ein Überholassistentensystem aufweist, vorausgesetzt, das System ist in einem vergleichsweise leistungsstarken Fahrzeug verbaut.

4.3 Objektverfolgung

Durch die Einführung eines Sensors, der die geforderte Detektionsreichweite besitzt, ist es grundsätzlich möglich, dass alle am Überholvorgang beteiligten Fahrzeuge erkannt werden. Der Sensor gibt zu diskreten Zeitpunkten Informationen über momentan erkannte Objekte aus. Dies geschieht üblicherweise in Form einer sogenannten Objektliste, in der

¹⁶Winner (2007): Aktive Sensoren S. 21.

¹⁷Winner/Hakuli/Wolf (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme S 159.

¹⁸Wintermantel et al. (2009): Fernbereichsradar.

die erkannten Objekte aufgeführt sind. Die einzelnen Detektionen stehen jedoch in keinem zeitlichen Zusammenhang, d. h. falls der Sensor beispielsweise durch eine bestimmte Reflexionssituation eine *Falsch-Negativ*-Detektion liefert, also ein Objekt in einem oder mehreren Abtastschritten nicht erkennen kann, wirkt sich dieses Fehlen direkt auf nachfolgende Algorithmen aus. Ein weiterer Gesichtspunkt ist das Sensorrauschen: Den von Sensoren gemessenen Werten von Umfeldobjekten ist im Allgemeinen eine Rauschgröße überlagert, die nicht vom Zeitpunkt der Messung abhängt und deren Einfluss daher in zeitlich unabhängigen Abtastschritten nicht eliminiert werden kann. Um die dargestellten Probleme zu lösen, wird häufig eine sogenannte Objektverfolgung realisiert. Unter diesem Begriff wird nach WINNER die „Bildung des zeitlichen Zusammenhangs einzelner Messereignisse zu quasikontinuierlichen Spuren einzelner Objekte“ verstanden. Diese *Spuren* werden ebenfalls als *Track* bezeichnet¹⁹. Auf diese Weise können Objekte aus einem neuen Abtastschritt denen zugeordnet werden, die bereits zum letzten Messzeitpunkt bekannt waren. Mit diesem Schritt wird sowohl die Abkoppelung der direkten Verbindung zwischen Sensorobjektliste und Verarbeitungsalgorithmik erreicht als auch die Akkumulation von Messwerten eines beobachteten Objekts möglich. Als Resultat ist eine Steigerung der Messgenauigkeit zu erwarten.

4.3.1 Koordinatensystem und Objektmodell

Für Objekte, die von einem Sensor detektiert werden, welcher mit dem EGO-Fahrzeug fest verbunden ist, liegt die Darstellung in einem fahrzeugfesten Koordinatensystem nahe. Dieses wird in der vorliegenden Arbeit an die in der Fahrzeugtechnik gebräuchliche Norm DIN 70000 angelehnt²⁰. Die x -Achse zeigt in der Verlängerung der Fahrzeuglängsachse nach vorne und die y -Achse nach links, so dass sich nach den Regeln eines räumlichen Rechtssystems die z -Achse in Richtung der Hochachse des Fahrzeugs erstreckt. Da in dieser

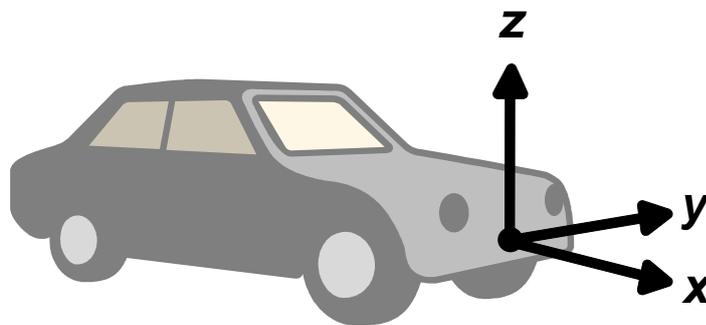


Abbildung 4.8: Fahrzeugfestes Koordinatensystem. Der Ursprung dieses Systems liegt am Ort der Befestigung des Radar-Sensors am Versuchsfahrzeug.

Arbeit nur ein einzelner Strahlsensor zur Objektdetektion genutzt wird, liegt der Ursprung des gewählten Koordinatensystems an der Position des am Fahrzeug befestigten Radar-Sensors, Abbildung 4.8. Dieser Sensor ist an dem für die Experimente in diesem Kapitel verwendeten Versuchsfahrzeug im Bereich des vorderen Stoßfängers direkt unterhalb des Kennzeichens mit Blickrichtung nach vorne montiert.

¹⁹Winner/Hakuli/Wolf (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme S 159.

²⁰DIN (1994): DIN 70000: Straßenfahrzeuge.

Für die Modellierung der detektierten Objekte in diesem Koordinatensystem werden deren jeweilige Positionen respektive deren Ableitungen betrachtet. Eine bei der Realisierung einer Objektmodellierung häufig angewandte Faustregel besagt, dass die Modellierung maximal eine Ableitung höher enthalten soll als die Ableitung, die noch direkt mit den zur Verfügung stehenden Sensoren messbar ist. Der Radarsensor hat die Fähigkeit, Geschwindigkeiten direkt zu messen. Daher wird nach dieser Regel der kinematische Objektzustand bis zur zweiten Ableitung, der Beschleunigung, berücksichtigt. Es ergibt sich somit als Darstellung der Eigenschaften eines Objekts im Zustandsraum:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \end{pmatrix}. \quad (4.28)$$

Dieser Vektor enthält für jedes Objekt alle Informationen, die zu dessen Position und kinematischem Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt sind.

4.3.2 Aufbau der Objektverfolgung

Zwischen den Abtastschritten des objektbildenden Sensors, also zwischen den Zeitpunkten des Eingangs neuer Informationen über detektierte Umfeldobjekte, läuft der Objektverfolgungs-Algorithmus ab. Dieser wird dann begonnen, wenn neue Daten vom Sensor zur Verfügung stehen, ein sogenannter ereignisgesteuerter Ablauf²¹. Abbildung 4.9 liefert eine Gesamtübersicht über die einzelnen Schritte. Nach dem Eingang der neuen Ob-



Abbildung 4.9: Struktur des Objektverfolgungs-Algorithmus. Der Prozess beginnt, sobald der Umfeldsensor in einem Abtastschritt neue Daten über Umfeldobjekte liefert.

jektliste wird zunächst auf Basis der Objektzustände des zeitlich letzten Abtastschrittes eine Vorhersage (Prädiktion) dieser Werte auf den aktuellen Zeitpunkt der eingehenden Daten durchgeführt. Zur Prädiktion der Objektzustände wird ein Kalman-Filter verwendet. Informationen über Eigenschaften und genaue Funktionsweise dieses iterativen Filters wurden beispielsweise von WELCH zusammengefasst²². Prinzipiell stellt sich bei der Zusammenführung bereits bekannter Objekte aus den vorherigen Zeitschritten mit den aktuellen Messungen die Aufgabe der eindeutigen Zuordnung von Messungen zu prädizierten Objekten. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine solche Zuordnung korrekt ist, steigt offenbar mit der Ähnlichkeit, die diese Objekte im Bezug auf die kennzeichnenden Größen im Zustandsraum (Gleichung 4.28) aufweisen. Um Objektpaarungen, die nach diesem Kriterium nur eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit der gegenseitigen Zugehörigkeit besitzen, bereits

²¹Narbe (2003): Datennetzkonzepte S. 40 ff.

²²Welch/Bishop (2006): Kalman-Filter.

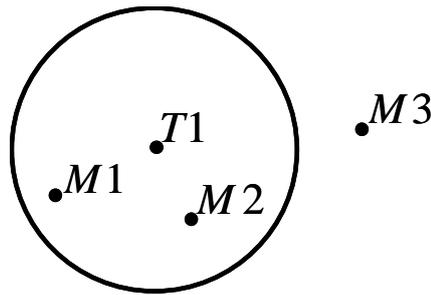


Abbildung 4.10: Gating

frühzeitig vor Eintritt in eine feinere Betrachtung dieser Zuordnung herauszufiltern, wird ein sogenanntes *Gating* durchgeführt. Hierbei wird um jeden prädizierten Zustand eines Tracks ein Bereich definiert, das *Gate*. Für die nachfolgenden Zuordnungsschritte werden dann nur Messwerte zugelassen, die innerhalb dieses Bereiches liegen. Für die beiden Positionsgrößen x und y ist eine geometrische Illustration möglich, Abbildung 4.10. Punkt $T1$ steht dabei für den prädizierten Zustand. Die Punkte $M1$, $M2$ und $M3$ repräsentieren vom Sensor im aktuellen Zeitschritt erfasste Objekte, die im Folgenden als *Messung* bezeichnet werden. Die Messungen $M1$ und $M2$ liegen innerhalb des Gatebereichs, daher werden sie zur Zuordnung zugelassen. Dagegen liegt Messung $M3$ außerhalb und wird somit von der Zuordnung ausgeschlossen. Neben den hier gezeigten Positionszuständen wurden beim Gating auch alle weiteren Zustände einbezogen, also ebenfalls beispielsweise die Geschwindigkeiten. Für die Form der Gates gibt es verschiedene Ansätze, die von LATTKE ausführlich diskutiert werden²³. Für die Realisierung in dieser Arbeit wurden sogenannte elliptische Gates angewandt.

Der folgende Schritt besteht aus der sogenannten *Assoziation*. Hierzu gibt es eine Vielzahl möglicher Algorithmen. In seinem Standardwerk nennt BLACKMAN den sogenannten *Auktionsalgorithmus* als am effizientesten²⁴. Ausführliche Darstellungen hierzu liefern BERTSEKAS oder LATTKE^{25,26}.

Als Resultat der Assoziation sind die Zugehörigkeiten festgelegt, der Folgeschritt *Korrektur* führt Messung und prädizierte Werte zusammen. Beide sind mit Fehlern behaftet, den Messwerten ist ein Rauschen überlagert und die Prädiktion besitzt im Allgemeinen einen Fehler, der durch die Ungenauigkeit des Prädiktionsmodells entsteht. Der Kalman-Filter führt diese beiden Werte – unter bestimmten Voraussetzungen in optimaler Weise – zusammen, so dass sich auf Basis der zur Verfügung stehenden Informationen eine maximale Schätzgüte ergibt. Dieser Vorgang wird als Korrektur bezeichnet.

Das Ergebnis der Assoziation können zwei besondere Zustände sein: Es besteht die Möglichkeit, dass Messungen existieren, die nicht zu bestehenden, bereits bekannten Objekten zugeordnet wurden. Dies ist beispielsweise immer dann der Fall, wenn Objekte zum ersten Mal detektiert werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Situation, dass eine Prädiktion aktueller Werte für ein vorher bekanntes Objekt durchgeführt wurde, aus den aktuellen Messungen des Sensors wurde dieser Prädiktion jedoch keine zugeordnet. Diese Fälle werden im Funktionsteil *Track-Management* berücksichtigt. Von SKUTEK wird hier-

²³Lattke (2007): Objektverfolgung S 26 ff.

²⁴Blackman/Popoli (1999): Tracking Systems S 343 ff.

²⁵Bertsekas (2009): Auction Algorithms S. 128 ff.

²⁶Lattke (2007): Objektverfolgung S 43 ff.

zu eine sehr einfache Heuristik beschrieben, die sich auf die Verwendung von sogenannten *Ad-Hoc*-Regeln gründet und in dieser Arbeit eingesetzt wird. Dabei sind folgende Zustände definiert, von denen jedes Objekt zu jedem Zeitschritt genau einem zugewiesen ist²⁷:

- **INIT**
Wird eine Messung keinem prädierten Track zugeordnet, so wird ein neues Objekt erstellt und die Zustandsgrößen bekommen die Werte der Messung zugewiesen. Es wird also ein neuer Track generiert, der jedoch als solcher erkennbar bleibt.
- **TENTATIVE**
Tracks, die in der Zeit ihrer bisherigen Existenz erst wenige Zuordnungen von Messungen und daher Korrekturen erfahren haben, werden beibehalten und erhalten diesen Zustand.
- **CONFIRMED**
Tracks, die häufiger aktualisiert wurden, wird dieser Zustand zugewiesen. Die Unterscheidung zwischen *TENTATIVE* und *CONFIRMED* ermöglicht den Objektdateen verwendenden Algorithmen eine Einschätzung über die Existenzwahrscheinlichkeit eines Objekts. Es ist beispielsweise denkbar, dass manche Systeme Objekte verwerfen, die nicht den Status *CONFIRMED* aufweisen.
- **MISSED**
Dieser Zustand steht für Tracks, denen beim letzten Abtastschritt keine Messung zugeordnet wurde. Es erfolgt jedoch keine unmittelbare Löschung. Der Objektzustand wird weiterprädiert, so dass die die Fortsetzung der Objektspur ausschließlich auf Basis des Systemmodells stattfindet. Es ist offensichtlich, dass sich in diesem Fall Fehler aufintegrieren, so dass diese Art der Fortschreibung der Objektspur notwendigerweise auf eine bestimmte Zeit begrenzt bleiben muss.
- **DEAD**
Dieser Zustand erlaubt die Löschung von Tracks, denen häufiger keine Messung zugeordnet wurde. Liegt die Zahl der Nicht-Zuordnungen über einem Schwellwert, so erhält ein Track diese Einstufung.

Nach der Prüfung zu jedem Zeitschritt, ob einem Track eine Messung zugeordnet wurde, kann ein Übergang eines Objekts in einen anderen Zustand erfolgen. Die Bedingungen, die an eine solche Transition geknüpft sind, werden durch die sogenannten *Ad-hoc*-Regeln definiert. Die Ausgestaltung dieser Regeln hat maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis der Objektverfolgung.

Ad-hoc Regeln

Die Funktion des Übergangs zwischen verschiedenen Zuständen kann in einem Zustandsautomat abgebildet werden. Zwischen den einzelnen Zuständen sind Bedingungen hinterlegt, die einen Wechsel von Zuständen auslösen, Abbildung 4.11. Die Parametrierung dieses Automates erfolgt durch die Ausgestaltung der *Ad-hoc* Regeln. Als Grundlage für diese Regeln werden für jeden Track bei jedem Sensorabtastschritt zwei Zähler aktualisiert:

²⁷Skutec (2006): Pre-Crash System S 82.

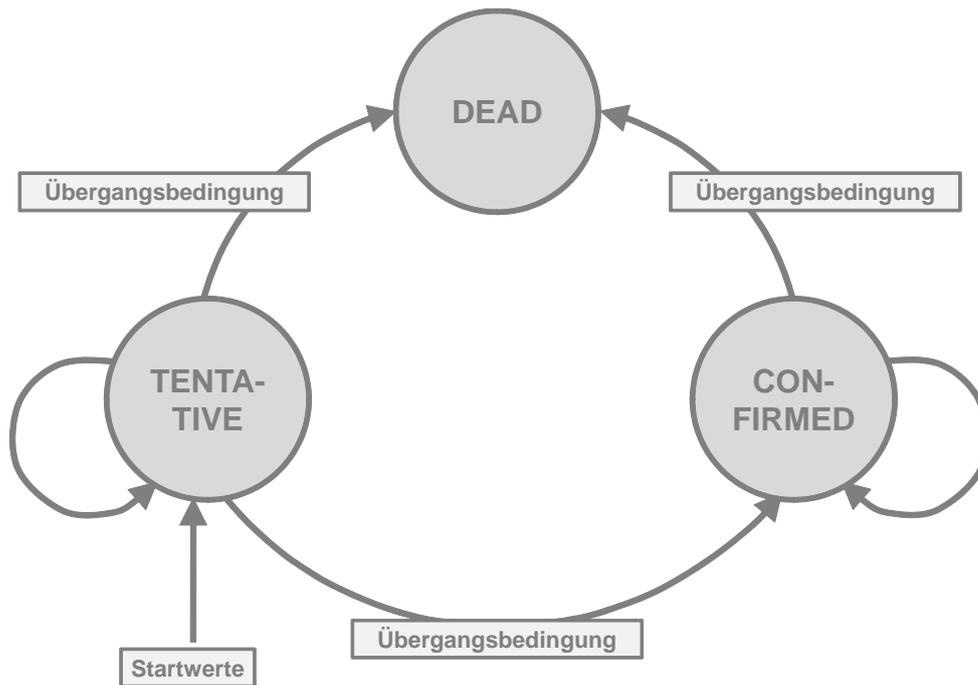


Abbildung 4.11: Zustandsautomat zur Bestimmung der zugewiesenen Zustände von Tracks in der aktuellen Objektliste

- In der Variablen c_a wird die Anzahl der Abtastschritte seit dem erstmaligen Erreichen des Status *CONFIRMED* eines Tracks hochgezählt. Dies indiziert das Objektalter und kann – eine konstante Rate der eingehenden Messungen vorausgesetzt – mit der Einheit einer Zeitdauer versehen werden. Die Variable wird nicht erhöht, falls dem entsprechenden Track im aktuellen Abtastschritt keine Messung zugeordnet werden kann.
- Die Variable c_f zählt die Anzahl der zusammenhängenden, fehlenden Zuordnungen von Messungen zu dem jeweiligen Track.

Mit dem aktuellen Stand der Werte dieser Variablen kann anhand der *Ad-hoc* Regeln nun über Zustandsübergänge entschieden werden.

Als Grundcharakter der Regeln ist offenbar, dass Objekte, denen längere Zeit keine Messung zugewiesen werden, irgendwann gelöscht werden müssen, damit keine Objekte mehr in der Objektliste verbleiben, die sich nicht mehr im Erfassungsbereich der Sensorik befinden. Auf der anderen Seite soll diese Löschung jedoch nicht zu früh stattfinden, also beispielsweise schon bei der ersten fehlenden Zuordnung, da als Hauptziel der Objektverfolgung gerade die Überbrückung von kurzzeitigen Messaussetzern und somit die Abkoppelung nachfolgender Algorithmik von diesen direkten Messfehlern ermöglicht werden soll. Außerdem ist es nachvollziehbar, dass für vorausfahrende Fahrzeuge andere Schwellen herangezogen werden als für Fahrzeuge des Gegenverkehrs, da die typische Dauer mit der diese Objekte im Erfassungsbereich des Sensors verbleiben, signifikant unterschiedlich sind. Für den Bereich vorausfahrender Fahrzeuge verwendet die hier realisierte Objektverfolgung daher einen eigenen, von Null verschiedenen Schwellwert Ξ_{del}^B für eine Objektlöschung bei $c_f > \Xi_{del}^B$. Hierbei ist Ξ_{del}^B kein konstanter Wert, sondern ist abhängig vom Objektalter c_a . Dies erzeugt ein Verhalten, welches vorausfahrende Fahrzeuge, die bereits länger beobachtet

wurden, später gelöscht werden als Objekte, die erst eine kurze Tracklänge aufweisen. Die qualitative Abhängigkeit der Schwelle Ξ_{del}^B vom Objektalter c_a ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Die als Rampe modellierte Abhängigkeit wird von zwei Sättigungsbereichen begrenzt, der untere beschreibt dabei eine Mindestschwelle, die nicht unterschritten werden darf, damit Objekte nicht zu schnell gelöscht werden. Die Einführung eines oberen Grenzbereiches wird notwendig, da sonst Objekte, die sehr lange beobachtet wurden, nur sehr langwierig wieder löschar sind. Dies könnte beispielsweise bei einem zu überholenden Fahrzeug der Fall sein, welches nach langer Folgefahrt beim Beginn eines Überholmanövers aus dem Sensorerfassungsbereich austritt. Die Wahl der Werte für die Nachbildung

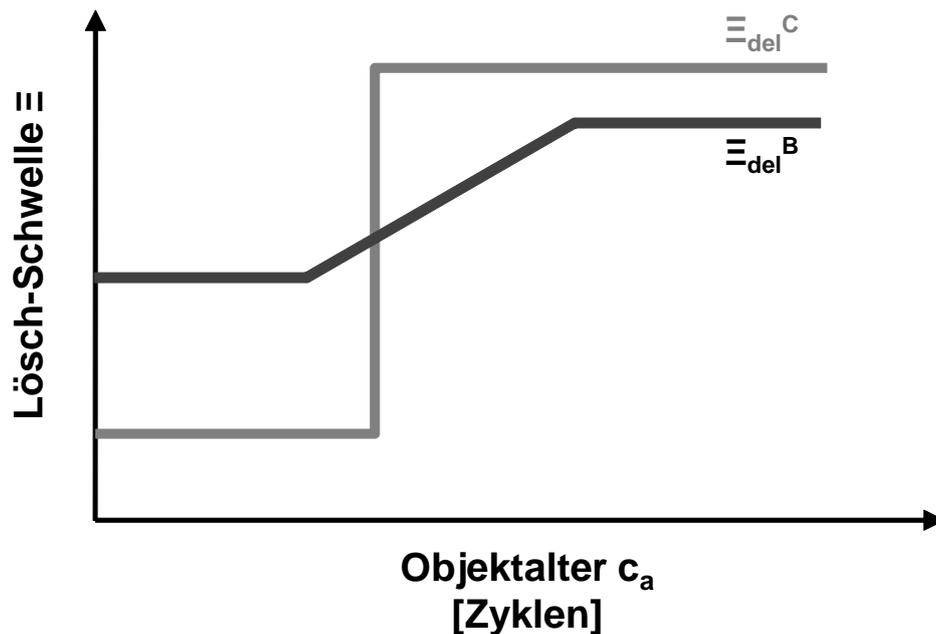


Abbildung 4.12: Schwellen zur Löschung von Objekten in Abhängigkeit vom Objektalter

des Gesamtverlaufes der dargestellten Kurve wurde für den Einsatz im prototypischen Versuchsfahrzeug in zahlreichen Versuchen empirisch ermittelt und ist je nach verwendeter Sensorik und deren Eigenschaften individuell anzupassen.

Für Objekte des Gegenverkehrs bleibt typischerweise nur wenig Beobachtungszeit, daher entfällt die Notwendigkeit eines oberen Sättigungsbereiches des Graphen für die Ermittlung der Löschschwelle Ξ_{del}^C und es wird ab einem bestimmten Objektalter c_a ein hoher Wert angesetzt. Um zu vermeiden, dass sich fehlerhaft detektierte Objekte, die nur sehr kurzzeitig in der Objektliste erscheinen, nur schwierig löschen lassen, wird die Schwelle für den Bereich kleiner Objektalter c_a gesenkt, Abbildung 4.12.

Eine weitere wichtige Festlegung betrifft den Mindestwert der Zahl der Detektionen Ξ_{conf}^B bzw. Ξ_{conf}^C , den ein Objekt zunächst erreichen muss, um den Status *CONFIRMED* zu erreichen. In der Praxis zeigen sich relativ häufig Fehlmessungen, die nicht von realen Objekten stammen und deren Auftreten sich auf 1-2 Messungen beschränkt. Die Regeln müssen aus diesem Grund so ausgelegt sein, dass diese „Geisterobjekte“ nicht den Status *CONFIRMED* erlangen, sondern zuvor gelöscht werden. Auch hier ist die Anpassung dieses Parameters an das zugrundeliegende Sensoriksystem notwendig. Alle hier genannten Parameter, die im Rahmen dieser Arbeit angewendet wurden, können Anhang E entnommen

werden.

4.4 Einordnung in die Überholzieldetektion

Die gesamte Funktion der Objektverfolgung dient zur sicheren Erkennung von Fahrzeugen, die Überholziele begrenzen. In der Systemarchitektur, die in dieser Arbeit beispielhaft umgesetzt wurde, ist diese Funktion daher folgerichtig der Datenbasis der Überholziele vorgelagert, Abbildung 4.13. Es wird ebenfalls deutlich, dass die Objektverfolgung durch

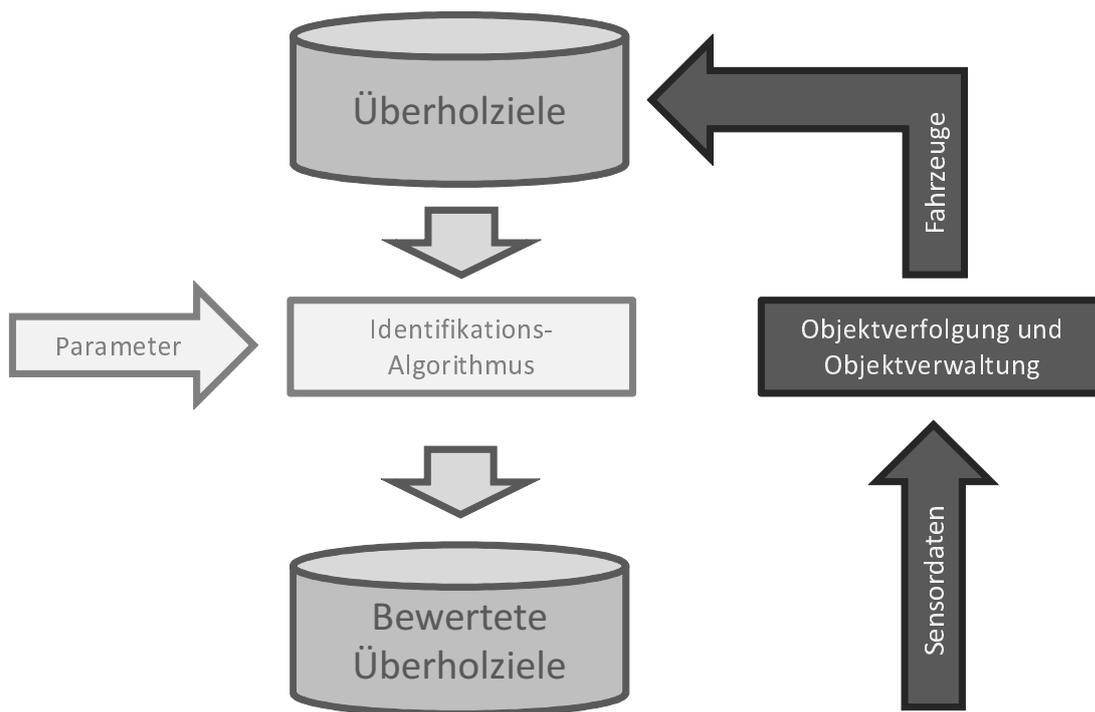


Abbildung 4.13: Die Objektverfolgung (Tracking) liefert die Grundlage zur Erkennung von Fahrzeugen und somit zur Definition von Überholzielen.

ihre Anordnung innerhalb der Systemarchitektur eine Filterfunktion für die eingehenden Sensordaten übernehmen kann, um beispielsweise kurzzeitige *Falsch-Negativ*-Fehler in Messungen abzufangen.

4.5 Evaluation: Forschungshypothesen und Experimente

Um zu bewerten, ob der hier dargestellte Ansatz einer Umfelderkennung auf Grundlage eines Radar-Sensors und einer Objektverfolgung alle Anforderungen erfüllt, die ein Überholassistentensystem stellt, werden in den folgenden Abschnitten Forschungshypothesen formuliert, die eine solche Beurteilung ermöglichen. Im Anschluss sind die jeweiligen Experimente erläutert und die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt.

4.5.1 Hypothese 'Ferner Gegenverkehr'

Eine der zentralen Herausforderungen bei der Erkennung aller Fahrzeuge, die für eine Bewertung der Gefährlichkeit eines Überholmanövers bedeutsam sind, liegt in der frühzeitigen Detektion von Gegenverkehrsfahrzeugen. In der Ableitung benötigter Sensorreichweiten bei der Erkennung von Gegenverkehr in Abschnitt 4.1.1 wurde hierzu bei Nutzung eines leistungsstarken Fahrzeugs ein Wert von etwa 400 m identifiziert. Wenn Fahrzeuge tatsächlich vorhandenen Gegenverkehrs in Distanzen innerhalb dieser Größenordnung sicher erkannt werden können, ist eine rechtzeitige Warnung des Fahrers möglich, so dass dieser das begonnene Manöver frühzeitig abbrechen kann. Die robuste Detektion eines Objekts zeichnet sich im Rahmen der realisierten Objektverfolgung dadurch aus, dass die Objektpur vom Zeitpunkt der Erstdetektion bis zum Austritt aus dem Sensorerfassungsbereich nicht unterbrochen wird, d. h. dass kein Objektverlust auftritt. Demgegenüber soll sichergestellt werden, dass mit der gleichen Parametrierung keine Geisterobjekte entstehen, also keine *Falsch-Positiv*-Detektionen zum Aufsetzen von Objektpuren führen. Diese Gesichtspunkte führen zur Definition der Forschungshypothese 'Ferner Gegenverkehr':

Hypothese 'Ferner Gegenverkehr'

Unter der Voraussetzung prinzipieller Sichtbarkeit durch den Straßenverlauf und Sensorerfassungsbereich kann ein Objekttracking so parametrierbar sein, dass die Erst-Detektion mit dem Aufsetzen einer Objektpur entgegenkommender Fahrzeuge immer oberhalb einer Schranke von 375 m möglich ist, so dass unterhalb dieser Distanz kein Objektverlust mehr auftritt. Mit der gleichen Parametrierung treten dabei während der gesamten Beobachtungsdauer keine *Falsch-Positiven* Objektpuren auf.

Die Hypothese ist so aufgebaut, dass ihr Zutreffen nicht nachgewiesen, sondern die Aussage durch eine entsprechende Beobachtung verworfen werden kann. Die Methodik der Bewertung wird so gewählt, dass Verkehrsszenarien definiert werden, die das Verwerfen der Hypothese möglichst leicht machen und auf der anderen Seite eine Verletzung der Aussage einfach feststellen lassen. Falls die Hypothese dann nicht verworfen wird, kann sie als *bewährt* betrachtet werden. Weiterführende Erläuterungen zur hier angewendeten Methodik und den genannten Begriffen kann CHALMERS bzw. TRIMMEL entnommen werden^{28,29}. Aus diesen Betrachtungen wird deutlich, dass eine Verkehrssituation erforderlich ist, bei der häufig Gegenverkehrsobjekte in hohen Distanzen auftreten, in diesem Fall also zwischen 375 und 400 m. Ferner müssen diese Fahrzeuge – gemäß der Hypothesenformulierung – während sie sich in diesem Distanzbereich befinden, prinzipiell durch den Sensor erfassbar sein. Diese Bedingung lässt sich am besten auf Straßen erreichen, die eine Krümmung $\kappa = 0$ aufweisen. Um den Wert der potentiellen Bewährung der Hypothese zu steigern, werden die Versuche in einer möglichst großen Zahl von Wiederholungen und auf verschiedenen repräsentativen Strecken durchgeführt. Die geforderten Bedingungen der Krümmungslosigkeit und ausreichender Überblickbarkeit werden von einigen Strecken im Umland von Darmstadt erfüllt. Ausgewählt wurden hier die Dieburger Straße, die Bundesstraße 26 zwischen Altheim und

²⁸Chalmers (2001): Wege der Wissenschaft S. 51.

²⁹Trimmel (2009): Wissenschaftliches Arbeiten S. 28.

Babenhausen sowie die Verbindungsstraße Nilkheim-Aschaffenburg (für nähere Beschreibungen siehe Anhänge F.5; F.2; F.3). Auf jeder dieser Strecken wurden Fahrten mit dem Messfahrzeug mit aktivierter Objektverfolgung durchgeführt und die Objekts Spuren von entgegenkommenden Fahrzeugen aufgezeichnet, der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.14 skizziert. Aus diesen Daten kann ermittelt werden, ob eine einmal erzeugte Objektspur

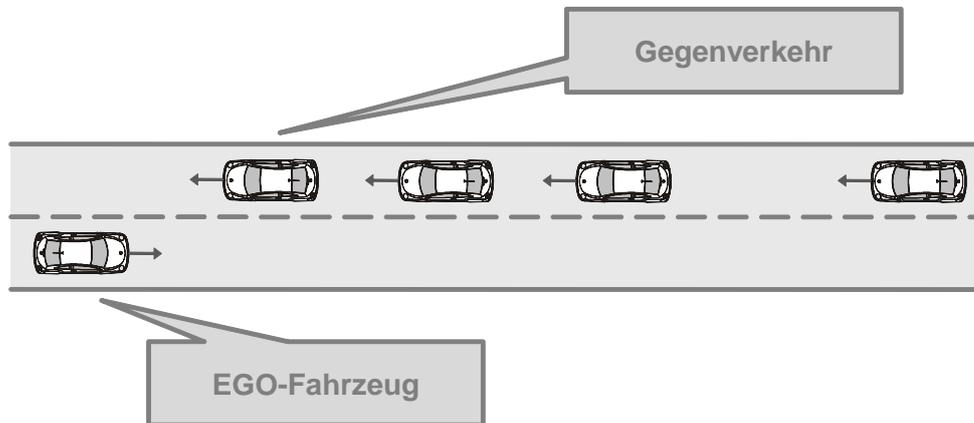


Abbildung 4.14: Versuch zur Bewertung der Hypothese 'Ferner Gegenverkehr': Das Messfahrzeug bewegt sich im öffentlichen Straßenverkehr und beobachtet Gegenverkehrsfahrzeuge, die nacheinander in den Sichtbereich des Radar-Sensors einfahren. Aus den aufgezeichneten Ergebnissen der Objektverfolgung kann ermittelt werden, ob eine kontinuierliche Objektbeobachtung ohne Auftreten von Objektverlusten gelingt.

eines Gegenverkehrsfahrzeugs ohne Objektverlust verfolgt wurde. Ebenfalls kann die Distanz ermittelt werden, bei der das Objekt diese Objektspur erstmalig initiierte. Auf jeder ausgewählten Versuchsstrecke wurde eine Zahl von 10 Messfahrten durchgeführt, jede mit einer Mindestdauer von 20 Sekunden und mindestens zweimaligem Eintauchen von Gegenverkehr in die maximale Detektionsreichweite des Sensors von 400 m. Dabei wurde darauf geachtet, dass vorausfahrende Fahrzeuge – soweit vorhanden – sich in einem Abstand von mindestens 100 m vor dem EGO-Fahrzeug befanden, um Sichtverdeckungen auszuschließen und die Leistungsfähigkeit der Verfolgung ferner Objekte in diesem Versuch isoliert bewerten zu können. Um die Plausibilität der Ergebnisse anhand der aufgezeichneten Daten prüfen zu können, wurde parallel zum Signalausgang der Objektverfolgung die momentane Verkehrssituation mit einer digitalen Kamera hinter der Frontscheibe des Messfahrzeugs aufgezeichnet. In Abbildung 4.15 ist beispielhaft das Ergebnis eines der durchgeführten Experimente dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit der Darstellung ist die Longitudinaldistanz desjenigen Gegenverkehrsfahrzeugs gezeigt, welches zum EGO-Fahrzeug die geringste Entfernung besitzt. Alle Fahrzeuge, die in größerer Entfernung hinter diesem Objekt liegen, sind für die Bewertung einer Überholsituation nicht maßgeblich. Zum Beginn der Messung wird ein Fahrzeug bei etwa 395 m Distanz erkannt. Diesem folgen zwei weitere Fahrzeuge, die im Graphen jedoch erst dann sichtbar werden, wenn die Objektspur des ersten Fahrzeugs gelöscht wurde, weil dieses Objekt inzwischen am EGO-Fahrzeug vorbeigefahren ist. Bei einem Zeitpunkt von etwa 25 s existiert offenbar keine Objektspur. Hier existiert kein entgegenkommendes Fahrzeug im Erfassungsbereich der Sensorik. Dies ist erst wieder bei etwa 30 s der Fall, auch zu diesem Zeitpunkt wird die neue Objektspur bereits in einer Distanz von knapp unter 400 m aufgesetzt. Offenbar weisen die Objekt-

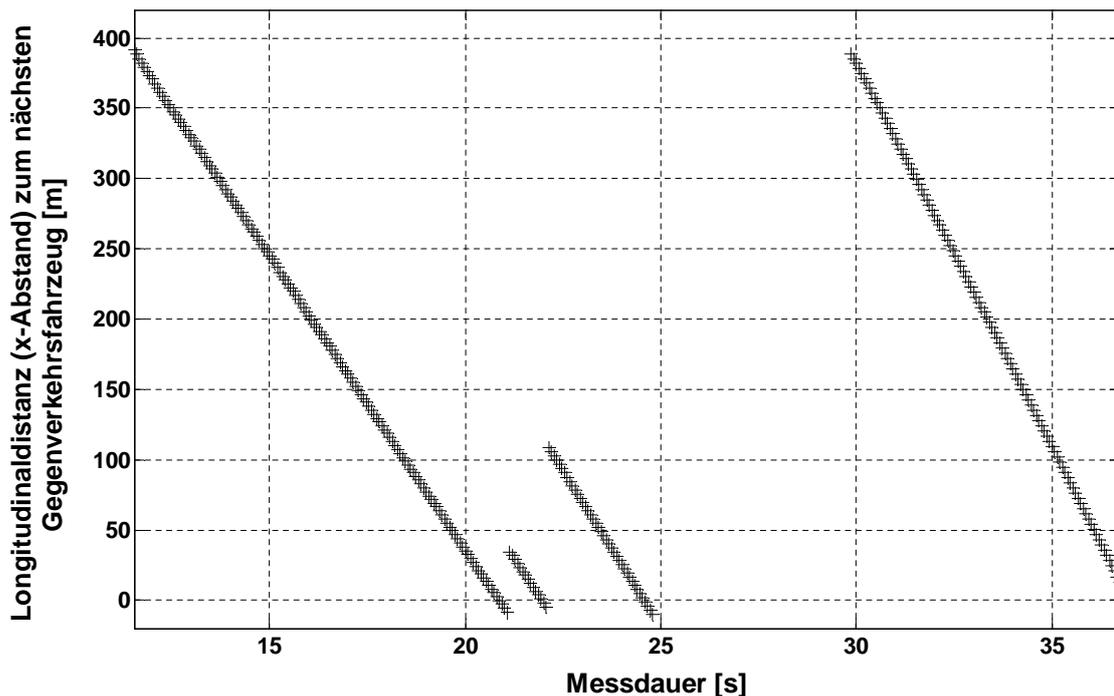


Abbildung 4.15: Objektverfolgung von Gegenverkehr: In dieser Messung treten insgesamt vier entgegenkommende Fahrzeuge auf. Dargestellt ist jeweils nur das Gegenverkehrsobjekt, welches die geringste Distanz zum EGO-Fahrzeug aufweist.

spuren keine Unterbrechungen auf, das jeweilig relevante Fahrzeug des Gegenverkehrs ist kontinuierlich beobachtbar, was am unterbrechungsfreien Verlauf der Objektspur erkannt werden kann.

Alle 30 nach dem erläuterten Muster durchgeführten Versuche zeigen vergleichbare Ergebnisse, in keinem Fall tritt die Unterbrechung einer Objektspur auf und die Erstdetektion von entgegenkommenden Fahrzeugen, die sich – ohne Sichtbehinderung – innerhalb des Sensorerfassungsbereiches befinden, liegt in jedem Fall oberhalb der geforderten Schwelle von 375 m. Darüberhinaus entsteht zu keiner Zeit eine Objektspur, die keinem real existierenden Objekt auf der vorausliegenden Fahrbahn zugeordnet werden kann. Dies konnte manuell anhand der aufgezeichneten Videodaten ermittelt werden. Mit keinem Experiment konnte die Verwerfung der aufgestellten Hypothese erreicht werden, daher ist das zusammenfassende Resultat eine Bewährung dieser Hypothese. Dies ist insofern bemerkenswert, da in der Literatur zur Umfelderkennung für Fahrerassistenzsysteme bisher keine Arbeiten bekannt sind, die Fahrzeuge in Entfernungen oberhalb von 200 m betrachten.

4.5.2 Hypothese 'Gegenverkehr bei Überholmanövern'

In der Hypothese 'Ferner Gegenverkehr' wurde gezeigt, dass die prinzipielle, robuste Beobachtung von Gegenverkehrsobjekten im relevanten Distanzbereich möglich ist. Während eines realen Überholmanövers ist die Situation jedoch komplexer als die Szenerie, die zur Bewährung dieser Hypothese gewählt wurde: Das überholende Fahrzeug weist beim Ausweichen eine Gierbewegung auf, die einen Objektverlust begünstigt, außerdem kommt das

zu überholende Fahrzeug als erhebliche Sichtverdeckung für den Sensor hinzu. Dies kann dazu führen, dass die Häufigkeit der fehlenden Messungen steigt und somit die Anforderungen an die Objektverfolgung erhöht sind. Um zu bewerten, wie sich die Situation der Beobachtung von Fahrzeugen im Gegenverkehr in verschiedenen Überholphasen darstellt, wird folgende Hypothese definiert:

Hypothese 'Gegenverkehr bei Überholmanövern'

Ein Objekttracking kann unter Verwendung eines Radarsensors so parametrieren werden, dass während der Durchführung von Überholmanövern, d. h. während des mindestens teilweisen Aufenthalts des überholenden Fahrzeugs auf dem Fahrstreifen der Gegenrichtung, nach dem erstmaligen Aufsetzen des Tracks des entgegenkommenden Fahrzeugs dieses immer ohne Trackverlust bis zum Austritt aus dem Sensorerfassungsbereich verfolgt wird. Mit der gleichen Parametrierung treten dabei während der gesamten Beobachtungsdauer keine *Falsch-Positiven* Objektspuren auf.

Ein reales Überholmanöver wird unter der Voraussetzung durchgeführt, dass sich ein Gegenverkehrsfahrzeug während der gesamten Dauer des Manövers im Erfassungsbereich der Sensorik befindet. Auf diese Weise wird die Bewertung der robusten Erfassung dieses Umfeldobjekts in realen Überholsituationen ohne Unterbrechung der Objektspur möglich. Als

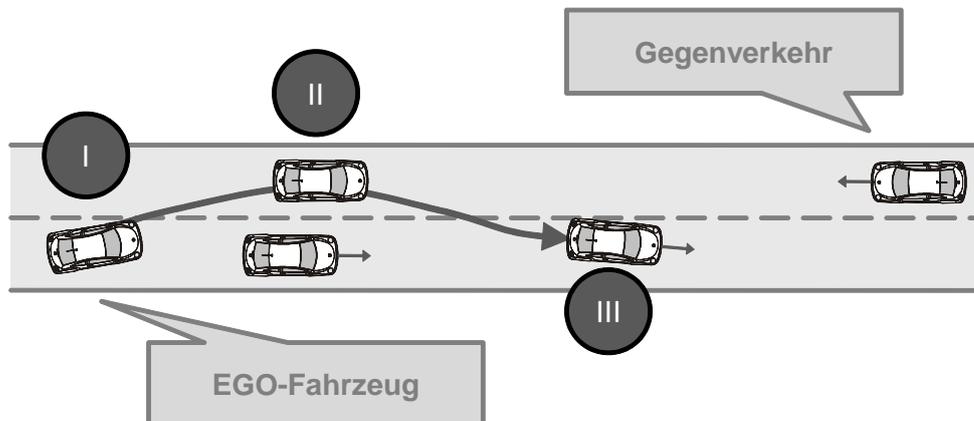


Abbildung 4.16: Fahrversuch zur Hypothese 'Gegenverkehr bei Überholmanövern': Das Messfahrzeug überholt ein mit ca. 80 km/h fahrendes Fahrzeug während Fahrzeug „C“ mit gleicher Geschwindigkeit entgegenkommt. Der Überholvorgang wird erst bei einer Unterschreitung einer Distanz von 400 m zwischen EGO-Fahrzeug und Gegenverkehr gestartet. Hierdurch wird sichergestellt, dass sich der Gegenverkehr im Erfassungsbereich der verwendeten Sensorik befindet. Der Überholbeginn ist mit 'I' gekennzeichnet, das Überholende mit 'III', 'II' repräsentiert eine Fahrzeugposition während der Vorbeifahrt.

Bewertungsstrategie wurden entsprechende Überholmanöver in großer Zahl durchgeführt und daraufhin untersucht, ob die Aussage der Hypothese widerlegt werden kann, gelingt dies nicht, wird die Hypothese als bewährt betrachtet. Die Fahrversuche wurden analog zur

Hypothese 'Ferner Gegenverkehr' auf öffentlichen Straßen durchgeführt. Da die Hypothese voraussetzt, dass der Gegenverkehr zum Zeitpunkt des Überholbeginns bereits innerhalb der Sensorreichweite liegt, sind die Manöver im Bezug auf den Abstand zum Gegenverkehr tendenziell eher als knapp zu bezeichnen. Aus diesem Grund wurden in diesem Fall keine Gegenverkehrsfahrzeuge aus dem normalen Verkehrsfluss beobachtet. Alle drei zur Darstellung des Überholvorgangs benötigten Fahrzeuge waren gestellte Versuchsfahrzeuge mit instruierten Fahrern, Abbildung 4.16 zeigt die Situation. Fahrzeug „B“ und „C“ fahren jeweils mit einer Geschwindigkeit von ca. 80 km/h. Insgesamt wurden auf 3 Versuchsstrecken (Anhang F.5; F.2; F.3) 30 derartige Überholmanöver durchgeführt und die Ergebnisse des Objekttrackings aufgezeichnet. Abbildung 4.17 zeigt einen typischen Verlauf für die Lateraldistanz aus der Objektspur eines Gegenverkehrsfahrzeugs. Es ist deutlich erkennbar,

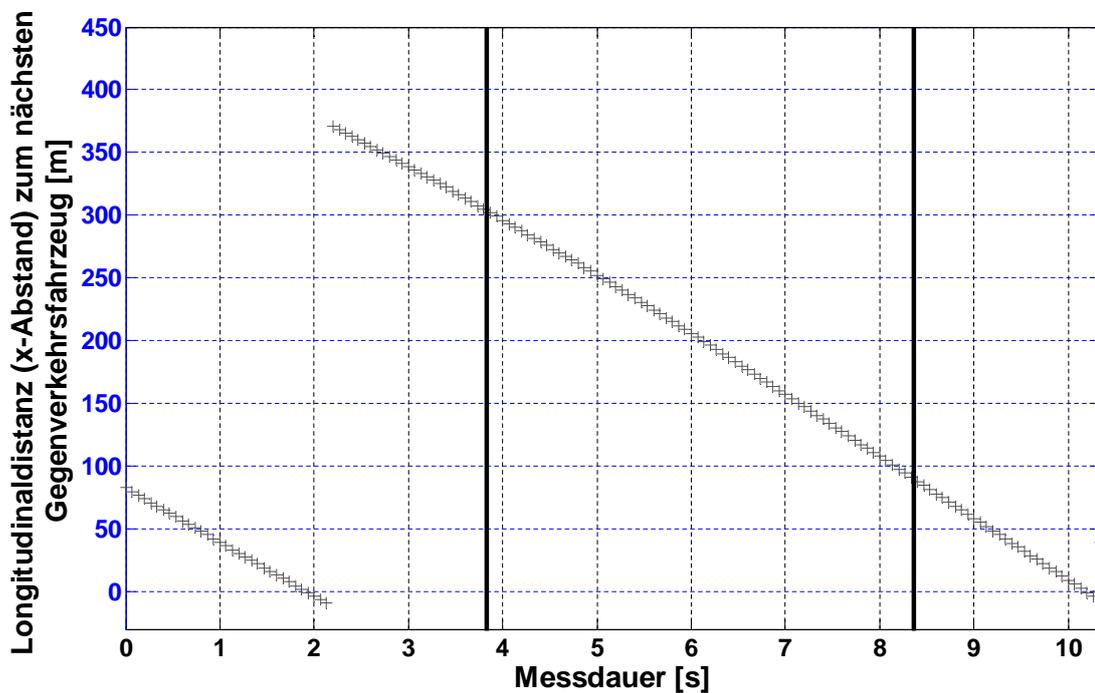


Abbildung 4.17: Objektverfolgung während eines Überholmanövers: Nach der Vorbeifahrt eines entgegenkommenden Fahrzeugs beginnt der Fahrer ein Überholmanöver. Zu diesem Zeitpunkt hat die Objektspur des nächsten Gegenverkehrsfahrzeugs bereits seit etwa 1,5 Sekunden aufgesetzt. Während des gesamten Manövers bleibt diese Objektspur intakt.

dass die Objektverfolgung durch die gegebenen Randbedingungen wie das vorausfahrende Fahrzeug oder die Fahrstreifenwechselmanöver nicht negativ beeinflusst wird, die Objektsuren bleiben kontinuierlich, es findet kein Objektverlust statt. Abgesehen von der in dieser Messung gegebenen Sichtbarkeit des Gegenverkehrs trotz partieller Verdeckung durch den vorausfahrenden Verkehr weisen alle 30 durchgeführten Experimente einen vergleichbaren Verlauf auf, es wurde keine Situation mit Objektverlust identifiziert. Als Ergebnis wird die Hypothese auf Basis der 30 Versuchsfahrten als bewährt angenommen.

4.5.3 Hypothese 'Quermanöver: Kontinuierliche Objektverfolgung'

Bei der Bewertung der Hypothese 'Gegenverkehr bei Überholmanövern' wurde geprüft, ob sich bei Durchführung eines Überholmanövers eine robuste Erfassung des Gegenverkehrs dahingehend erreichen lässt, dass nach dem erstmaligen Aufsetzen einer Objektspur diese bis zum Austritt des Objekts aus dem Sensorerfassungsbereich beobachtet werden kann. Bei der Durchführung dieser Manöver war jedoch nicht zu erwarten, dass die lateralen Bewegungen des EGO-Fahrzeugs während des Ausschervorgangs einen ausgesprochen hohen Wert aufwiesen, da hier ein eher durchschnittlicher Überholfall im Zentrum der Betrachtungen lag. Zum Test der Leistungsfähigkeit der Umfelderkennung in Situationen mit besonders starken Bewegungen des EGO-Fahrzeugs in lateraler Richtung wird daher die Hypothese definiert:

Hypothese 'Quermanöver: Kontinuierliche Objektverfolgung'

Bei querdynamischen Fahrmanövern auf Landstraßen mit Spitzenquerbeschleunigungen von über 2m/s^2 bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h tritt bei der Verfolgung von Gegenverkehrsfahrzeugen niemals eine Unterbrechung einer Objektspur auf, solange sich der Gegenverkehr im Erfassungsbereich des Umfeldsensors befindet.

Der Wert für die Querbeschleunigung ist aus einer Untersuchung von SCHIMMELPFENNIG ET. AL. entnommen, bei der Probanden die Aufgabe gestellt bekamen, „scharfe“ Fahrstreifenwechselmanöver auszuführen. Für einen Geschwindigkeitsbereich von typischerweise 80 km/h beim Ausscheren wurden hier Höchstwerte bei $a_q = 2\text{m/s}^2$ ermittelt³⁰. Zur Prüfung der Hypothese wurden zwei Versuche definiert, deren Aufbau in Abbildung 4.18 skizziert ist. In der oberen Darstellung kommt dem EGO-Fahrzeug Gegenverkehr entgegen, beide Fahrzeuge fahren mit einer Geschwindigkeit von etwa 80 km/h , aufgezeichnet werden jeweils die Daten der Objektverfolgung. Vor Eintritt des Gegenverkehrs in den Erfassungsbereich des Radar-Sensors beginnt das EGO-Fahrzeug mit einer Wedelfahrt innerhalb der Grenzen des eigenen Fahrstreifens. Der Fahrer des EGO-Fahrzeugs hat die Aufgabe, die Wedelfahrt so durchzuführen, dass beim Manöver die in der Hypothese geforderten Querbeschleunigungswerte erreicht werden. Da das EGO-Fahrzeug in diesem Versuch zu jeder Zeit innerhalb des rechten Fahrstreifens verbleibt und nicht in den Bereich des Gegenverkehrsfahrstreifens einfährt, ist die Kritikalität des skizzierten Versuchsaufbaus als vergleichsweise gering zu bewerten. Daher werden die Versuche im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt, beide beteiligte Fahrzeuge werden von instruierten Versuchsfahrern bewegt. Als Teststrecke wurde wegen der geringen Verkehrsdichte die Dieburger Straße gewählt (Anhang F.5). Der Versuch in der unteren Skizze besitzt einen vergleichbaren Grundaufbau, auch die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge sind identisch bei 80 km/h gewählt. Beim Wedelmanöver verbleibt das EGO-Fahrzeug jedoch hier nicht innerhalb des linken Fahrstreifens, stattdessen werden vollständige Fahrstreifenwechselmanöver durchgeführt. Auch in diesem Fall wird das Erreichen von maximalen Querbeschleunigungen von 2m/s^2 angestrebt. Da sich im Verlauf des Manövers zwei Fahrzeuge auf dem gleichen Fahrstreifen annähern, ist die Kritikalität höher zu bewerten. Somit wurden die Versuche auf einer

³⁰Schimmelpfennig/Nackenhorst (1985): Unfallrekonstruktion S. 96.

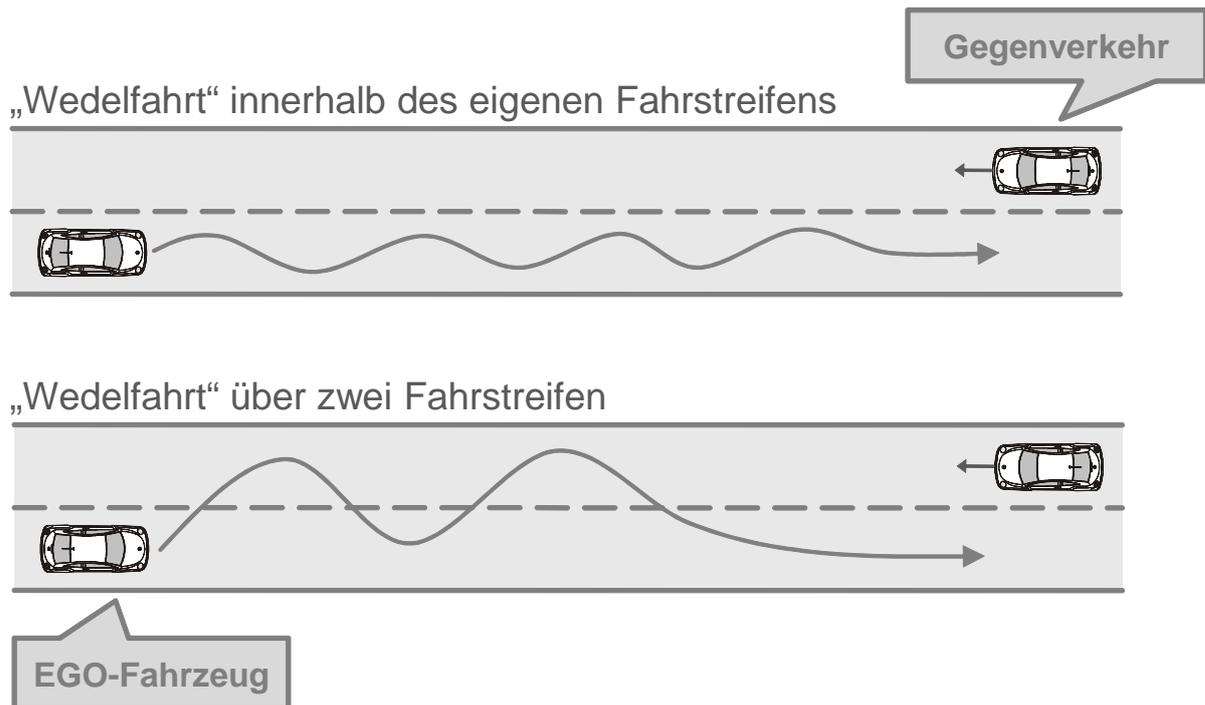


Abbildung 4.18: Fahrversuche zur Hypothese 'Quermanöver: Kontinuierliche Objektverfolgung': Während die Umfelderkennung im EGO-Fahrzeug das entgegenkommende Objekt beobachtet, werden zwei verschiedene Wedelmanöver durchgeführt um zu bewerten, ob auch unter diesen Bedingungen eine stabile, unterbrechungsfreie Objektverfolgung gewährleistet werden kann.

Landstraßensituation auf einer abgesperrten Teststrecke in Darmstadt/Griesheim durchgeführt (Anhang F.1).

Insgesamt 28 Wedelfahrten wurden nach dem gezeigten Muster durchgeführt, 10 Fahrten innerhalb des eigenen Fahrstreifens und 18 auf dem Testgelände mit vollständigem Fahrstreifenwechsel. In Abbildung 4.19 ist ein Beispielverlauf der aufgezeichneten Messdaten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Aufsetzen der Objektspur trotz der in diesem Augenblick auftretenden, hohen Querschleunigung in der Größenordnung von $a_q = 4\text{m/s}^2$ insoweit zuverlässig erfolgt, als danach keine Unterbrechung der Spur zu erkennen ist. Der gezeigte Verlauf ist repräsentativ für alle 28 durchgeführten Versuche, es konnte in keiner Situation ein Objektverlust festgestellt werden.

Da die aufgestellte Hypothese durch die Ergebnisse der Fahrversuche nicht verworfen werden konnte, wird sie als bewährt betrachtet.

4.5.4 Hypothese 'Quermanöver: Erstdetektion'

Neben der robusten Verfolgbarkeit entgegenkommender Fahrzeuge ist für eine rechtzeitige Warnung oder einen Eingriff in die Fahrsituation entscheidend, wie früh das Aufsetzen der Objektspur gelingt. Dies wurde bereits in den Versuchen zur Hypothese 'Frühzeitige Detektion' untersucht, jedoch ohne den Einfluss einer dedizierten Querbewegung des EGO-Fahrzeugs. Um diesen Einfluss zu bewerten, wird die Hypothese 'Quermanöver: Erstdetektion' definiert:

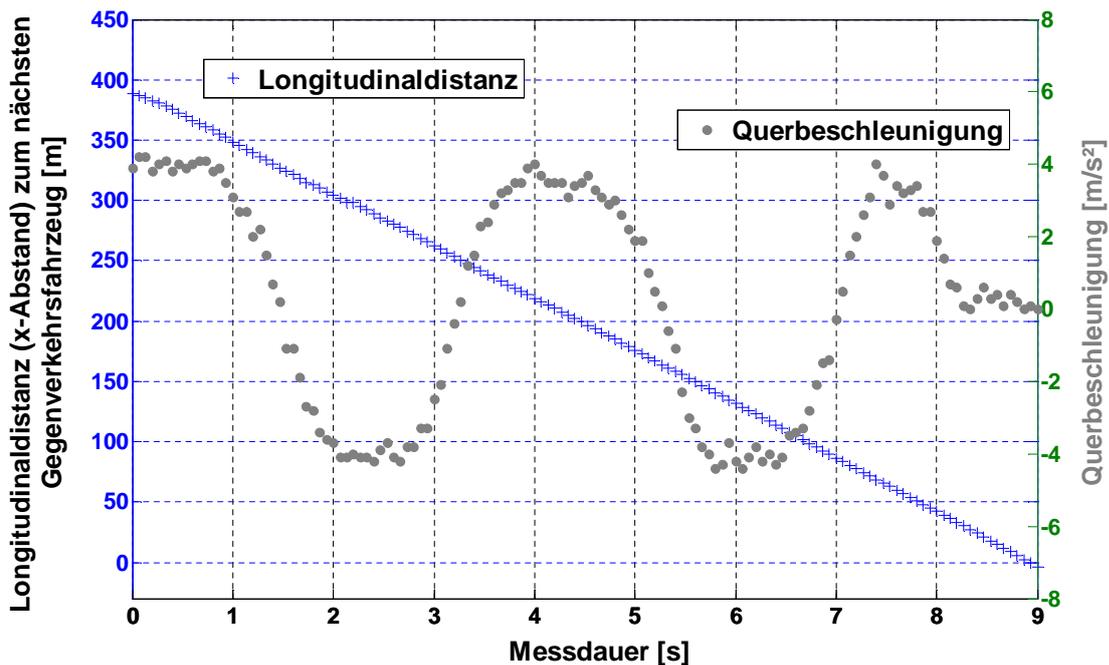


Abbildung 4.19: Darstellung der Ergebnisse der Objektverfolgung für einen Versuch mit vollständigem Fahrstreifenwechsel. Die Objektpur setzt in einer Distanz von knapp unter 400 m auf. Im gleichen Zeitkontext ist der Verlauf der Querbeschleunigung des EGO-Fahrzeugs gezeigt. Die erreichten Spitzenwerte liegen hier deutlich über der geforderten Schwelle von 2m/s^2 . Zum Zeitpunkt des Aufsetzens der Objektpur liegt dieser Wert im Bereich 4m/s^2 . Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Kontinuität der Verfolgbarkeit des Gegenverkehrsobjekts.

Hypothese 'Quermanöver: Erstdetektion'

Bei querdynamischen Fahrmanövern auf Landstraßen mit Spitzenquerbeschleunigungen von über 2m/s^2 und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h , liegt die Erstdetektion von entgegenkommenden Fahrzeugen nie unterhalb von 375 m .

Zur Hypothesenbewertung können die gleichen Versuche herangezogen werden, wie bei der Hypothese 'Quermanöver: Kontinuierliche Objektverfolgung'. Da sich bei der Betrachtung der aufgezeichneten Querbeschleunigungen erkennen lässt, dass die erreichten Werte beim vollständigen Fahrstreifenwechsel deutlich höher ausfallen, werden hier im Sinne einer Worst-Case Betrachtung nur die 18 Manöver des Versuchs auf dem Testgelände in Griesheim verwendet. Der Versuchsaufbau entspricht der unteren Darstellung in Abbildung 4.18, die Geschwindigkeiten der beiden beteiligten Fahrzeuge liegen bei 80 km/h . Für die Bewertung der vorliegenden Hypothese wurde eine Analyse der Distanz der jeweiligen Erstdetektion erstellt, Abbildung 4.20. Es wird deutlich, dass die Distanzen der Erstdetektion in keinem der Ergebnisse unterhalb der geforderten Schwelle von 375 m liegen. Die Aussage der Hypothese kann somit nicht verworfen werden. Damit ist die Hypothese als bewährt zu betrachten.

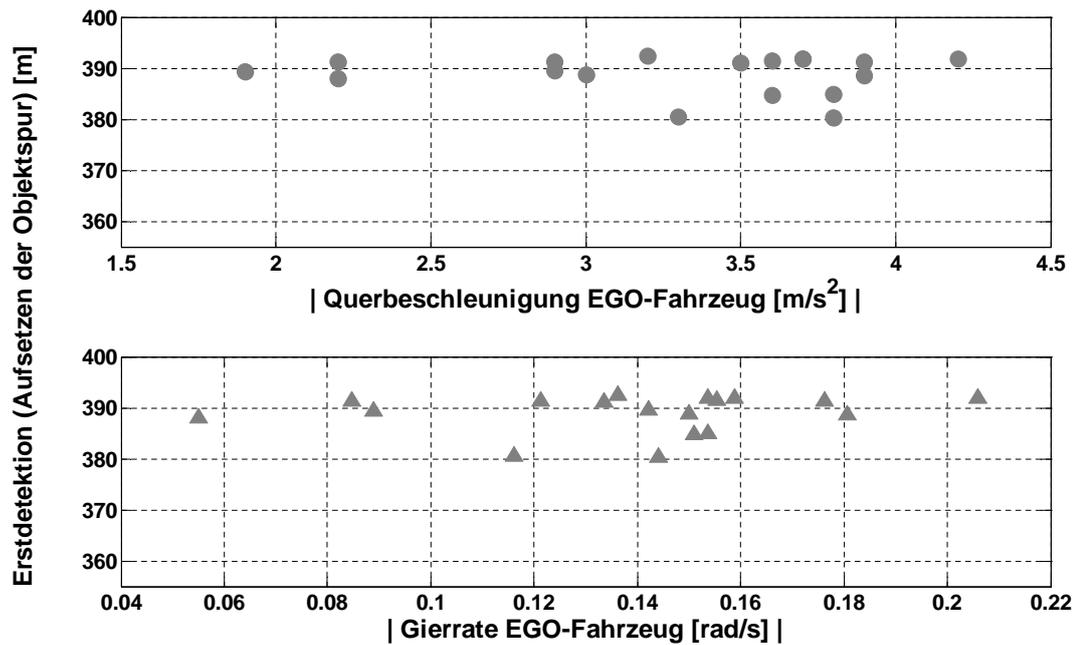


Abbildung 4.20: Distanzen, zu denen bei einer definierten Querbewegung ein erstmaliges Aufsetzen der Objektpur erreicht wurde, in Abhängigkeit der Querbewegung (oben) bzw. Gierrate (unten). Aus der Darstellung ergibt sich keine Korrelation zwischen den querdynamischen Größen und der erreichten Distanz der Erstdetektion.

4.5.5 Hypothese 'Frühzeitige Detektion'

Als prinzipielles Assistenzziel wurde in dieser Arbeit eine – für den Fall einer gefährlichen Situation – möglichst frühzeitige Warnung des Fahrers identifiziert. Der Beginn des Überholmanövers stellt hier einen guten Orientierungspunkt dar, da das EGO-Fahrzeug erst ab diesem Zeitpunkt in den Fahrstreifen des Gegenverkehrs einfährt und somit eine signifikante Erhöhung des Gefährdungspotentials in der Überholsituation auftritt. Allerdings befindet sich der Überholer zu diesem Zeitpunkt noch in lateraler Verdeckung zum zu überholenden Fahrzeug, so dass die Sichtbarkeit des Gegenverkehrs als zentrales Element zur Bewertung der Gefährlichkeit des Manövers nicht uneingeschränkt vorausgesetzt werden kann. Um die Forschungsfrage zu beantworten, inwieweit eine Detektion des Gegenverkehrs dennoch bereits zu diesem frühen Manöverzeitpunkt realisierbar ist, wird folgende Hypothese definiert:

Hypothese 'Frühzeitige Detektion'

Mit einem Radarsensor, der an einer ACC-typischen Position am EGO-Fahrzeug angebracht ist, kann Gegenverkehr, bei Wahl eines Ausscherabstandes unterhalb einer Schranke von 15 m, zum Zeitpunkt des Beginns eines Überholvorgangs immer erkannt werden, sofern er sich zu diesem Zeitpunkt innerhalb eines Distanzbereichs von 375 m vor dem EGO-Fahrzeug befindet.

Bestandteil der Hypothese ist zunächst die Beschreibung des Anbauortes des Umfeldsensors. Um während des Ausscherens den Gegenverkehr beobachten zu können, ist offenbar eine Anbringung des Sensors möglichst weit auf der linken Seite des EGO-Fahrzeugs anzuraten. Die in dieser Arbeit verwendeten Versuchsfahrzeuge weisen jedoch eine Befestigung des Radar-Sensors an Positionen auf, die für die Nutzung im Rahmen serienüblicher ACC-Systeme angepasst ist, das Bauteil befindet sich also lateral nahe der Fahrzeugmittelachse.

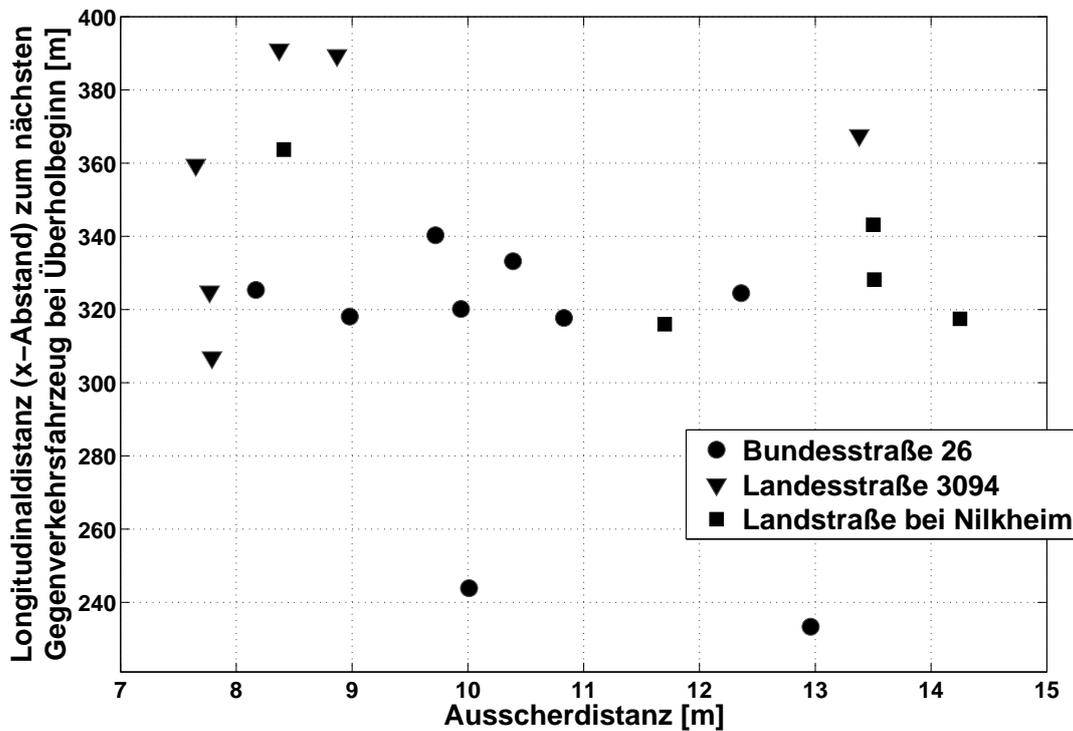


Abbildung 4.21: Kenngrößen des Überholvorgangs zur Bewertung der Hypothese 'Frühzeitige Detektion'. Um ein Worst-Case Szenario darzustellen, ist eine möglichst hohe Distanz zum Gegenverkehr und eine möglichst geringe Ausscherdistanz anzustreben. Die nach dieser Definition kritischsten Situationen sollten also tendenziell links oben zu finden sein.

Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass sich das vorgeschlagene Überholassistenzsystem möglichst einfach in ein bestehendes Packaging einfügen soll, ohne grundlegende Veränderungen aufgrund der Integration des Sensors im Fahrzeug zu erfordern. Der Mehrwert würde in diesem Fall ausschließlich durch zusätzliche Software-Funktionen realisiert. Zur Bewertung der Hypothese wurden Fahrversuche durchgeführt, die eine leichte Falsifikation der Hypothesenaussage erwarten lassen, also Worst-Case Situationen für die Erfassung von Gegenverkehr. Dies kann dadurch erreicht werden, indem vollständige Überholmanöver durchgeführt werden, bei denen der Ausscherabstand zu Beginn des Manövers gering ist, um eine hohe Verdeckung der Sicht auf den Gegenverkehr durch das zu überholende Fahrzeug zu erreichen. Weiter wird die Erfassung dadurch erschwert, dass sich das Gegenverkehrsfahrzeug in großer Distanz vor dem EGO-Fahrzeug befindet, jedoch noch so nahe, dass die prinzipielle Erkennung durch den Sensor gewährleistet ist. Der Versuchsaufbau ist vergleichbar mit den Versuchen zur Bewertung der Hypothese 'Gegenverkehr bei Überholmanövern', Abbildung 4.16 in Abschnitt 4.5.2. Insgesamt wurden 20 Überholmanöver auf

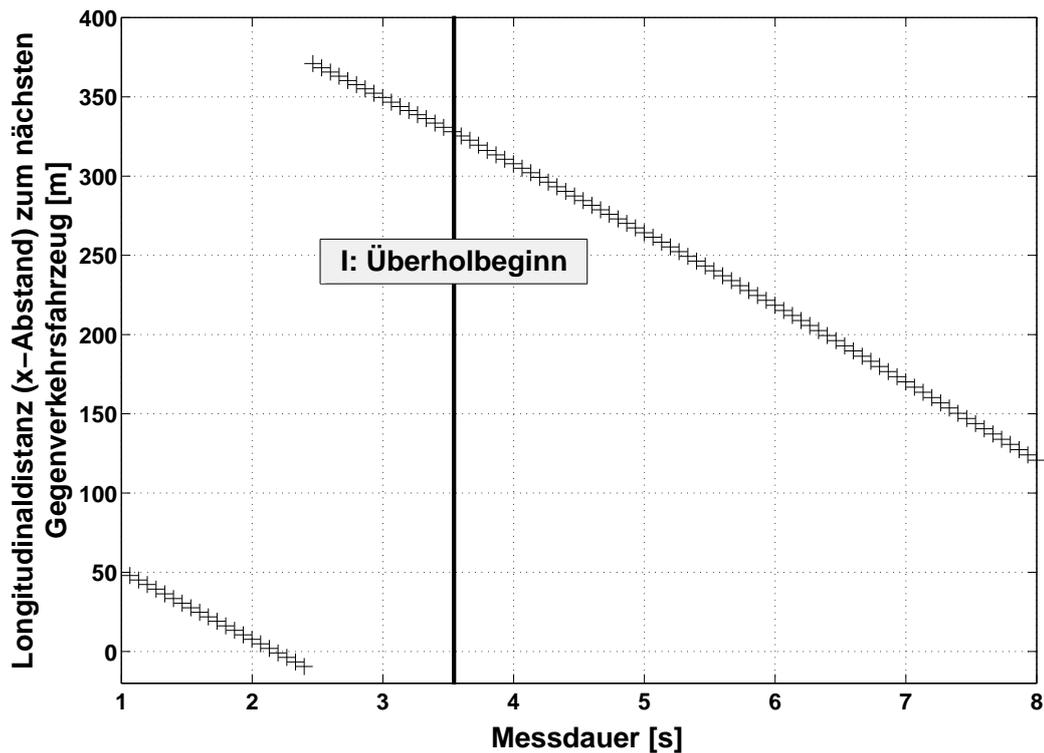


Abbildung 4.22: Beispielhafter Verlauf aus den Bewertungsversuchen zur Hypothese 'Frühzeitige Detektion von Gegenverkehr'. Das entgegenkommende Fahrzeug war in allen Versuchsfahrten zum Zeitpunkt des Überholbeginns sichtbar, d. h. die entsprechende Objektspur war bereits erzeugt, ohne dass ein Objektverlust in der restlichen Beobachtungszeit auftrat.

öffentlichen Strecken durchgeführt, alle beteiligten Fahrzeuge wurden dabei von Versuchsfahrern bewegt. Das zu überholende Fahrzeug wurde von einem Kleintransporter Sprinter von Mercedes-Benz dargestellt (Anhang D), um sich bezüglich der Verdeckung stärker in Richtung des gewünschten Worst-Case Falles zu orientieren. Für das Überholfahrzeug galt die Maßgabe, den Überholvorgang mit einer Ausscherdistanz von weniger als 15 m zu starten, sobald ein Gegenverkehrsfahrzeug sich auf eine Distanz unterhalb 375 m genähert hatte, bei fehlender Sichtverdeckung also mutmaßlich problemlos durch die Umfelderausfassung zu detektieren ist. Dem Start des Überholens sollte dabei eine Folgefahrt vorangehen, bei der der Überholer möglichst nah an der Mittellinie fährt, ohne diese jedoch zu überschreiten. Diese Vorgehensweise imitiert das Hinterherfahren vor Fahrzeugen, wenn auf eine Überholgelegenheit gewartet wird. Die Bewertung, wann ein Gegenverkehrsfahrzeug ausreichend herangefahren war, wurde der Erfahrung des Versuchsfahrers überlassen. In Abbildung 4.21 sind für alle durchgeführten Versuche die Kombinationen aus Ausscherabstand und Distanz zum Gegenverkehr zum Zeitpunkt des Überholbeginns dargestellt. Der Mittelwert der Distanz zum Gegenverkehr lag über alle Versuche bei etwa 328 m, der Mittelwert der Ausscherdistanzen bei 10,4 m. Die 20 Versuchsfahrten fanden auf verschiedenen Straßen im Darmstädter Umland statt, auf der Bundesstraße 26, der Landesstraße 3094 sowie der Verbindungsstraße Aschaffenburg-Niedernberg (siehe Anhänge F.5; F.2; F.3). Als Resultat der Versuche konnte keine Falsifikation der Hypothese beobachtet werden, die relevanten Fahrzeuge im Gegenverkehr waren in jeder Situation bereits zum Zeitpunkt

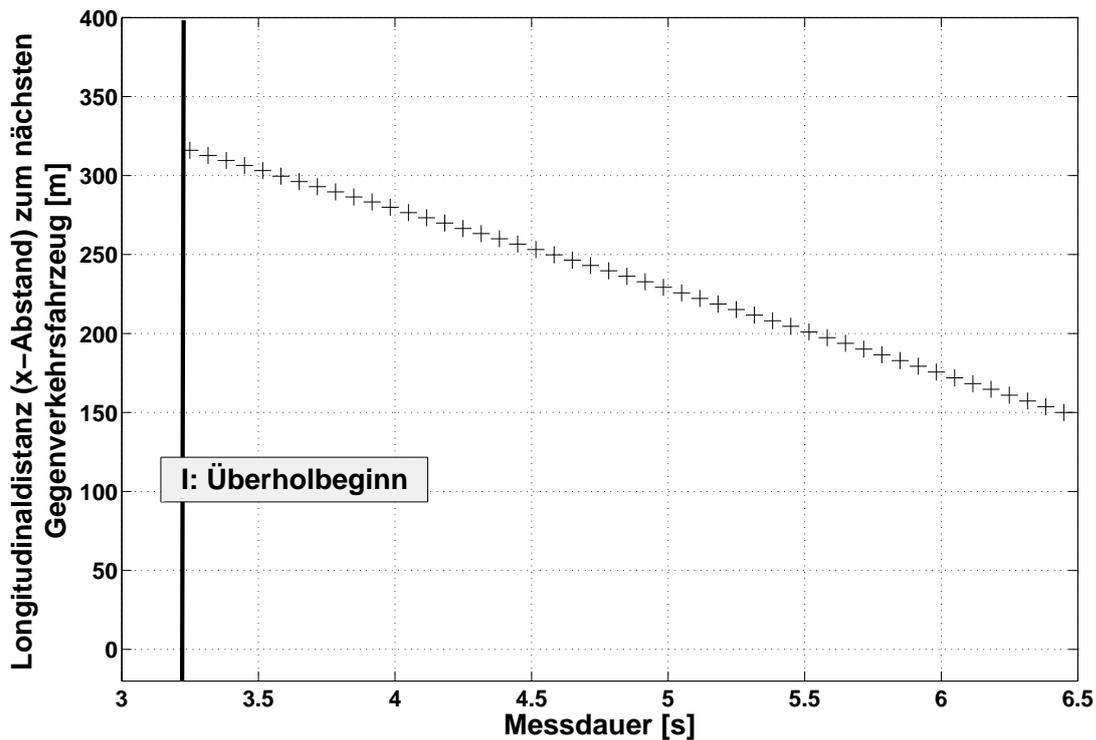


Abbildung 4.23: In der gezeigten Situation ist der Gegenverkehr zum markierten Zeitpunkt des Überholbeginns zwar sichtbar, jedoch fällt in diesem Fall dieser Moment mit dem Aufsetzen der Objektspur zusammen.

des Überholbeginns sichtbar, ein Beispiel für einen typischen Verlauf ist in Abbildung 4.22 dargestellt. Falls sich auf Basis der Konstellation der betrachteten Fahrzeuge zu diesem Zeitpunkt also eine gefährliche Situation hätte erkennen lassen, wäre also beispielsweise eine Warnung des Fahrers bereits früh ermöglicht worden. Bei drei der durchgeführten Versuche fand das Aufsetzen der Objektspur des Gegenverkehrs quasi zeitgleich mit dem Beginn des Überholens statt, jedoch noch ausreichend früh, dass das Gegenverkehrsfahrzeug zum Überholbeginn sichtbar war. In Abbildung 4.23 ist die Objektspur des entsprechenden Gegenverkehrsfahrzeugs mit der Markierung des Überholbeginns aufgezeichnet. Diese Fälle traten alle auf der Versuchsstrecke Aschaffenburg-Niedernberg (F.3) auf, was die Vermutung nahelegt, dass die Ursache in dem im Vergleich zu den übrigen Versuchsorten niedrigeren Regelquerschnitt und der damit verbundenen, geringeren Fahrstreifenbreite zu suchen ist. Abbildung 4.24 illustriert die Situation: Bei einem breiten Fahrstreifen ist der Lateralversatz zwischen den Fahrzeugen „A“ und „B“ zum Überholbeginn größer als bei einer geringen Fahrstreifenbreite, die Sichtbarkeit ist bei breiten Straßenquerschnitten offenbar günstiger. Diese gefundene Abhängigkeit von der Straßengeometrie bestätigt die Annahme, dass die Positionierung des Umfeldsensors am EGO-Fahrzeug maßgeblichen Einfluss auf die frühe Detektierbarkeit von Gegenverkehrsfahrzeugen besitzt. Dennoch wurde auch mit einem ACC-typischen Befestigungsort, wie im Versuchsfahrzeug realisiert, keine Verwerfung der Hypothese erreicht.

Die durch die vorliegenden Ergebnisse motivierte Änderung des Einbauortes für den Radar-Sensor findet sich auch bei einem aktuellen Serienfahrzeug von Audi, Abbil-

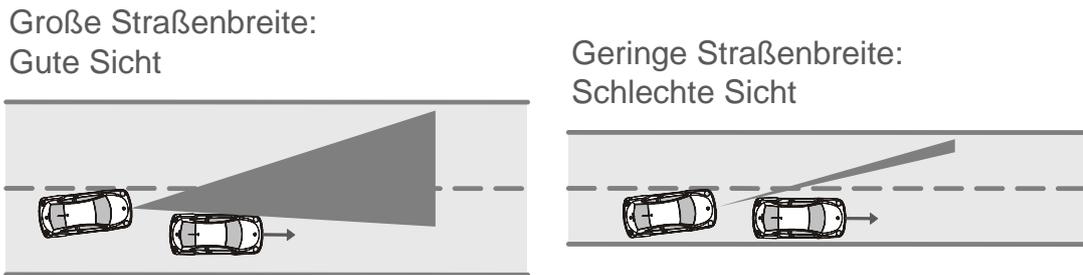


Abbildung 4.24: Durch den geringen Lateralversatz zwischen dem Überholer und dem zu überholenden Fahrzeug zum Zeitpunkt des Überholbeginns ergibt sich bei schmalen Straßen bzw. niedrigen Regelquerschnitten eine schlechtere Sicht auf den entgegenkommenden Verkehr.



Abbildung 4.25: Audi A8 Modelljahr 2010. An der Stelle, an der üblicherweise Nebelscheinwerfer verbaut sind, sitzen bei diesem Modell zwei Radar-Sensoren für den ACC-Betrieb sowie Pre-Crash Anwendungen (Quelle: Audi Media Services).

Abbildung 4.25. In diesem Fahrzeug sind insgesamt 2 Radarsensoren für den ACC-Betrieb im Front-Stoßfänger an der Position verbaut, an der sich in einem konventionellen Fahrzeug die Nebelscheinwerfer befinden. Die Position des linken Radars kommt dabei der Idealposition aus Sicht der Umfelderkennung für die Detektion von Gegenverkehr sehr nahe, so dass bei einer solchen Doppel-Radar Konfiguration einer der beiden Sensoren als Datenquelle für ein Überholassistenzsystem mitgenutzt werden könnte.

4.5.6 Hypothese 'Enges Überholziel'

Überholziele treten in den meisten Fällen zwischen dem sich unmittelbar vor dem EGO-Fahrzeug befindlichen zu überholenden Fahrzeug und dem Gegenverkehr auf. Wenn diese beiden Fahrzeuge zum Beginn des Überholvorgangs von der Objektverfolgung erkannt sind, ist eine Bewertung der Sicherheit der Überholsituation möglich, vorausgesetzt, hinter dem zu überholenden Fahrzeug befindet sich ein Überholziel, das ein sicheres Wiedereinscheren ermöglicht. Prinzipiell sind Situationen denkbar, bei denen am Überholbeginn zwar eine Erfassung des Gegenverkehrs und des unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeugs gelingt, weiter vorne fahrende Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aber aufgrund der Sichtver-

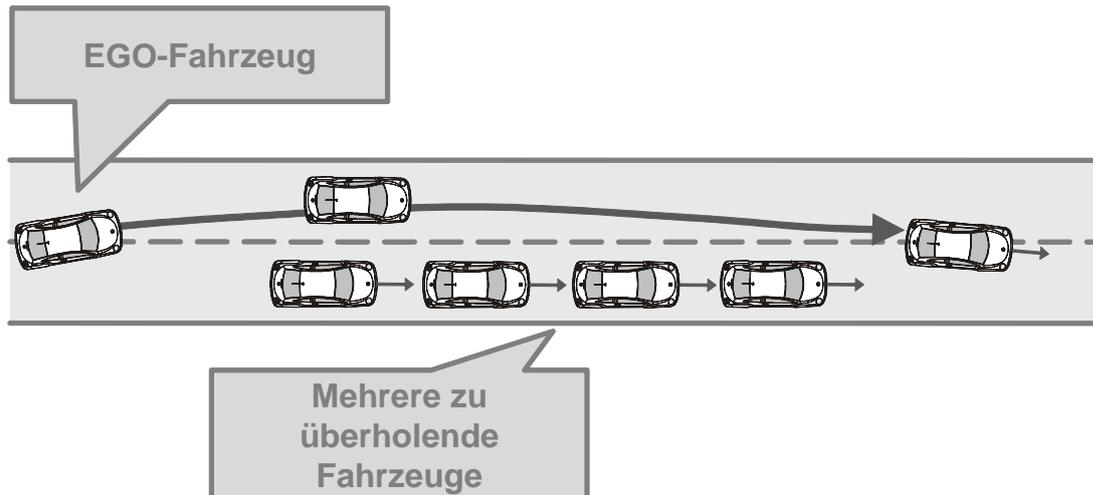


Abbildung 4.26: Befindet sich direkt hinter dem unmittelbar zu überholenden Fahrzeug kein Überholziel für ein sicheres Wiedereinscheren, da dort mit kurzem Abstand ein weiteres Fahrzeug fährt, so kann sich bei einer späten Detektion dieses zweiten Fahrzeugs während eines Überholvorgangs unvermittelt eine als gefährlich eingestufte Situation ergeben.

deckung durch das Fahrzeug „B1“ noch nicht erkannt werden, Abbildung 4.26. Falls ein solches Fahrzeug „B2“ existiert, kann es zu „B1“ einen so geringen Abstand aufweisen, dass das Wiedereinscheren hinter dem Fahrzeug „B1“ nicht möglich ist. Um in dieser Situation jedoch zusätzlich „B2“ zu überholen, ist eine längere Aufholstrecke notwendig, die in der Zeit zurückgelegt werden muss, in der sich der Gegenverkehr nicht zu sehr angenähert hat. Falls eine Detektion von Fahrzeugen, die sich unmittelbar vor dem vorausfahrenden Fahrzeug befinden, also erst nach dem Zeitpunkt des Überholbeginns möglich ist, kann eine unvermittelte Verschärfung der Überholsituation zu einem Zeitpunkt eintreten, zu dem sich das EGO-Fahrzeug bereits zum Teil auf dem Gegenverkehrsfahrbahnen befindet. Wenn sichergestellt werden soll, dass die erläuterte Situation nicht auftritt, muss geprüft werden, ob der Bereich vor dem zu überholenden Fahrzeug „B“ durch die Umfelderkennung soweit eingesehen werden kann, dass ein zum Überholbeginn existierendes Fahrzeug „B2“ robust erkannt werden kann. Zu diesem Zweck wird die Hypothese 'Enges Überholziel' definiert:

Hypothese 'Enges Überholziel'

Mit einem Radarsensor, der an einer ACC-typischen Position am EGO-Fahrzeug angebracht ist, können in gleicher Richtung fahrende Fahrzeuge, die sich vor dem unmittelbar zur überholenden Fahrzeug befinden, immer zum Zeitpunkt des Überholbeginns robust erkannt werden, sofern diese beiden Fahrzeuge ein Überholziel bilden, das kein sicheres Wiedereinscheren ermöglicht.

Für den praktischen Versuch, diese Hypothese zu verwerfen, wird eine Worst-Case Situation definiert, in der ein Versuchsfahrer – aus einer stationären Folgefahrt heraus – einen kurzen Überholansatz fährt. Auf dieser Basis wird analysiert, ob die Erfassung von zwei

zu überholenden Fahrzeugen möglich ist, die in der gestellten Situation einen so geringen Abstand zueinander aufweisen, dass ein sicheres Einscheren nicht möglich ist. Zum Zeitpunkt des Überholbeginns sollen sich beide Fahrzeuge in möglichst großer Distanz zum EGO-Fahrzeug befinden, da zu erwarten ist, dass die Detektionsrobustheit mit zunehmender Distanz sinkt. Durch die Abschätzungen der maximalen Reichweite, die ein Sensor aus kinematischen Betrachtungen bei der Sicht auf den rechten Fahrstreifen erreichen muss, ergibt sich jedoch eine obere Schranke für diese Distanz. Aus der Darstellung in Abbildung 4.4 aus Abschnitt 4.1.2 lässt sich ablesen, dass sich diese für typische Überhol-

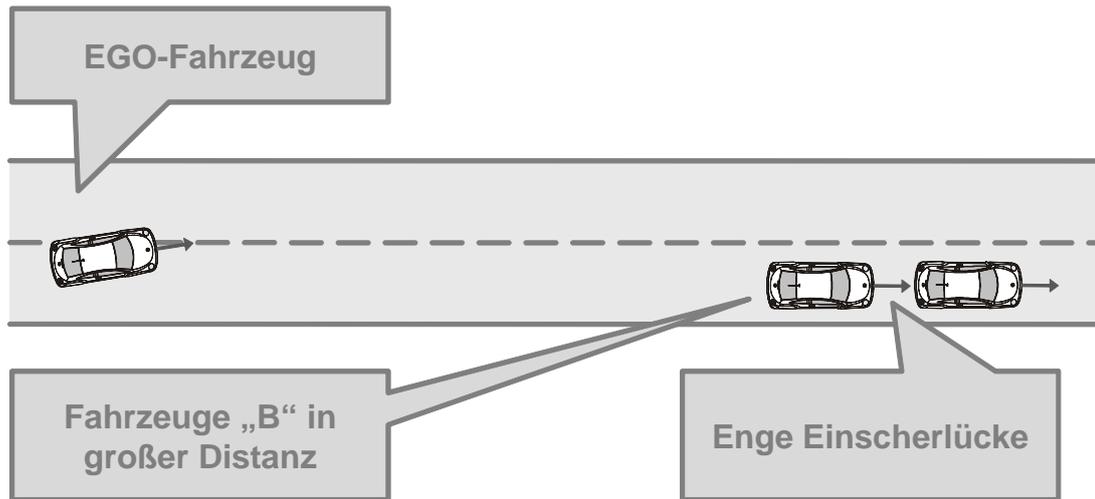


Abbildung 4.27: Fahrversuche zur Hypothese 'Enges Überholziel': Das EGO-Fahrzeug beginnt einen Überholvorgang, in einer Distanz von etwa 50 m fahren zwei Fahrzeuge in dichtem Abstand hintereinander. Untersucht wird, ob das weiter entfernte Fahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen zu Beginn des Überholvorgangs robust detektierbar ist.

manöver unterhalb eines Wertes von etwa 50 m befindet. Der Versuchsfahrer soll daher den Überholansatz im Experiment zu einem Zeitpunkt durchführen, bei dem der Abstand zum unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug kleiner ist als dieser Maximalwert. Um die Detektion der Fahrzeuge vor dem unmittelbar zu Überholenden weiter zu erschweren, wird im Fahrversuch kein Pkw als Fahrzeug „B1“ verwendet, sondern erneut der Kleintransporter Mercedes-Benz Sprinter, der eine – visuell – weitaus größere Verdeckung des dahinterliegenden Fahrstreifens erzeugt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.27 skizziert. Alle drei beteiligten Fahrzeuge werden von Versuchsfahrern bewegt. Das EGO-Fahrzeug beginnt einen Überholvorgang aus einer geschwindigkeitsstationären Fahrt aller beteiligten Fahrzeuge von 80 km/h. Aufgezeichnet wird der Signalausgang der Objektverfolgung. Im Szenario wird kein Gegenverkehr berücksichtigt. Insgesamt wurden nach dem dargestellten Muster 16 Überholvorgänge durchgeführt. Versuchsort war die Dieburger Straße bei Darmstadt (Anhang F.5). In 13 Fällen konnte dabei das dem Vorderfahrzeug unmittelbar voranfahrende Fahrzeug bereits zu Beginn des Überholmanövers erkannt werden. In 3 Fällen war dies jedoch nicht möglich, Beispiele für beide Situationen sind in den Abbildungen 4.28 und 4.29 aufgeführt. Als Ergebnis der Versuche muss die aufgestellte Hypothese verworfen werden. Offenbar kann nicht sichergestellt werden, Fahrzeuge, die in knapper Distanz vor dem unmittelbar zu überholenden Fahrzeug fahren, in jeder Situation sicher zu erkennen. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass die Anforderung einer Er-

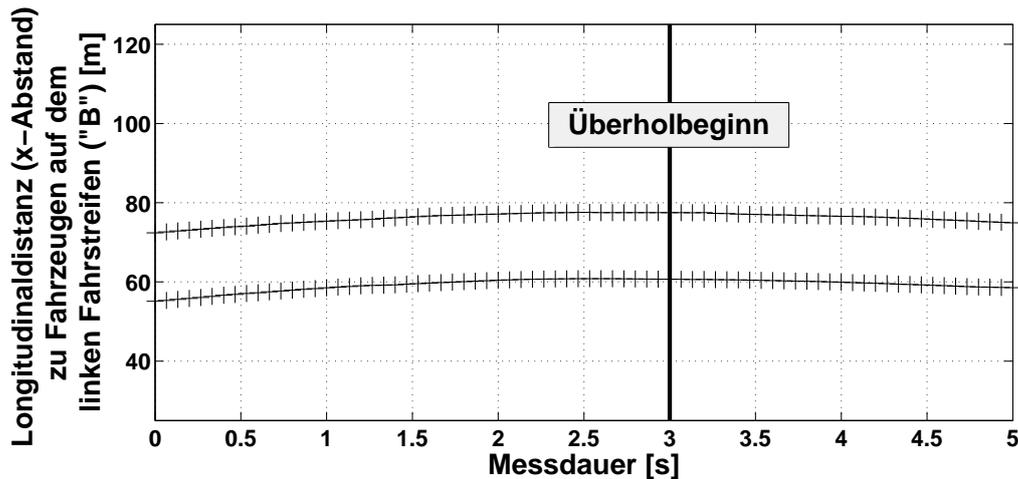


Abbildung 4.28: Trotz Sichtverdeckung kann das vorausfahrende Fahrzeug zum Zeitpunkt des Überholbeginns stabil verfolgt werden. In der gezeigten Situation ist also bereits zum Zeitpunkt des Überholbeginns eine Bewertung des Überholziels zwischen den beiden Fahrzeugen auf dem rechten Fahrstreifen möglich.

kennung zu Überholbeginn sehr hoch gesetzt ist. Auch ein Aufsetzen der entsprechenden Objektspur nach diesem Zeitpunkt kann noch deutlich vor dem Zeitpunkt des letztmöglichen, unkritischen Überholabbruchs liegen und so dem Fahrer, nach einer Warnung, noch einen Überholabbruch bei geringer Kritikalität ermöglichen. Diese Situation trifft auf alle 3 Versuchsfahrten zu, in denen eine Detektion zum Überholbeginn noch nicht möglich war. Die Einschränkung der frühzeitigen Erkennbarkeit von Fahrzeugen, die vor dem unmittelbar zu Überholenden fahren, ist daher trotz Falsifikation der zugehörigen Hypothese als gering einzustufen.

4.6 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurden Anforderungen an Sensoren definiert, die für die Umfelderkennung eines Überholassistentensystems geeignet sind. Hierzu liegen kinematische Betrachtungen vor, die eine Abschätzung zu den hierzu benötigten Reichweiten erlauben. Für ein vergleichsweise leistungsstarkes Fahrzeug der oberen Mittelklasse mit einer typischen Motor-Nennleistung im Bereich von etwa 225 kW liegen typische Reichweiten in einer Größenordnung von etwa 400 m. Dieser Wert übersteigt die Leistungsfähigkeit marktverfügbarer Fahrzeugumfeldsensoren mindestens um den Faktor 2. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein marktverfügbarer Sensor aus dem ACC-Bereich eingesetzt, der aufgrund einer Modifikation der Sensor-Software die geforderte Sichtweite von 400 m erreicht. Es liegt weiter die Definition eines Algorithmus für eine Objektverfolgung vor, die die notwendige Robustheit der Erfassung von Umfeldobjekten gewährleistet. Für die Bewertung dieses Umfelderkennungssystems wurden als Evaluationsgrundlage Hypothesen definiert. Als Resultat wurde gezeigt, dass der Bereich der Gegenverkehrserfassung innerhalb der für die Darstellung eines Überholassistenten in einem Fahrzeug geltenden Grenzen in robuster Weise möglich ist. Die entsprechenden Hypothesen wurden bei der Durchführung mit Worst-Case-Situationen dahingehend geprüft, ob sich die getroffenen Aussagen wi-

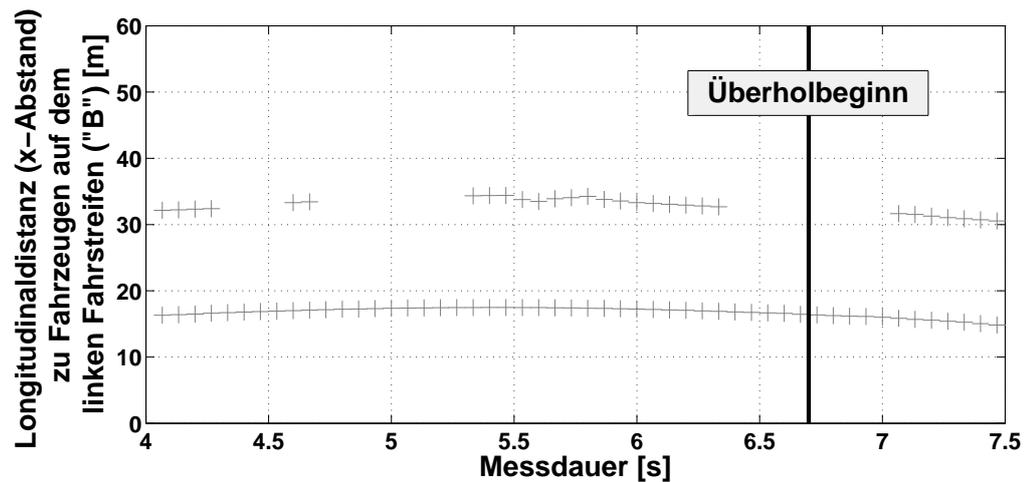


Abbildung 4.29: Das Fahrzeug vor dem unmittelbar zu überholenden Fahrzeug ist nicht kontinuierlich verfolgbar, es sind deutliche Unterbrechungen der Objektpur aus dem Ausgang des Tracking-Algorithmus zu verzeichnen. Auch zum Zeitpunkt des Überholbeginns findet keine Erkennung statt.

derlegen lassen. Für Gegenverkehrsobjekte gelang dies nicht, demgegenüber konnten bei der Betrachtung von sichtverdeckten Fahrzeugen auf dem rechten Fahrstreifen verschiedene Situationen identifiziert werden, in denen nicht alle überholzielrelevanten Fahrzeuge zum Überholbeginn robust erfassbar sind. Die Erfassung ist jedoch in jedem Fall zu einem Zeitpunkt möglich, zu dem der Fahrer noch selbst einen unkritischen Manöverabbruch durchführen kann. Aus diesem Grund werden die Folgen der gefundenen Einschränkungen als unproblematisch für die Anwendbarkeit der gezeigten Umfelderkennung für ein Überholassistentensystem betrachtet.

5 Klassifikation von Umfeldobjekten über eine Digitale Karte

5.1 Digitale Karten für Überholassistentensysteme

5.1.1 Informationsbedarf

Digitale Karten tragen Informationen sowohl über das von Fahrzeugen befahrene Straßennetz als auch über verschiedene Merkmale der Geländetopologie. Für Fahrerassistentenanwendungen können diese Daten einen wichtigen Beitrag zur zuverlässigen Funktion bilden. Auch für die dieser Arbeit zugrundeliegende Überholassistentenfunktion kann ein Mehrwert dadurch erreicht werden, dass zusätzlich zu den Ergebnissen der Objektverfolgung verschiedene Informationen einer digitalen Karte verwendet werden.

Zusammen mit einer Positionsbestimmung des EGO-Fahrzeugs bildet die digitale Karte dabei einen virtuellen Sensor, der Informationen über das statische Fahrzeugumfeld liefert. Diese Technik wird als *Electronic Horizon* bezeichnet. Mögliche Ziel-Anwendungen dieser speziellen Art von Sensorik finden sich beispielsweise in der adaptiven Energienutzung von Hybridfahrzeugen¹ oder in der vorausschauenden Steuerung von Scheinwerfern mit Kurvenlicht-Funktion². Abbildung 5.1 zeigt das Ergebnis einer systematischen Analyse zur Nutzung von digitalen Karteninformationen im Rahmen eines Überholassistentensystems: Der linke Zweig beschreibt die Fragestellung, ob ein Überholvorgang in einer bestimmten Situation auf Basis gesetzlicher Bestimmungen gestattet ist. Diese Information ist bei einer typischen digitalen Straßenkarte aus den Attributen des momentan befahrenen Straßenverlaufs bestimmbar, ein Beispiel wäre hier die Existenz eines expliziten Überholverbots. Darüberhinaus können jedoch auch Situationen mit implizitem Überholverbot, wie in Ortsdurchfahrten, eindeutig erkannt werden. Im rechten Zweig sind Gründe aufgeführt, die dazu führen können, dass ein Überholen nicht möglich ist, unabhängig von gesetzlichen Einschränkungen. Der beschränkende Umstand kann hierbei zum einen durch die Infrastruktur im aktuellen Umfeld des Fahrzeugs bedingt sein. Ein Beispiel für eine solche Situation sind nicht einsehbare Kurvenfolgen. Diese Informationen sind in der digitalen Karte zumindest implizit über die Berücksichtigung entsprechender Verkehrszeichen abgelegt. Ebenfalls kann die Überholmöglichkeit durch weitere Fahrzeuge eingeschränkt sein, die in der betrachteten Situation auftreten. Die Detektion und Verfolgung dieser Objekte wurde in Kapitel 4 ausführlich erläutert. Diese Objekte können Fahrzeuge sein, die – wie im Fall des zu überholenden Fahrzeugs – in die gleiche Richtung fahren wie das EGO-Fahrzeug, oder – wie beim Gegenverkehr – in die entgegengesetzte.

¹Kessels/van den Bosch (2007): *Electronic Horizon: Energy Management* S. 581.

²Düngen (2007): *Electronic Horizon* S. 84.

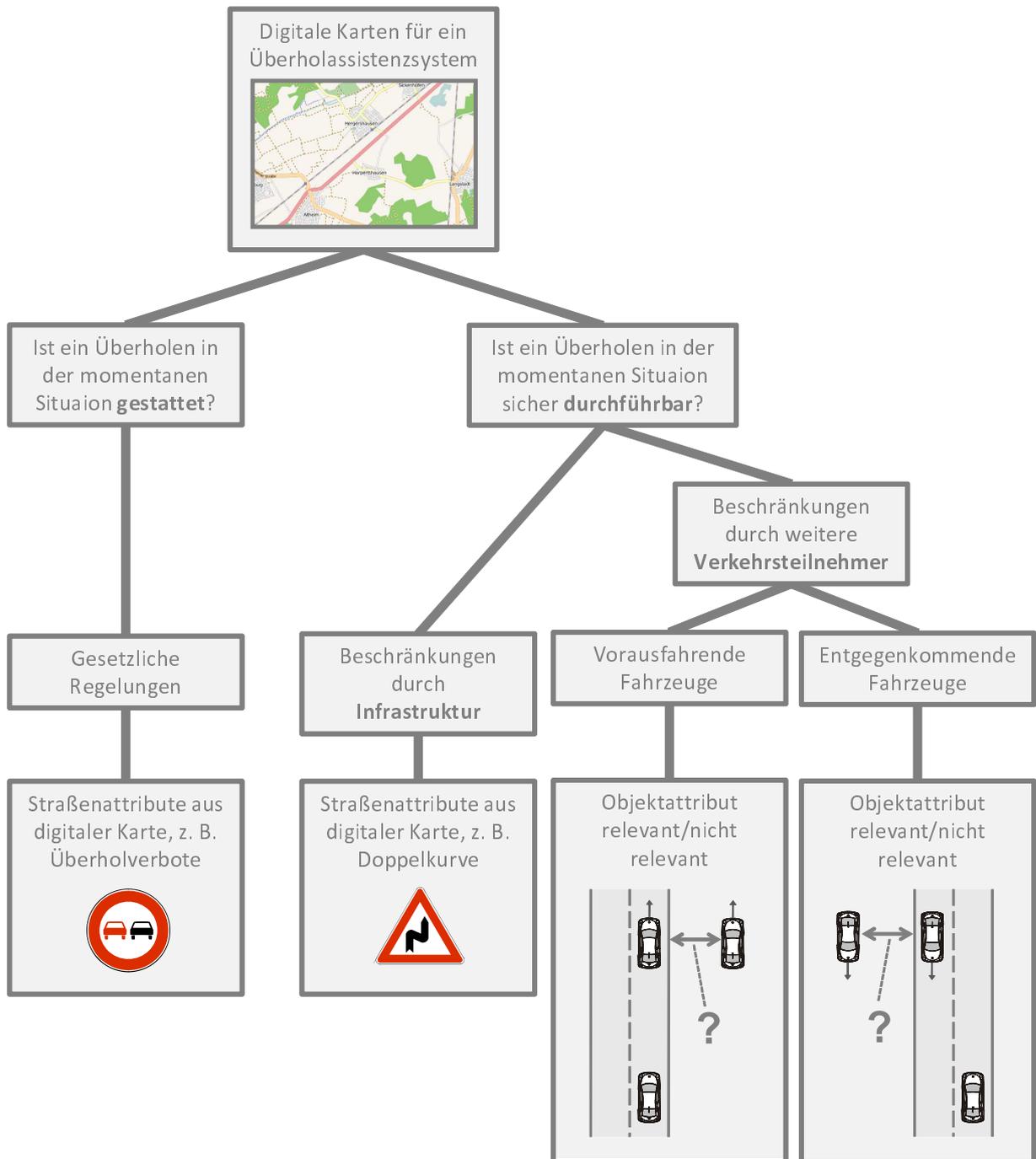


Abbildung 5.1: Übersicht über Möglichkeiten, Informationen aus digitalen Karten in ein Überholassistentensystem zu integrieren, um dessen Leistungsfähigkeit zu steigern und Fehlwarnungen zu vermeiden.

In diesem Zusammenhang ist es notwendig festzustellen, ob ein beobachtetes Fahrzeug dem vorausliegenden Straßenverlauf zuzuordnen ist, also im momentanen Situationskontext zu berücksichtigen ist. Um daher Fahrzeuge, die nicht den vorausliegenden Fahrbahnverlauf befahren, jedoch aufgrund des verfügbaren Sensorerfassungsbereichs von der Umfelderkennung beobachtet werden, nicht als Grundlage für die Bewertung einer Überholeinschränkung heranzuziehen, kann den erfassten Objekten ein Objektattribut *relevant* oder *nicht relevant* zugewiesen werden. Weiterführende Algorithmen, deren Funktion auf der Objektverfolgung basiert, können diese Objekte dann unberücksichtigt lassen. Eine solche Klassifikation ermöglicht somit beispielsweise die Vermeidung von Fehlwarnungen und erhöht die Robustheit der angestrebten Assistenzfunktion. Um eine solche Klassifikation durchführen zu können, werden in den Experimenten dieses Kapitels Informationen aus einer digitalen Karte eingesetzt.

Von den verschiedenen dargestellten Möglichkeiten für den Einsatz von Informationen digitaler Karten wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit ausschließlich die Klassifikation von Umfeldobjekten behandelt. In diesem Bereich existiert der umfangreichste Forschungsbedarf, da sowohl die Erfassung von gesetzlichen wie infrastrukturellen Überholeinschränkungen auf Basis marktverfügbarer digitaler Karten bzw. verkehrszeichenerfassender Bildverarbeitungsalgorithmen realisierbar ist. Dies illustrieren Beispiele entsprechender Systeme, die bereits in Serienfahrzeugen verfügbar sind, so z. B. die Verkehrszeichenerkennung in Fahrzeugen von BMW³ und Opel⁴. Ebenso können in der Literatur intensive Forschungsaktivitäten zur weiteren Verbesserung dieser Systeme identifiziert werden (z. B.: BARÓ ET AL.⁵). Eine weitere Fokussierung dieser Arbeit ist die ausschließliche Adressierung von Gegenverkehrsfahrzeugen, da vorausfahrende Fahrzeuge zu Beginn der Überholsituation, also zum Zeitpunkt der idealen Gefahrendetektion, eine nur geringe Distanz zum EGO-Fahrzeug aufweisen. Hierdurch ergeben sich bei diesen Fahrzeugen Vorteile bei Detektion und Zuordnung zum vorausliegenden Straßenverlauf, wie beispielsweise die bessere Bestimmbarkeit der Position. Auch sind kritische Einflüsse wie beispielsweise die Krümmung der vorausliegenden Straße geringer. Aus den genannten Gründen wird davon ausgegangen, dass aus den Ergebnissen für entgegenkommende Fahrzeuge direkt auf den einfacheren Fall des Vorausfahrenden geschlossen werden kann, weshalb sich die durchgeführten Untersuchungen auf Gegenverkehrsfahrzeuge beschränken.

5.1.2 Motivation für eine kartenbasierte Umfeldklassifikation

Die Umfelderkennung für ein Überholassistenzsystem gründet auf der sicheren Detektion von Umfeldobjekten, die für die Bewertung einer Überholsituation relevant sind. In Kapitel 4 wurde ausführlich dargestellt, dass solche Objekte durch das implementierte Objekttracking robust erkannt und verfolgt werden können. Voraussetzung bei den bisherigen Betrachtungen war immer die Annahme, dass jedes erkannte Objekt, welches zum Aufsetzen einer Objektspur führt, hinsichtlich der Bewertung der aktuellen Überholsituation relevant ist. Dies ist gleichzusetzen mit der Annahme, dass sich die Fahrzeuge im Sensorerfassungsbereich auf dem vorausliegenden Straßenverlauf befinden. Da diese Annahme auf realen Straßen nicht immer erfüllt ist, zeigt die obere Skizze in Abbildung 5.2.

³Ehmanns et al. (2008): Fahrerassistenzsysteme BMW 7er S. 117.

⁴Opel (2009): Opel Astra - Media Information S. 4.

⁵Baró et al. (2009): Traffic Sign Recognition S. 113.

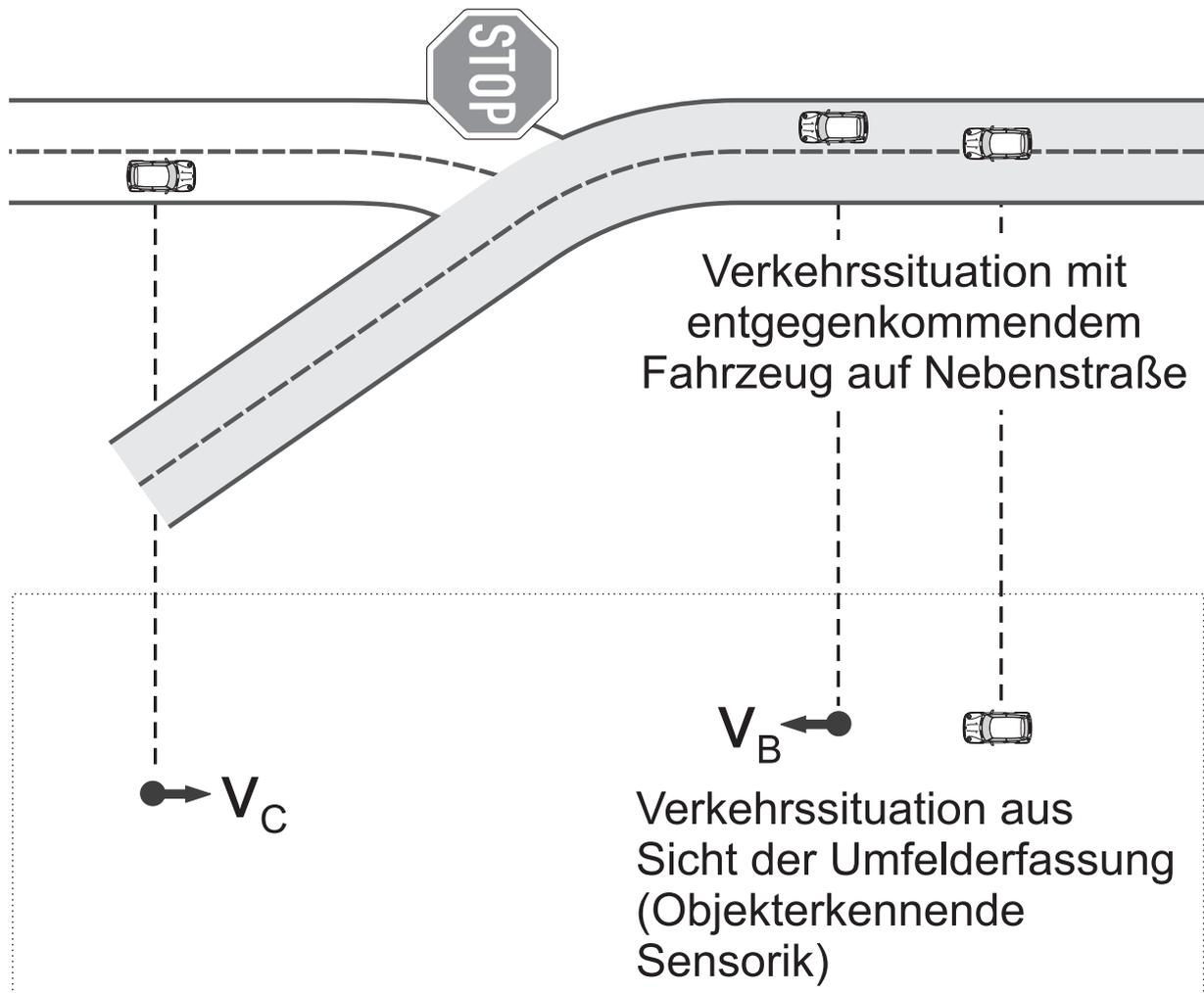


Abbildung 5.2: Durch die implizite Annahme eines geraden Straßenverlaufs können Fehlinterpretationen entstehen. Das in der einmündenden Straße entgegenkommende Fahrzeug ist für die Bewertung der Gefahr des begonnenen Überholvorgangs nicht relevant. Ohne Kenntnis über den weiteren Verlauf der Straße kann dies aber nicht berücksichtigt werden.

Das eigene Fahrzeug befindet sich hier in einer Phase, in der es durchaus denkbar ist, dass der Fahrer einen Überholvorgang einleitet: Der vorausliegende Straßenverlauf weist nach einer Geraden eine Biegung auf, der Verlauf nach dieser Biegung sei problemlos einsehbar, so dass der Fahrer zu der Einschätzung kommt, dass hier kein gefährlicher Gegenverkehr existiert. In der Verlängerung des zunächst geraden Fahrbahnverlaufes liegt eine einmündende Straße, beispielsweise ein Landwirtschaftsweg, der nicht vorfahrtsberechtigt ist. Ein Fahrzeug auf diesem Weg, welches im Erfassungsbereich der Sensorik liegt, könnte hier durchaus als relevantes Fahrzeug erkannt werden, da der tatsächliche Straßenverlauf in die Bestimmung der relevanten Objekte nicht einfließt. Auf der unteren Abbildung 5.2 ist die Situation als Ergebnis der Objektverfolgung dargestellt. Bei impliziter Annahme eines nahezu geraden Fahrbahnverlaufes würde das Fahrzeug auf der einmündenden Straße als potentiell gefährlicher Gegenverkehr fehlinterpretiert. Bei entsprechenden Abstands- und Geschwindigkeitsverhältnissen könnte es so zu einer Warnung des Fahrers vor einem gefährlichen Überholmanöver kommen, obzwar die Situation grundsätzlich so zu bewerten ist, dass keine reale Gefahr existiert. Diese Situation ist im Rahmen der Betrachtung einer Umfelderkennung für Überholsituationen besonders wichtig, da durch die hohe, notwendige Sensorreichweite das Risiko steigt, Objekte zu detektieren, die der Bewertung der aktuellen Gefahrensituation nicht zugrundegelegt werden dürfen. Ein solches Vorgehen kann als Vermeidung von *Falsch-Positiv*-Fehlern gelten. Ebenso kann der gegenteilige Fall auftreten, dass ein Fahrzeug, welches von einem System mit Annahme eines geraden Fahrbahnverlaufes aufgrund zu hoher Abweichung in der Lateralposition als relevantes Objekt verworfen wird, obwohl sich hier mit Hilfe der Karte eine Klassifikation als relevantes Objekt erreichen lässt. Dieser Fall kann als Vermeidung von *Falsch-Negativ*-Fehlern bezeichnet werden.

5.1.3 Bisherige Arbeiten

Vor dem Hintergrund der stetig wachsenden Zahl verfügbarer Fahrerassistenzsysteme mit Umfelderkennung sowie der enormen Marktdurchdringung von Navigationsgeräten mit digitalen Karten gab es in den vergangenen Jahren Bestrebungen, diese Karteninformationen für verschiedene Assistenzfunktionen nutzbar zu machen. In diesem Forschungsfeld ist das europäische Projekt MAPS&ADAS als zentral hervorzuheben⁶. Eingebettet in das EU-geförderte Gesamtprojekt PReVENT wurde in den Jahren 2004-2008 an möglichen Schnittstellen zwischen Fahrerassistenzsystemen und digitalen Karten geforscht. PReVENT bündelte dabei die Aktivitäten eines Konsortiums aus insgesamt 51 Automobilherstellern, Zulieferern und Forschungseinrichtungen⁷. Die Hauptresultate dieser Arbeiten des MAPS&ADAS-Projekts sind im Wesentlichen die Definition von Anforderungen, die neuartige Fahrerassistenzsysteme an einen Algorithmus stellen, der die benötigten Informationen aus digitalen Karten gewinnt. Ebenso wurde eine allgemeine Schnittstelle entworfen, diese definiert die Datenrepräsentation und -abfrage. Beispiele hierfür sind Geschwindigkeitsbeschränkungen auf dem momentan befahrenen Streckenabschnitt oder der Verlauf des vorausliegenden Straßenstückes. Verschiedene Sub-Projekte von PReVENT, die die Entwicklung bestimmter Assistenzfunktionen zum Ziel hatten, konnten in prototypischen Implementierungen über die definierte Schnittstelle auf Kartendaten zugreifen, so dass eine beispielhafte Demonstration der Funktionsfähigkeit erreicht werden konnte.

⁶Biervague (2008): MAPS&ADAS Final Report.

⁷Schulze et al. (2008): PReVENT IP Final Report.

⁸Biervague (2008): MAPS&ADAS Final Report.

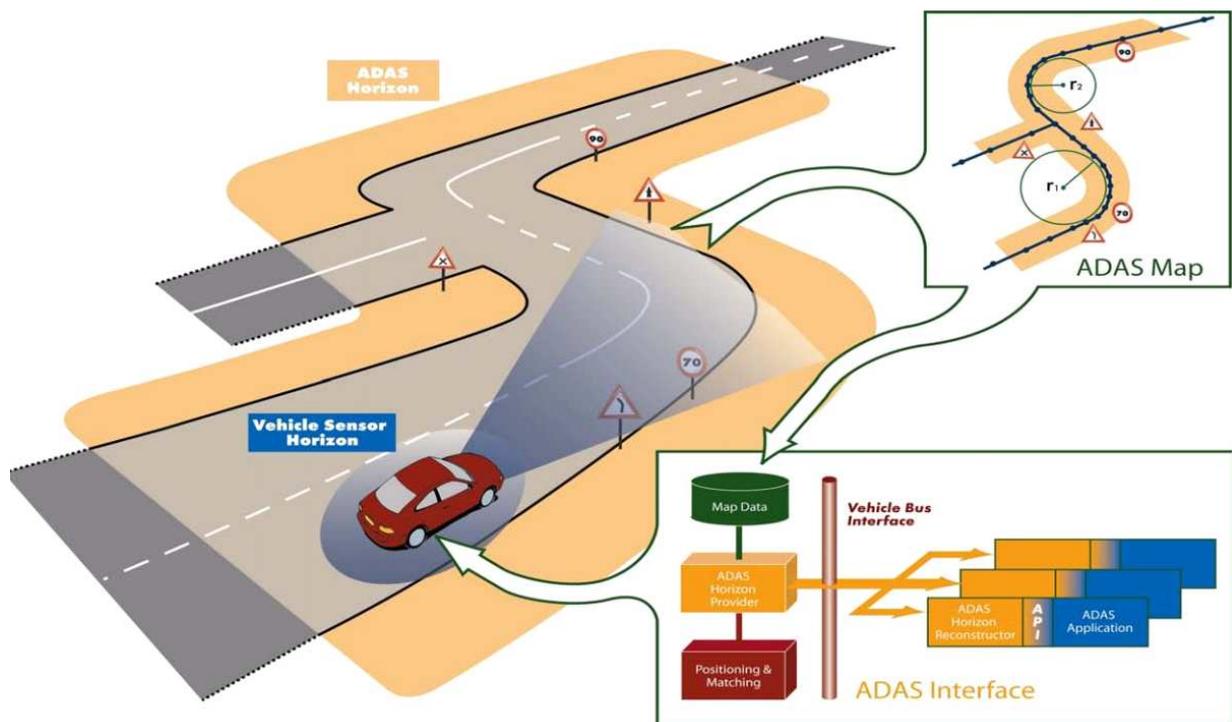


Abbildung 5.3: Funktionsweise des Zugriffskonzeptes, welches im PREVENT Subprojekt MAPS&ADAS definiert und in verschiedenen Prototypen umgesetzt wurde: Assistenzfunktionen im Fahrzeug bekommen über eine standardisierte Schnittstelle Zugriff auf Informationen einer digitalen Karte. Hierdurch ergibt sich ein virtueller Umfeldsensor, der im Gegensatz zu klassischen Umfeldsensoren beispielsweise auch Informationen über die vorausliegende Strecke nach einer scharfen Kurve liefern kann (Quelle: PREVENT⁸).

Neben diesen Projekten auf europäischer Ebene, die sich mehr oder weniger direkt mit der Anwendung digitaler Karteninformationen bei Fahrerassistenzsystemen beschäftigen, stellt SCHRAUT die Betrachtung der Karte selbst in den Mittelpunkt seiner Dissertation⁹. Hier wird eine sogenannte „selbstlernende Karte“ vorgeschlagen, die die Schwächen marktverfügbarer Karten dahingehend überwindet, dass über das regelmäßige Befahren von Strecken eine Aktualisierung der Kartendaten erfolgt. Die ergänzten Daten stehen dann beim nächsten Befahren der gleichen Strecke zur Verfügung.

5.2 Einordnung in die Überholzieldetektion

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Struktur eines umfelderfassenden Systems entworfen, welches alle Umfelddaten detektieren kann, die für die Darstellung des in der Einleitung beschriebenen Überholassistentensystems notwendig sind. Die Struktur ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Aus Sensorrohdaten werden über den Funktionsblock *Objektverfolgung* Objektspuren gebildet. Bevor diese genutzt werden, um Überholziele zu erkennen, wird die Position der erkannten Fahrzeuge mit dem Straßenverlauf der digitalen Karte abgeglichen, so dass eine Selektion nach *relevanten* Objekten möglich wird und *nicht relevante*

⁹Schraut (2000): Digitale Karte.

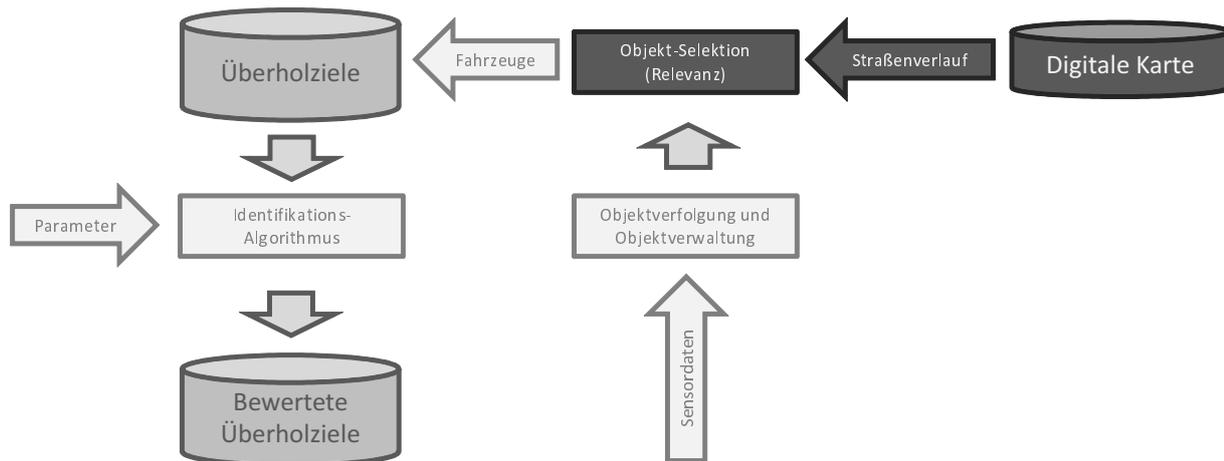


Abbildung 5.4: Erweiterung der Systemarchitektur um die Elemente „Digitale Karte“ und „Objektselektion“, hier werden die von der Umfelderkennung detektierten Objekte auf ihre Relevanz hinsichtlich des vorausliegenden Straßenverlaufs geprüft.

Fahrzeuge als solche klassifiziert werden können.

5.3 Hypothesen und Untersuchungsmethodik

5.3.1 Methode

Um die Möglichkeit der angestrebten Funktion der Klassifikation von Umfeldobjekten prototypisch zu realisieren, sind zwei grundlegende Voraussetzungen notwendig: Zum einen muss eine funktionsfähige Umfelderkennung verfügbar sein, zum anderen ist es notwendig, Zugriff auf Daten einer digitalen Karte zu schaffen. In Kapitel 5.3.3 ist die Ausrüstung eines Versuchsfahrzeugs mit Messtechnik beschrieben, die diese Anforderungen erfüllt. Analog zum Umfeldsensor in Kapitel 4 wurde auch in diesem Fahrzeug ein Fernbereichs-Radarsensor verwendet, der durch Modifikation der Sensorsoftware eine Detektionsreichweite von 400 m erreicht. Zum Zugriff auf Daten digitaler Karten wurde ein prototypisches Software-Paket eines Anbieters von Navigationsgeräten gewählt. Diese Bibliothek gestattet den Zugriff auf verschiedene Informationen zur aktuell befahrenen Straße und zum vorausliegenden Straßenverlauf über eine dokumentierte Programmierschnittstelle (API).

Um zu prüfen, ob sich ein von der Umfeldsensorik detektiertes Objekt auf der vorausliegenden Straße befindet, wurde ein Algorithmus entworfen, der auf Basis des lotrechten Abstandes erkannter Fahrzeuge zur momentan befahrenen, vorausliegenden Strecke über einen Schwellwert entscheidet, ob ein Fahrzeug als *relevant* oder *nicht relevant* einzustufen ist. Die Funktionsweise dieses Algorithmus wird ebenfalls in Abschnitt 5.3.3 vorgestellt.

Zur Bewertung der prinzipiellen Machbarkeit des vorgeschlagenen Algorithmus werden im Abschnitt 5.3.2 Hypothesen gebildet, die in geeignet definierten Experimenten (Sektion 5.3.5) dahingehend geprüft werden, ob sich eine Falsifikation oder Bewährung der Hypothesen ergibt.

5.3.2 Hypothesen

Als Resultat der Umfeldklassifikation soll die Möglichkeit geschaffen werden, durch die Umfelderkennung detektierte Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Zugehörigkeit zum vorausliegenden Straßenverlauf zu klassifizieren. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist demnach die Bewährung der wie folgt definierten Hypothese:

Hypothese 'Schwellwert Lateralposition'

Auf Basis des lotrechten Abstandes detektierter Fahrzeuge von der vorausliegenden Straße kann ein Schwellwert gefunden werden, der in jeder Situation einer stationären, fahrstreifenmittigen Fahrt die fehlerfreie Klassifikation nicht relevanter, entgegenkommender Fahrzeuge, sowie einen Anteil von Fehlklassifikationen relevanter Objekte von unter 1 % ermöglicht.

Es handelt sich um eine *Universelle Hypothese*, die entweder *falsifiziert* oder *bewährt* werden kann (Details zu den Hypothesenbegriffen finden sich in CHALMERS bzw. TRIMMEL^{10,11}). In dieser Arbeit werden Experimente definiert, die die Falsifikation dieser Hypothese anstreben. Gelingt dies nicht, so wird die Aussage als bewährt betrachtet. Die Hypothese ist auf die Situation einer stationären Fahrt in der Fahrstreifenmitte eingeschränkt, da im Algorithmus der Einfluss eines Gierwinkels zur Fahrbahntangentialen nicht berücksichtigt wird. Da die Untersuchung von Effekten durch Gierbewegungen des EGO-Fahrzeugs isoliert betrachtbar ist, wird diese Fragestellung in einer weiteren Hypothese separat adressiert.

Für die Definition der Vorgehensweise zur Prüfung der Hypothese wird angenommen, dass für die Auslegung des vorgeschlagenen Objekt-Selektionsalgorithmus die Vermeidung von *Falsch-Positiv*-Fehlern primäre Bedeutung besitzt. Dies basiert auf der Annahme, dass die fehlerhafte Klassifikation eines Fahrzeugs als *relevant* von einer möglichen Systemreaktion aus betrachtet als deutlich kritischer einzustufen ist als bei einer fehlerhaften Klassifikation als *nicht relevant*. Aus diesem Grunde enthält die Hypothese die asymmetrischen Forderungen nach Fehlerfreiheit im ersten Fall und toleriert für den zweiten Fehlerfall einen geringen Anteil von Fehlklassifikationen.

Hypothese zwei schließt die Lücke, die bei der Definition der obigen Hypothese unberücksichtigt bleibt:

Hypothese 'Eigenbewegungs-Kompensation'

Auf der Informationen eines ESC Serien-Sensorclusters kann der während eines Ausschervorgangs zu Überholbeginn durch die Gierbewegung des EGO-Fahrzeugs auftretende Gierwinkel zur Fahrbahntangentialen so kompensiert werden, dass der daraus resultierende Fehler in der Lateralposition detektierter Objekte immer unterhalb einer Schranke von 2 m bleibt.

¹⁰Chalmers (2001): Wege der Wissenschaft S. 51.

¹¹Trimmel (2009): Wissenschaftliches Arbeiten S. 28.

Um diese gleichfalls *Universelle Hypothese* zur bewähren oder zu falsifizieren, werden verschiedene Experimente durchgeführt, um festzustellen, ob mit einer einfachen Gierraten-sensorik, die in jedem modernen, mit ESC ausgestatteten Fahrzeug vorhanden ist, der störende Effekt der Pseudo-Lateralbewegung beobachteter Fahrzeuge auf einen tolerierbaren Wert kompensiert werden kann.

5.3.3 Untersuchungswerkzeuge

Versuchsträger

Für die Durchführung der erforderlichen Experimente für die Prüfung der Forschungshypothesen wurde ein Versuchsträger Mercedes-Benz S430 (W220) mit Sensorik und Computer-Hardware ausgestattet. Bild 5.5 zeigt die verbauten Komponenten in der Über-

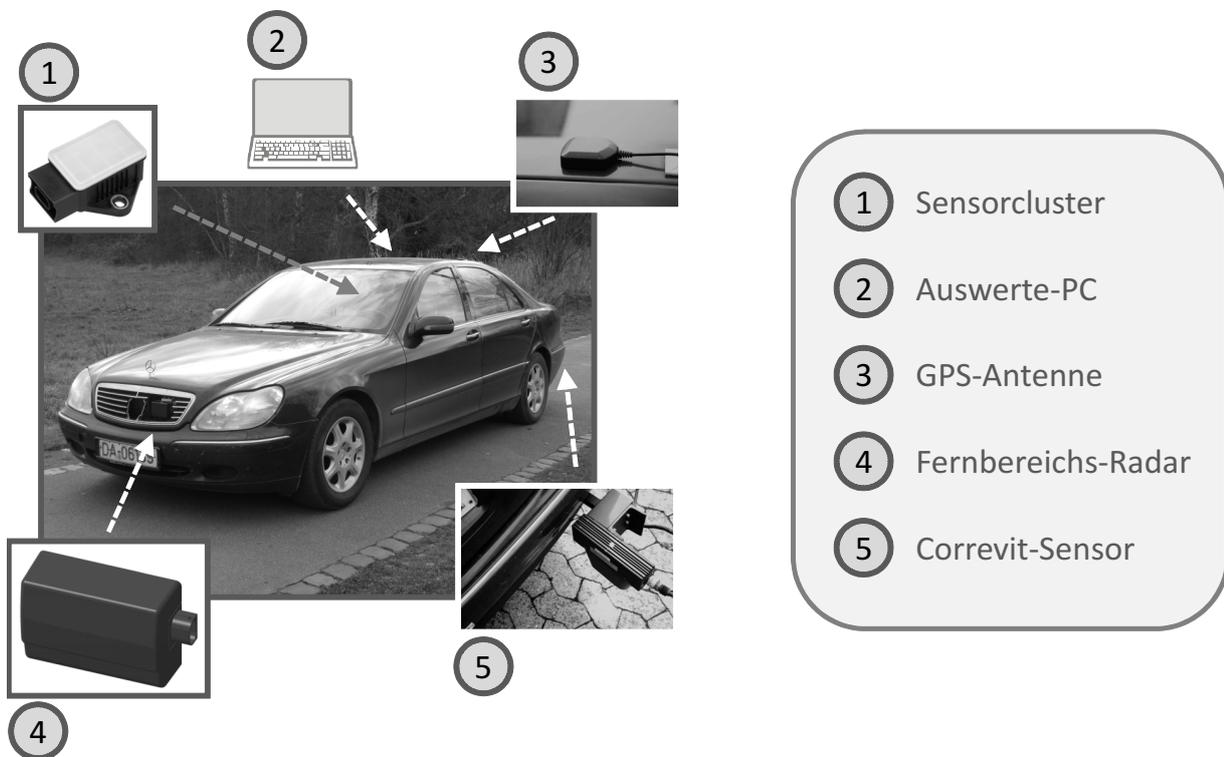


Abbildung 5.5: Versuchsfahrzeug für Experimente mit Umfeldsensorik und digitalen Karten: Das Fahrzeug ist mit einem Fernbereichs Radarsensor und einer GPS-Antenne ausgestattet. Über diesen Empfänger findet eine Bestimmung der aktuellen Fahrzeugposition statt, woraus eine auf dem Auswerte-PC implementierte Software Attribute des vorausliegenden Straßenverlaufes extrahiert. Als Ergebnis ist die Klassifikation von detektieren Umfeldobjekten mit den Informationen aus der digitalen Karte möglich.

sicht. Über eine auf dem Fahrzeugdach angebrachte GPS-Antenne werden die Signale von GPS-Satelliten empfangen und über das sogenannte NMEA-Protokoll vom Auswerte-PC eingelesen¹². Wie in Abbildung 5.4 dargestellt, dienen diese Signale dazu, über eine entsprechende Software die momentane Position des EGO-Fahrzeugs festzustellen und Attribute über den vorausliegenden Straßenverlauf aus der digitalen Karte zu extrahieren.

¹²NMEA (2008): NMEA 0183 protocol.

Der installierte Fernbereichs-Radarsensor versorgt die Objektverfolgung (Tracking), welche aus den Sensordaten ohne zeitlichen Zusammenhang wiedererkennbare Objekte mit kontinuierlicher Spur erzeugt. Der folgende Funktionsblock, die Objektselektion, besteht weiterhin aus einem weiter unten detailliert erläuterten Algorithmus, der die Umfelddaten mit Bezug auf den vorausliegenden Straßenverlauf prüft und die Klassifikation in *relevant* oder *nicht relevant* vornimmt. Um ausreichend Rechnerressourcen für die drei notwendigen Software-Elemente (Extraktion der Kartendaten, Objekttracking und Objekt-Selektion) ohne rechnerübergreifende Kommunikation realisieren zu können, wurde als Auswerte-PC ein Multi-Core-Prozessor basiertes System gewählt, um die entsprechenden Leistungsanforderungen zu erfüllen.

Karten-Software

Um eine repräsentative Bewertung der Nutzbarkeit marktverfügbarer digitaler Karten zu erreichen, wird eine prototypische Software verwendet, die bestimmte Informationen zum Straßenverlauf über eine Applikations-Schnittstelle bereitstellt. Die Implementierung des verwendeten Produktes lehnt sich an die Erkenntnisse an, die im Rahmen des oben bereits vorgestellten MAPS&ADAS Projektes gefunden wurden. Die zugrundeliegende Datenbasis besteht dabei aus einer digitalen Karte, wie sie bereits in zahlreichen kommerziellen Navigationsanwendungen im Automobil eingesetzt wird, und kann somit als marktverfügbar und preiswert eingestuft werden. Die in dieser Arbeit verwendeten digitalen Karten haben einen Aktualitäts-Stand von 2006.

Zuordnungsalgorithmus zu Straßen

Bei der Klassifikation von Umfeldobjekten muss die Zuordnung von Objekten, die durch die Umfelderkennung eines Fahrzeugs erkannt wurden, zum Inhalt einer digitalen Karte möglich sein. Um diese Aufgabe zu erfüllen, wird in diesem Abschnitt ein einfacher Algorithmus vorgestellt, der diese Aufgabe prinzipiell erfüllen kann und dessen praktische Leistungsfähigkeit in den Experimenten dieses Kapitels überprüft wird. Die beiden zu beachtenden Gesichtspunkte sind die geeignete Modellierung des vorausliegenden Straßenverlaufs sowie die Berücksichtigung potentiell unterschiedlicher Koordinatensysteme von Umfelderkennung und Karte. Bei der Art der angewandten Kartensoftware wird als Modell für den Straßenverlauf eine verbundene Reihe von Formpunkten verwendet. Jeder dieser Punkte enthält die Koordinaten eines Punktes auf der Erdoberfläche, der Verlauf der Fahrbahn wird durch diese Elemente beschrieben. Dem so modellierten Verlauf sind verschiedene Attribute zugeordnet, wie z. B. die Ausrichtung des jeweiligen Abschnittes (*heading*) oder die Fahrbahnkrümmung in diesem Bereich.

Als möglichst einfach zu implementierender Ansatz wird in dieser Arbeit die Modellierung der Straße auf Basis der linearen Verbindung dieser Punkte angenommen, diese Verbindungen werden hier als *Kanten* bezeichnet. Fahrbahnabschnitte, die häufig für Überholmanöver genutzt werden und die somit für das zu entwickelnde Assistenzsystem den relevanten Anwendungsfall darstellen, weisen typischerweise nur geringe Krümmungen auf, so dass auf eine Berücksichtigung des in der Karte hinterlegten Krümmungswertes verzichtet wird. Abbildung 5.6 zeigt einen Straßenverlauf, der in der oben gezeigten Abstraktion erstellt wurde. Insgesamt existieren 5 Formpunkte und 4 Kanten, die die vorausliegende Straße repräsentieren. Das EGO-Fahrzeug befindet sich in der abgebildeten Situation auf

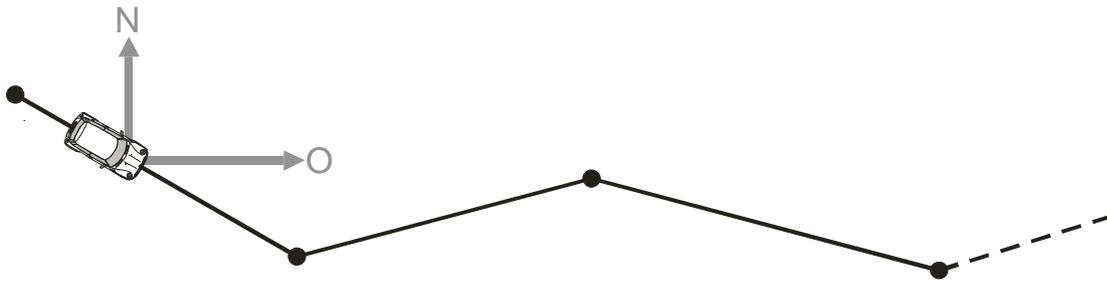


Abbildung 5.6: Modellierung des vorausliegenden Straßenverlaufs durch Formpunkte. Die Streckenabschnitte zwischen den Formpunkten werden durch Geraden approximiert. Alle Positionen aus der digitalen Karte können in ein fahrzeugfestes Koordinatensystem überführt werden, dessen Achsen zur Nord-Süd bzw. West-Ost Richtung der momentanen Fahrzeugposition parallel sind.

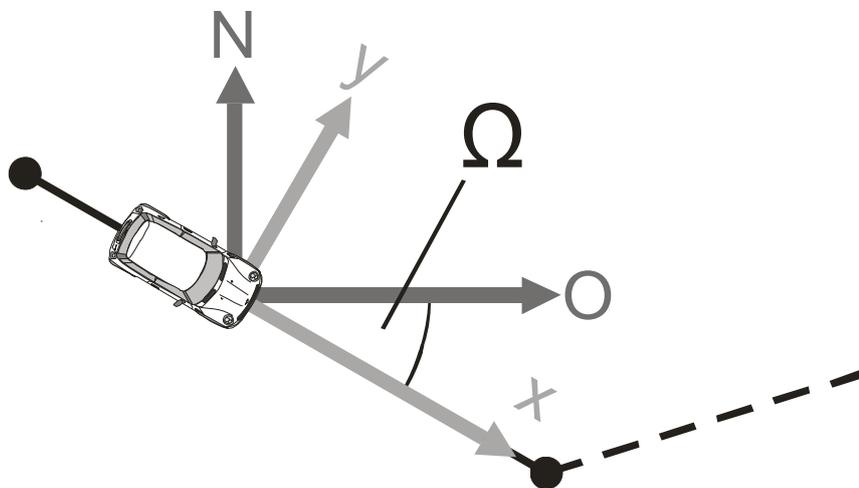


Abbildung 5.7: Das an den Achsen der Windrichtungen orientierte Koordinatensystem der digitalen Karte ist gegenüber dem System der Umfelderkennung um den Winkel Ω verdreht. Für die Projektion eines Umfeldobjekts auf die Karte ist daher eine Koordinatentransformation notwendig.

dem ersten Teilstück, der ersten Kante, und bewegt sich nach Osten. Das Koordinatensystem, in dem die Lage der Formpunkte abgefragt werden kann, ist ein weltfestes, das sogenannte *World Geodetic System* WGS84¹³. Um aus Punkten, die in diesem Koordinatensystem gegeben sind, Distanzen auf der Erdoberfläche zu bestimmen, ist prinzipiell die Erdkrümmung zu berücksichtigen. Aufgrund der für die Anwendung in dieser Arbeit betrachteten Distanz-Größenordnungen im Bereich von weniger als 500 m kann dieser Einfluss jedoch vernachlässigt werden. Der durch diese Vereinfachung zu erwartende Fehler bewegt sich im Bereich von lediglich 2,5 cm¹⁴. Das Ergebnis dieser Betrachtung ermöglicht somit die einfache Bestimmung von Distanzen zwischen zwei Formpunkten. Durch Differenzbildung der momentanen Position des EGO-Fahrzeugs mit den Werten der Formpunkte wird der Ursprung des dem vorausliegenden Straßenverlauf zugrundeliegenden Koordinatensystems

¹³Eurocontrol (1998): WGS Implementation.

¹⁴Schraut (2000): Digitale Karte S. 19.

auf die aktuelle Position des EGO-Fahrzeugs verschoben. Das resultierende Koordinatensystem ist in Abbildung 5.6 dargestellt, die Koordinatenachsen liegen nach wie vor in der Nord-Süd bzw. West-Ost Richtung. Um die beiden Koordinatensysteme nun ineinander zu überführen, wird für jedes Umfeldobjekt eine Koordinatentransformation nach den in der Literatur zu findenden Gleichungen durchgeführt:

$$O = x \cdot \cos(\Omega) - y \cdot \sin(\Omega) \quad (5.1)$$

$$N = x \cdot \sin(\Omega) + y \cdot \cos(\Omega). \quad (5.2)$$

Als Ergebnis liegt sowohl der vorausliegende Straßenverlauf als auch die Umfeldobjekte in dem gleichen Koordinatensystem vor. Für die Entscheidung, ob ein Umfeldobjekt aufgrund seiner Position nun vor dem Hintergrund des modellierten Fahrbahnverlaufes als *relevant* oder *nicht relevant* zu klassifizieren ist, werden für den dargestellten Algorithmus sogenannte *Klassifikationstore* definiert. Diese werden durch straßenparallele Grenzen gebildet, und repräsentieren einen Toleranzbereich um den abstrahierten Straßenverlauf. Die durch Winkeländerungen entstehenden Lücken an der Position der Formpunkte (Außenwinkel), werden durch weitere *Klassifikationstore* in der Form von Kreissegmenten gefüllt. Als Re-

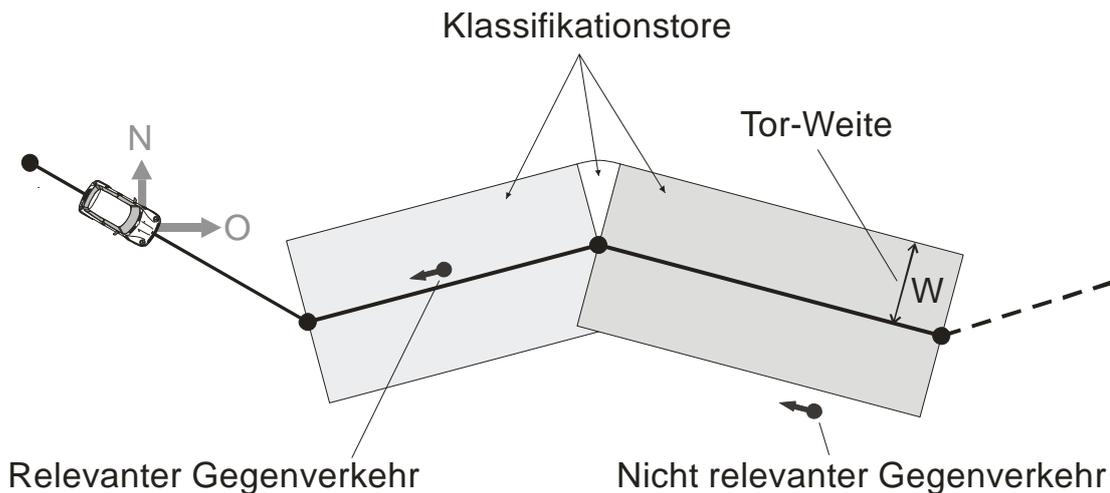


Abbildung 5.8: Um von der Umfelderkennung erkannte Objekte als *relevant* oder *nicht relevant* klassifizieren zu können, werden entsprechende Bereiche definiert, sogenannte *Klassifikationstore*.

sultat ergibt sich eine „Gasse“ aus *Klassifikationstoren* um den modellierten Straßenverlauf herum, der nun den Entscheidungsraum definiert: Liegt ein durch die Umfelderkennung detektiertes Objekt innerhalb mindestens eines dieser Tore, so wird das Objekt als *relevant* klassifiziert, andernfalls als *nicht relevant*. Das Entscheidungskriterium ist also der laterale Abstand von Umfeldobjekten zur momentan vom EGO-Fahrzeug genutzten Straße.

Zentraler Parameter für die korrekte Funktion des dargestellten Algorithmus ist die Breite des gewählten Toleranzbereichs und in diesem Zusammenhang die Frage, ob hier ein entsprechender Wert gefunden werden kann, der die Trennung *relevanter* und *nicht relevanter* Fahrzeuge ermöglicht. Der vorgeschlagene Algorithmus stellt somit einen einfachen Ansatz dar, der in seiner Komplexität mutmaßlich durch Rechnerhardware beherrscht werden kann, die üblicherweise im Fahrerassistenzbereich in Automobilen eingesetzt wird.

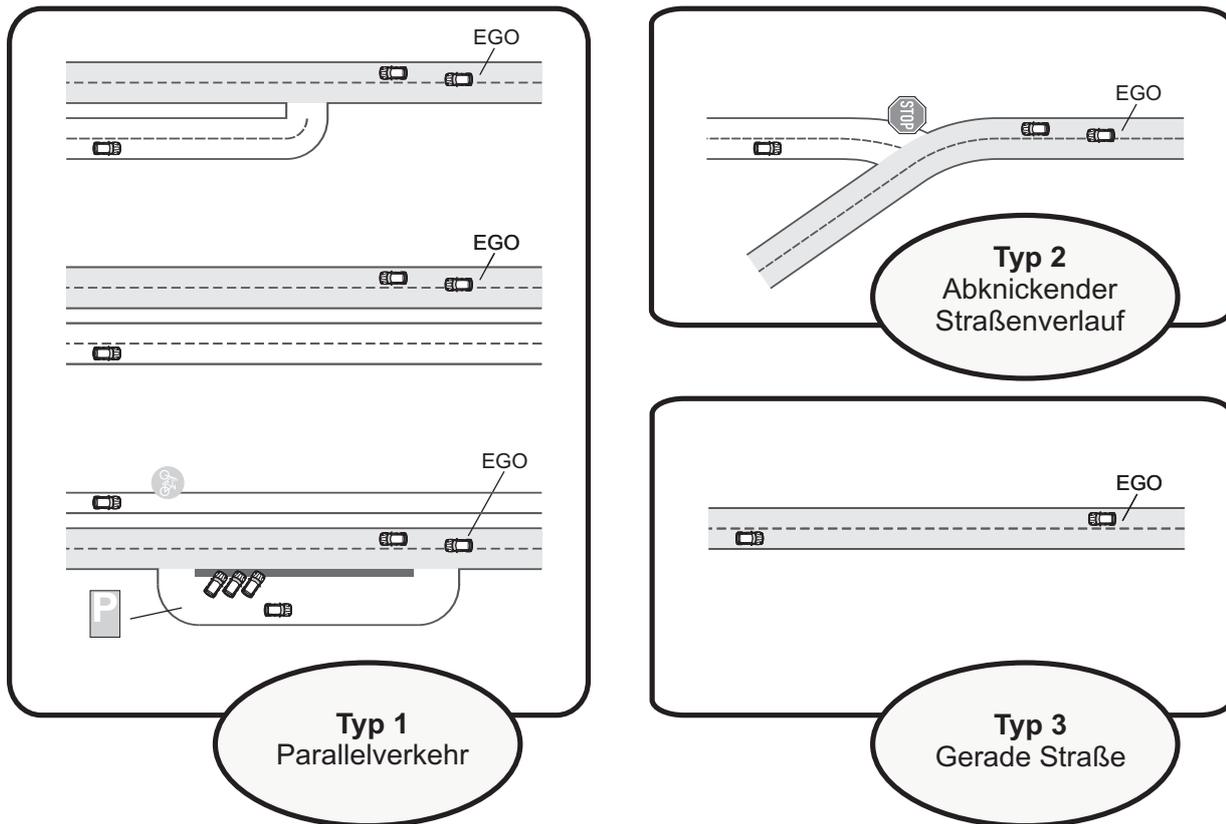


Abbildung 5.9: Die Typen 1 und 2 gruppieren verschiedene Verkehrssituationen, in denen ein entgegenkommendes Fahrzeug als gefährlich erkannt werden könnte, obschon es sich nicht auf dem vorausliegenden Straßenabschnitt befindet. Bei Typ 3 tritt nur relevanter Gegenverkehr auf. Diese Situation kann dazu herangezogen werden, um die Robustheit des Klassifikationsalgorithmus in dynamischen Situationen zu untersuchen.

5.3.4 Versuchsstrecken

Bei der Auswahl geeigneter Teststrecken sind verschiedene Kriterien als Maßstab anzulegen. In Abschnitt 5.3.2 wurde bei der Definition der Hypothese 'Schwellwert Lateralposition' die Aussage aufgestellt, dass ein Schwellwert gefunden werden kann, der *relevante* und *nicht relevante* Fahrzeuge unterscheiden kann. Hieraus folgt direkt die Forderung nach der Darstellbarkeit dieser beiden Situationen, d. h. die Strecke muss die Möglichkeit bieten, neben realem Gegenverkehr auch entgegenkommende Fahrzeuge darzustellen, die sich nicht auf dem vorausliegenden Straßenverlauf befinden. Die ersten beiden Kästen in Abbildung 5.9 zeigen eine prinzipielle Gruppierung von Situationen, bei denen eine unklare Situation durch den Einsatz des vorgeschlagenen Klassifikationsalgorithmus aufgelöst werden könnte. Da realer Gegenverkehr offenbar in jeder denkbaren Situation auftreten kann, wird hier nur nach den Möglichkeiten unterschieden, wie Gegenverkehrsfahrzeuge auftreten können, die durch eine Umfeldklassifikation ausgeschlossen werden müssen, d. h. die sich nicht auf dem vorausliegenden Straßenverlauf bewegen. In der mit Typ 1 – Parallelverkehr – bezeichneten Gruppe tritt falscher Gegenverkehr dergestalt auf, dass sich dieser aus verschiedenen Ursachen heraus parallel zum vorausliegenden Straßenverlauf bewegt. Beispiele für solche Situationen sind Fahrradwege, die von Fahrzeugen befahren werden,

Tabelle 5.1: Versuchsstrecken für die Experimente zur Klassifikation über eine digitale Karte.

Typ	Ort	Beschreibung	Anhang
1	Altheim-Babenhhausen	Gerade Strecke (RQ 10,5) seitl. Fahrradweg	F.2
1	Aschaffenburg-Niedernberg	Gerade Strecke (RQ 9,5) seitl. Grünstreifen	F.3
1	Darmstadt-Dieburg	Gerade Strecke (RQ 10,5) nur relevanter Gegenverkehr	F.5
1	Darmstadt-Bickenbach	Gerade Strecke (RQ 10,5) nur relevanter Gegenverkehr	F.8
1	Büttelborn-Griesheim	Gekrümmte Strecke (RQ 10,5) seitl. Landwirtschaftsweg	F.4
2	Griesheim nahe A67	Gabelung in spitzem Winkel einmündender Landwirtschaftsweg	F.6
2	Groß-Rohrheim	Abknickender Straßenverlauf	F.7
3	August-Euler-Flugplatz Darmstadt/Griesheim	Gerade Strecke alle Situationen darstellbar	F.1

Parkplätze am Rande der Fahrbahn sowie landwirtschaftlicher Verkehr auf Flächen, die an die Fahrbahn angrenzen. Weiter kann eine solche Situation dort auftreten, wo Straßen parallel zueinander angeordnet sind und so, bei ausreichend großem horizontalen Öffnungswinkel des umfelderfassenden Sensors, Fahrzeuge als relevanter Gegenverkehr erkannt werden könnten, die auf der jeweils anderen Straße fahren. Typ 2 – Abknickender Straßenverlauf – bezeichnet die Situation, die bereits in der Einleitung vorgestellt wurde: Die aktuell vom EGO-Fahrzeug befahrene Straße vollzieht eine Richtungsänderung, in der Verlängerung des bisherigen Straßenverlaufes mündet eine nicht vorfahrtsberechtigte Straße ein. Typ 3 stellt eine Situation dar, die die Untersuchung der Möglichkeit der Gierwinkelkompensation ermöglicht: Ein Straßenabschnitt, der einen bekannten, geraden Verlauf aufweist, kann zur Prüfung genutzt werden, ob Eigenbewegungen des EGO-Fahrzeugs soweit kompensiert werden können, dass die Pseudo-Bewegungen, die beobachtete Objekte aufweisen, unterhalb der in der Hypothese definierten Schranke bleiben.

Für alle oben aufgeführten Typen möglicher Problemfälle wurden repräsentative Straßenverläufe in der Umgebung von Darmstadt identifiziert, weitere Anforderungen waren dabei das Fehlen eines Überholverbotes auf der entsprechende Strecke, sowie die plausible Durchführbarkeit von Überholmanövern auf dem ausgesuchten Streckenabschnitt. Für Typ 1 wurden im Zielradius 3 entsprechende Streckenabschnitte gefunden, für den Abknickenden Straßenverlauf (Typ 2) 2 repräsentative Straßen und für die Versuche zum Typ 3 eignet sich ideal die Nutzung eines abgesperrten Testgeländes.

Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht der in dieser Arbeit verwendeten Versuchsstrecken mit einer Zuordnung zu den entsprechenden Problemfalltypen. Die genauen Ortsangaben sowie die Beschreibung der jeweiligen Straßengeometrie kann über die angegebenen Verweise im Anhang nachgeschlagen werden.

5.3.5 Experimente und Ergebnisse

Methodik

Der in Abschnitt 5.3.3 erläuterte Algorithmus soll dazu dienen, *relevanten* von *nicht relevantem* Gegenverkehr zu unterscheiden. Hierfür ist der Umstand entscheidend, ob ein Wert für die Weite des Klassifikationstores existiert, bei dem der Lateralabstand *nicht relevanter* Umfeldobjekte zur modellierten Fahrbahn jederzeit oberhalb, und der Lateralabstand *relevanter* Objekte immer unterhalb dieses Schwellwertes liegt. Ist dies der Fall, wird durch den vorgeschlagenen Algorithmus ein erfolgreiches „Aussortieren“ von *nicht relevanten* Gegenverkehrsfahrzeugen möglich. Es gilt die Annahme, dass die Auslegung eines Überholassistentensystems in Analogie zu anderen Fahrerassistenzsystemen immer so erfolgt, dass der Reduktion von *Falsch-Positiv*-Fehlern (*Nicht relevantes* Fahrzeug wird als *relevant* klassifiziert) gegenüber der unbedingten Vermeidung von *Falsch-Negativ*-Fehlern der Vorrang eingeräumt wird. Dies motiviert eine Versuchsabfolge, bei der zur Bestimmung eines Schwellwertes die Tor-Weite zunächst soweit verkleinert wird, dass keine *Falsch-Positiv*-Fehler mehr auftreten und mit den hierbei gefundenen Werten zu prüfen, ob gleichfalls keine *Falsch-Negativ*-Erkennungen auftreten.

Die Experimente zur Bestimmung des Schwellwertes werden zunächst für den Problemfall „Parallelverkehr“ erläutert, da hier der Unterschied der anzutreffenden Lateralabstände von *relevanten* und *nicht relevanten* Fahrzeugen als klein zu erwarten ist, und diese Situation somit den Worst-Case Fall darstellt. Um die Wahrscheinlichkeit von Zufallseffekten zu minimieren, werden die Experimente auf mehreren der geeigneten Versuchsstrecken durchgeführt.

Bei den Experimenten zu den Problemfällen vom Typ 2, also *nicht relevante* Fahrzeuge, die entweder auf einmündenden Straßen mit spitzem Winkel oder in Situationen mit abknickendem Straßenverlauf entgegenkommen, wird beobachtet, ob sich diese Fahrzeuge korrekt klassifizieren lassen.

Experimente auf dem Forschungsflughafen Griesheim resultieren in einer Einschätzung, wie groß der Einfluss der Eigenbewegung des EGO-Fahrzeugs auf die Genauigkeit der Klassifikation ist und wie gut diese Abweichungen durch die im Fahrzeug vorhandene Seriensensorik kompensiert werden können.

Tor-Weite: *Nicht relevante* Fahrzeuge

Für die erste Versuchsreihe wurden 3 Teststrecken ausgewählt, die B26 zwischen Altheim und Babenhausen (Anhang F.2) als Straße mit einem großen Regelquerschnitt, die Verbindungsstraße von Aschaffenburg/Nilkheim nach Niedernberg (Anhang F.3) als Straße mit einem kleinen Regelquerschnitt sowie die Landesstraße zwischen Büttelborn und Griesheim (Anhang F.4). Alle Strecken sind aufgrund ihres Verlaufs gut für Überholmanöver geeignet, diese finden dort auch häufig statt, so dass von realitätsnahen Situationen ausgegangen werden kann.

Auf der B26 besteht die Möglichkeit, dass entgegenkommender Verkehr einen Radweg befährt, der parallel zur eigentlichen Fahrbahn im Abstand von ca. 2 m zum Straßenrand angelegt ist. Dieser Fahrradweg wird häufig als Zufahrt zu landwirtschaftlichen Flächen genutzt, die sich gleichfalls auf dem der Straße angrenzenden Gebiet befinden. Im Aufbau des Experimentes bewegt sich das EGO-Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von etwa 70 km/h auf einem krümmungslosen Abschnitt, während ihm ein Fahrzeug auf dem Fahr-

radweg mit etwa 50 km/h entgegenfährt. So kann die gewünschte Situation eines Gegenverkehrsfahrzeugs, beispielsweise eines Schleppers auf dem Weg zu einem Acker, simuliert werden, welches durch den Klassifikationsalgorithmus als *nicht relevant* eingestuft werden soll. Abbildung 5.10 zeigt den Versuchsaufbau. Das sich auf dem Fahrradweg bewegende



Abbildung 5.10: Versuchsaufbau B26: Ein von einem Versuchsfahrer bewegtes Fahrzeug fährt dem EGO-Fahrzeug mit Umfelderkassung auf dem der Fahrbahn angrenzenden Fahrradweg entgegen. Im Versuchsträger wird der laterale Abstand des detektierten Fahrzeugs zum modellierten Straßenverlauf aufgezeichnet.

Gegenverkehrsfahrzeug wird von einem instruierten Versuchsfahrer gefahren. Durch abgestimmte Zeitpunkte des Losfahrens vom Start-Ort der jeweiligen Fahrzeuge ist es möglich, die Annäherung beider Fahrzeuge so zu gestalten, dass sie sich ab dem Zeitpunkt der Unterschreitung der prinzipiellen Reichweite des verwendeten Sensors (400 m) auf einem krümmungslosen Bereich der Strecke befinden. Um die Sichtbarkeit des Fahrzeugs auf dem Fahrradweg zu erhöhen, wird ein Nutzfahrzeug mit höherem Aufbau (Mercedes Sprinter, Anhang D) und einem im oberen Bereich der Windschutzscheibe angebrachten Radarreflektor verwendet, um die für die Radarsensorik maßgeblichen Reflexionseigenschaften zu verbessern und potentiell signalschwächende Abschattungseffekte zu kompensieren. Diese Effekte können insbesondere aufgrund der Tatsache auftreten, dass der Fahrradweg gegenüber der angrenzenden Straße leicht abgesenkt ist.

Insgesamt wurden mit diesem Aufbau 3 Versuche durchgeführt. Da der Versuch im öffentlichen Straßenverkehr unter teilweiser Nutzung eines relativ stark frequentierten Fahrradweges stattfand und die diesbezüglichen Einschränkungen minimal bleiben sollten, ist hier keine größere Zahl von Wiederholungen zu vertreten. In Abbildung 5.11 ist das Gesamtergebnis der Fahrten dargestellt: Die geplotteten Messpunkte repräsentieren die lateralen Abstände detektierter Objekte von dem auf Basis der digitalen Karte erstellten Straßenverlauf in Abhängigkeit vom longitudinalen Abstand des entsprechenden Objekts vom EGO-Fahrzeug zu diesem Zeitpunkt. Die Resultate der durchgeführten Messungen sind in der Grafik übereinandergelegt und an der Form der Marker zu unterscheiden, dies ist jedoch für die angestrebte Auswertung nicht notwendig. Die Situation ist durch den Eintrag von Fahrbahnmarkierungen weiter verdeutlicht, der Lateralabstand von der Straße bezieht sich in dieser und allen folgenden Darstellungen auf die (gestrichelte) Straßenmittellinie. Die verwendete prototypische Software für die Extraktion von Informationen aus der digitalen Karte besitzt die Einschränkung, dass nicht zu jedem Zeitpunkt, zu dem die Umfelderkassung detektierte Objekte ausgibt, ein Zugriff auf die relevanten Daten möglich ist, daher ergeben die gezeigten Daten keine zusammenhängenden „Ketten“ von Messpunkten, sondern zeigen mehr oder weniger große „Fenster“, Gruppen von aufeinanderfolgenden Messungen, zu denen der Informationszugriff möglich war.

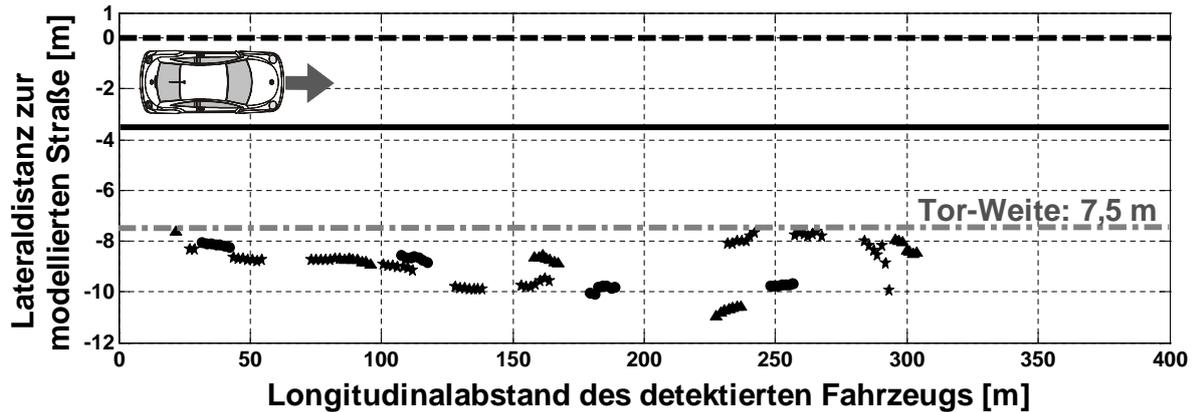


Abbildung 5.11: Ergebnisse der Versuche mit einer gestellten Situation auf der Bundesstraße B26: Die vom Algorithmus erzielten lateralen Abstände zum modellierten Straßenverlauf auf Grundlage der digitalen Karte sind alle größer als 7,5 m. Eine Schwelle dieser Größe eignet sich also zur Klassifikation des gestellten Gegenverkehrs auf dem Fahrradweg als *nicht relevant*.

Durch den Versuch soll eine Tor-Weite ermittelt werden, die gerade schmal genug ist, um alle im Experiment detektierten Objekte – a priori nicht als Gegenverkehr relevant – als *nicht relevant* zu klassifizieren. Die größte Tor-Weite, die diese Bedingung erfüllt liegt bei 7,5 m und ist in die Abbildung mit eingetragen.

Die zweite Versuchsstrecke, die sich für die Darstellung *nicht relevanten* Gegenverkehrs eignet liegt zwischen Aschaffenburg/Nilkheim und Niedernberg (Anhang F.3). Hier existiert ein Grünstreifen neben der Straße, der häufig durch landwirtschaftliche Fahrzeuge verschiedener Art benutzt wird. Der Gegenverkehr wird durch das Fahrzeug mit höherem Aufbau (Anhang D) gebildet. Der Versuchsablauf ist vergleichbar mit dem Versuch auf der

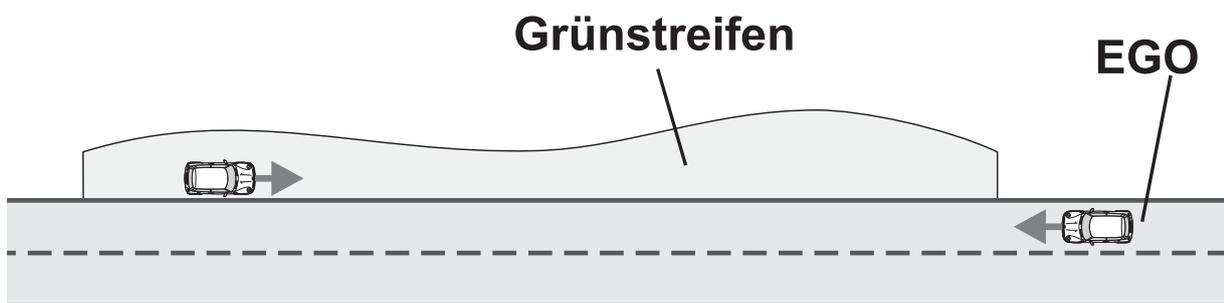


Abbildung 5.12: Versuchsaufbau Nilkheim: Ein von einem Versuchsfahrer bewegtes Fahrzeug fährt dem EGO-Fahrzeug auf einem der Fahrbahn benachbarten Grünstreifen entgegen. Aufgezeichnet wird der laterale Abstand des detektierten Fahrzeugs zum modellierten Straßenverlauf.

B26, die Zielgeschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs ist identisch, aufgrund der, gegenüber der asphaltierten Fahrradstrecke geringeren Oberflächengüte des Grünstreifens fährt das entgegenkommende Fahrzeug in dieser Situation jedoch mit einer reduzierten Geschwindigkeit von 20 km/h. Ein weiterer Unterschied besteht in der Breite der genutzten Fahrbahn. Die Straße ist angelehnt an den Regelquerschnitt 9,5, somit ist die Breite eines Fahrstreifens um etwa 0,5 m geringer. Weiterhin ist die Position des Grünstreifens im Vergleich zum Fahrradweg bei der B26 näher an der Fahrbahn. Die prinzipielle Anordnung zeigt Ab-

bildung 5.12. Beide genannten Punkte lassen die Prognose zu, dass dieser Versuch näher an einem Worst-Case Szenario liegt, d. h. dass der als *nicht relevant* zu klassifizierende Gegenverkehr näher an der Mittellinie der modellierten Straße liegt und somit die Tor-Weite als Ergebnis dieses Versuchs kleiner gewählt werden muss, um alle *nicht relevanten* Gegenverkehrsfahrzeuge auszuschließen. Da auch in diesem Fall der Grünstreifen nicht permanent befahren werden darf, wurde auch hier die Einschränkung auf die Durchführung von 3 Versuchen gemacht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Es ist zu

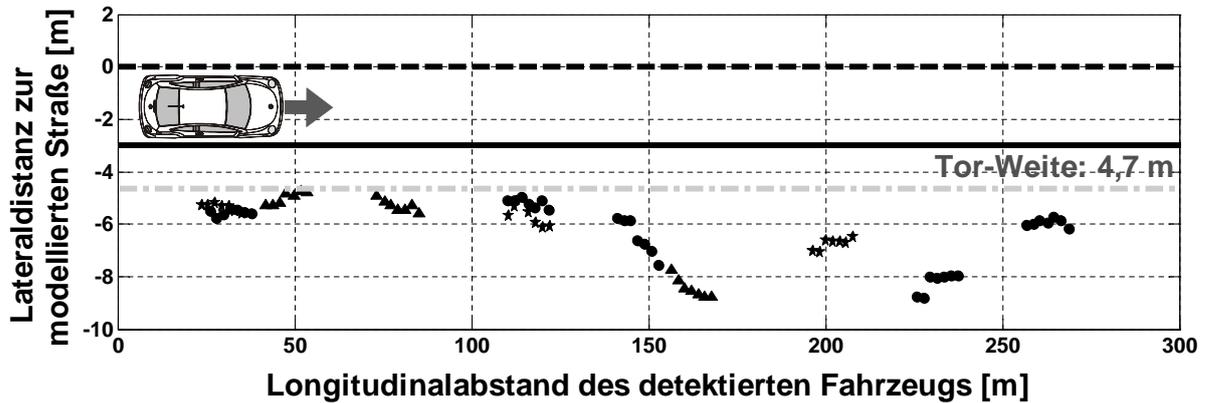


Abbildung 5.13: Ergebnisse der Versuche mit einer gestellten Situation auf der Verbindung Aschaffenburg/Nilkheim-Niedernberg: Hier wird eine Tor-Weite von 4,7 m benötigt, um *nicht relevanten* Gegenverkehr entsprechend richtig klassifizieren zu können.

erkennen, dass sich die Messpunkte für den Abstand zum modellierten Straßenverlauf hier durchschnittlich näher an der Mittellinie befinden, als dies bei der B26, mit größerer Straßenbreite und größerem seitlichen Abstand des Gegenverkehrsfahrzeugs zum Straßenrand, der Fall war. Das Ergebnis ist somit erwartungskonform. Um alle detektierten Objekte auszuschließen ist eine Tor-Weite von höchstens 4,7 m zu wählen, diese ist in der Abbildung markiert. Für die korrekte Klassifikation von Fahrzeugen am Fahrbahnrand, ist diese Situation also als herausfordernder gegenüber der Situation auf der B26 zu bewerten. Das dritte Szenario, welches zur Ermittlung einer oberen Schranke der zu wählenden Tor-Weite dienen soll, befindet sich westlich von Griesheim (Anhang F.4), die Fahrbahn ist auf dem genutzten Streckenabschnitt in Richtung Büttelborn rechtsgekrümmt und die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit liegt bei 70 km/h. An der Außenseite der Straße befindet sich ein nicht befestigter Weg, der zum Zugang zu landwirtschaftlichen Feldern dient und zu diesem Zweck häufig genutzt wird, Abbildung 5.14 zeigt die Situation. Die Möglichkeit der guten Gesamtübersicht über die Strecke gestattet hier die Durchführung von Versuchsfahrten in zwei Richtungen, nach Norden in Richtung Büttelborn und nach Süden in Richtung Griesheim. Aus vergleichbaren Gründen wie in den beiden ersten Versuchen mit *nicht relevantem* Parallelverkehr werden hier für jede Richtung 3 Versuchsfahrten aufgezeichnet. Bild 5.15 zeigt die Resultate. Alle Distanzen aus der Ausgabe des Algorithmus, die mit der Fahrtrichtung Büttelborn aufgezeichnet wurden sind durch dreieckige Markerpunkte gekennzeichnet, die Messungen aus der Gegenrichtung Griesheim haben jeweils eine Punktform. Es ist zu erkennen, dass für longitudinale Distanzen unterhalb eines Wertes von etwa 100 m qualitativ das erwartete Ergebnis vorliegt, der *nicht relevante* Gegenverkehr wird auf unterschiedlichen Seiten der modellierten Fahrbahn eingeordnet. Für größere Distan-

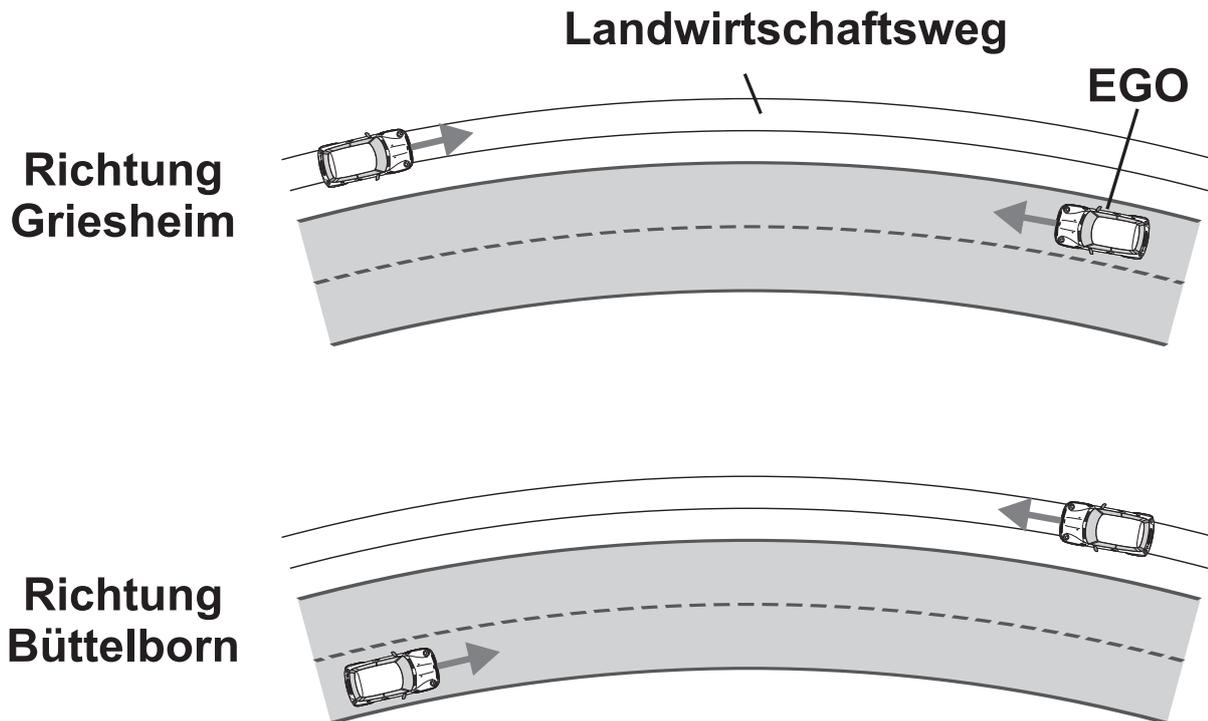


Abbildung 5.14: Versuch nahe Griesheim: Die Fahrbahn weist in diesem Versuch eine Krümmung auf, der Gegenverkehr kommt dem EGO-Fahrzeug auf einem seitlichen Landwirtschaftsweg entgegen.

zen jedoch, nähern sich die Detektionen aus beiden Richtungen immer weiter einander an und sind nicht mehr differenzierbar. Dies ist jedoch eine Grundvoraussetzung für die Definition einer Tor-Weite, die sich für eine valide Klassifikation eignet. Aus den in diesem Szenario ermittelten Messdaten muss daher die Gesamtaussage abgeleitet werden, dass der Algorithmus in dem Versuchsaufbau, wie er in dieser Arbeit gewählt wurde, nicht generell für gekrümmte Fahrbahnen anwendbar ist.

Tor-Weite: Relevante Fahrzeuge

In der ersten Versuchsreihe wurden Experimente durchgeführt, um die maximal mögliche Tor-Weite zu ermitteln, die notwendig ist, um Fahrzeuge, die sich nicht auf dem vorausliegenden Straßenverlauf befinden, als *nicht relevant* zu klassifizieren. Dies wurde bewusst als erster Schritt gewählt, da der Vermeidung von *Falsch-Positiv*-Fehlern (Fahrzeug wird als *relevant* klassifiziert, obwohl es sich nicht auf der Strecke befindet) die höchste Priorität eingeräumt wurde. Es hat sich gezeigt, dass für die Erreichung dieses Ziels auch bei Landstraßen mit kleineren Regelquerschnitten, eine Tor-Weite von 4,7 m nicht überschritten werden darf, da sonst *Falsch-Positiv*-Klassifikationen auftreten können. Dies gilt aber nur für die Betrachtung gerader Strecken, da bei den Versuchen mit einer gekrümmten Fahrbahn keine Grenz-Tor-Weite definiert werden konnte. In den folgenden Experimenten wird daher geprüft, ob sich unter diesen einschränkenden Bedingungen – Versuch auf einer geraden Strecke und Nutzung einer Torweite von 4,7 m – Fahrzeuge korrekt klassifizieren lassen, die sich tatsächlich auf der vorausliegenden Fahrbahn befinden. Dies gelingt nicht, wenn *Falsch-Negativ*-Fehler auftreten, d. h. ein detektiertes Objekt weist eine, gemäß Ausgabe des vorge-

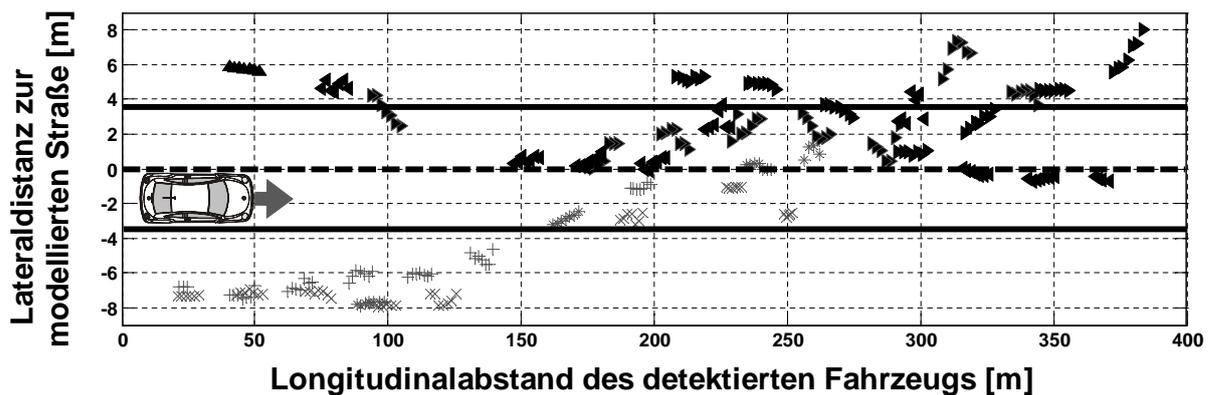


Abbildung 5.15: Ergebnisse der Versuche auf einer gekrümmten Strecke in der Nähe von Griesheim. Die Messpunkte in Dreiecksform gründen auf den Versuchen in der Fahrtrichtung Büttelborn, die Kreuzmarker bezeichnen Messungen aus der Fahrtrichtung Griesheim. Es kann keine globale Schranke gefunden werden, die eine zuverlässige Aussortierung von *nicht relevanten* Fahrzeugen gestattet.

schlagenen Algorithmus, größere laterale Distanz zum Fahrbahnverlauf auf als die gewählte Tor-Weite im Versuch. Die Versuche wurden auf drei verschiedenen Strecken durchgeführt, B26 Altheim-Babenhausen, die Verbindung Aschaffenburg/Nilkheim-Niedernberg sowie ein Teilstück der Bundesstraße B3 zwischen Darmstadt und Bickenbach (Anhänge: F.2, F.3, F.8). Mit der Umfeldsensorik wurden dabei Gegenverkehrsfahrzeuge im normalen, öffentlichen Straßenverkehr aufgezeichnet, anschließend konnte geprüft werden, ob diese Objekte jederzeit innerhalb der vorgegebenen Tor-Weite von 4,7m liegen. Über alle 3 Versuchsstrecken wurden insgesamt 54 Gegenverkehrsfahrzeuge detektiert und als Grundlage für die Ermittlung des lateralen Abstandes zur modellierten Straße durch den vorgeschlagenen Algorithmus verwendet. In Abbildung 5.16 ist das Ergebnis aller Fahrten, getrennt nach den Versuchsstrecken, aufgeführt. Auf der Ordinate ist der longitudinale Abstand zu den beobachteten Fahrzeugen aufgeführt, die Abszisse bezeichnet die Ausgabe des Algorithmus, also die Lateraldistanz zum Straßenmodell. Zur besseren Orientierung ist an der Abszissenposition 0 die Mittellinie der modellierten Straße eingezeichnet sowie die Fahrbahnbegrenzungen und die Weite des Klassifikationsstores. Deutlich zu erkennen ist, dass alle bestimmten Distanzen innerhalb des definierten Bereiches liegen, es tritt also in keiner Situation ein *Falsch-Negativ*-Fehler auf. Hierbei ist jedoch häufig die Situation gegeben, dass sich die Objekte sehr nahe an diese Grenze heranbewegen, Beispiele für eine solche Lage sind verschiedene Distanzwerte bei den Versuchsstrecken B26 und B3, jeweils im Bereich longitudinaler Objektdistanzen von etwa 200 m.

***Nicht relevanter* Gegenverkehr auf spitz zulaufender Straße**

Bei den möglichen Problemsituationen in Abbildung 5.9 sind Verkehrssituationen vom Typ 2 – Abknickender Straßenverlauf – aufgeführt. Eine reale Szenerie, die eine entsprechende Straßenanordnung zeigt, liegt in der Nähe von Griesheim auf der Weiterstädter Straße in Fahrtrichtung Norden (Anhang F.6).

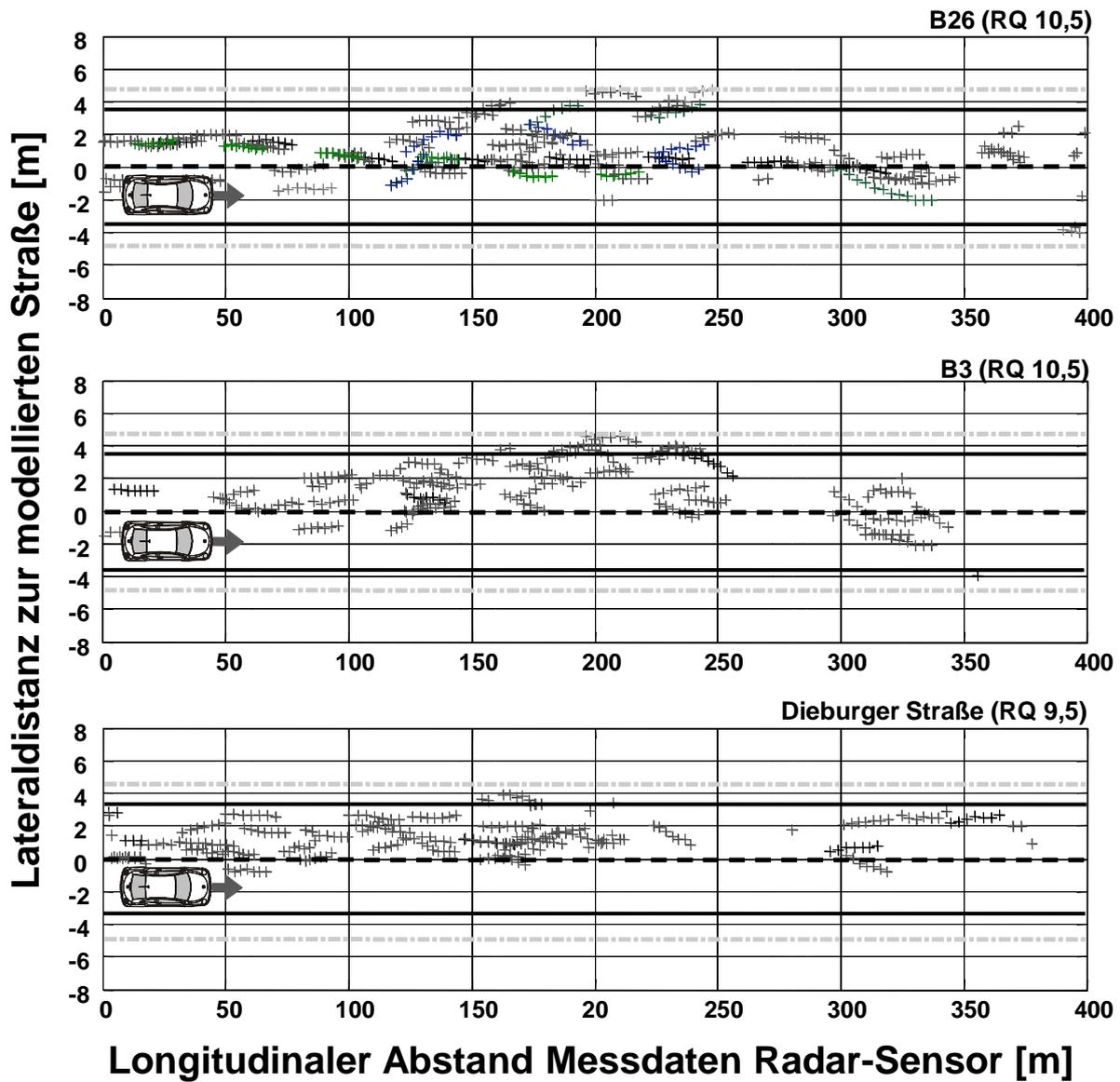


Abbildung 5.16: Ergebnisse der Versuche zur Prüfung der in der ersten Versuchsreihe ermittelten Maximal-Tor-Weite von 4,7 m. Obschon häufig knapp an der Grenze, wird dieser Schwellwert in keinem der 54 beobachteten Fälle unterschritten, so dass in jedem der aufgeführten Fälle eine korrekte Klassifikation durchgeführt worden wäre.

Hier kann die Situation auftreten, dass dem EGO-Fahrzeug Gegenverkehr auf einem von rechts einmündenden, spitz zulaufenden Landwirtschaftsweg entgegenkommt. Dieses Fahrzeug befindet sich in der gegebenen Anordnung im Erfassungsbereich der Umfeldsensorik und muss somit vom dargestellten Klassifikationsalgorithmus als *nicht relevant* klassifiziert werden, um für die Weiterverarbeitung der Situationsinterpretation des Überholassistenten unberücksichtigt zu bleiben. Als Versuchsaufbau wurde das EGO-Fahrzeug mit der auf der Strecke erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h in nördlicher Richtung fahrend positioniert, der Gegenverkehr fährt mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 km/h auf der spitz zulaufenden Straße entgegen, und hält direkt an der Einmündung an, um dem herannahenden EGO-Fahrzeug die Vorfahrt zu gewähren. Nach diesem Muster wur-

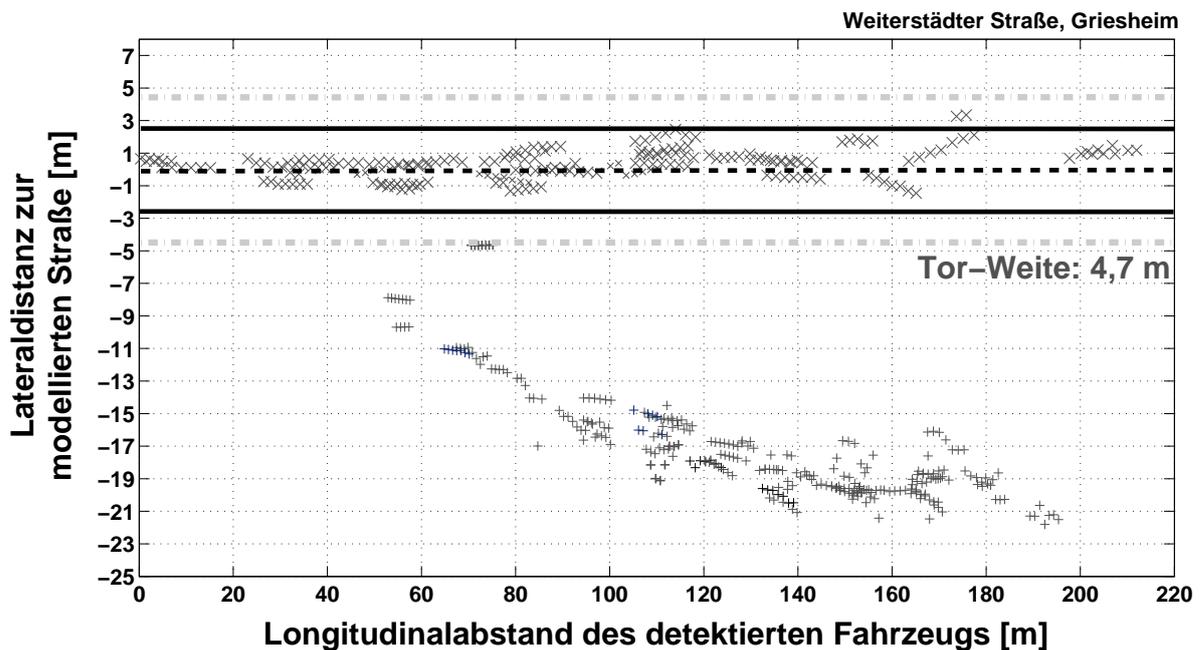


Abbildung 5.17: *Nicht relevanter* Gegenverkehr auf einer spitz zulaufenden, rechts einmündenden Straße. Die vertikal stehenden Kreuze sind Messpunkte des Fahrzeugs auf der einmündenden Straße, diagonal markierte Messpunkte indizieren *relevanten* Gegenverkehr. Mit der gewählten Tor-Weite von 4,7 m können beide Objekte eindeutig voneinander getrennt werden, die korrekte Klassifikation ist möglich.

den 11 Versuchswiederholungen gefahren und die Ausgabe des Klassifikationsalgorithmus, der laterale Abstand des beobachteten Objekts zum modellierten Straßenverlauf, aufgezeichnet. Die Auswertung der Messdaten ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Bei den beiden ersten Versuchsreihen zur Ermittlung einer passenden Tor-Weite um die Objektklassifikation durchführen zu können wurde ein für das Prototypensystem optimaler Wert bei 4,7 m gefunden. Um bewerten zu können, ob eine korrekte Klassifikation auf Basis der Messwerte stattfinden kann, ist dieser Wert in der Abbildung eingetragen. Zur besseren Orientierung ist zusätzlich der modellierte Straßenverlauf aufgeführt. Die Messpunkte des *nicht relevanten* Gegenverkehrs der einmündenden Straße aus allen Wiederholungen sind jeweils als „+“ eingetragen, die „x“-Marker bezeichnen regulären, also *relevanten*, Gegenverkehr. Deutlich ist zu erkennen, dass die gewählte Tor-Weite von 4,7 m eine eindeutige Unterscheidung

dieser beiden Fälle ermöglicht. Mit dem so identifizierten Wert wäre es also in allen untersuchten Fällen der vorliegenden Szenerie möglich gewesen, den falschen Gegenverkehr eindeutig als solchen zu klassifizieren.

Nicht relevanter Gegenverkehr bei abknickender Straße

Eine weitere reale Verkehrssituation vom Problemfall-Typ 2 findet sich in der Nähe von Groß-Rohrheim (Anhang F.7). Im Unterschied zu einer seitlich einmündenden Straße zweigt hier eine zunächst in westlicher Richtung verlaufende Straße nach Norden hin ab. In der Verlängerung des ursprünglichen Straßenverlaufs mündet eine Ortsstraße ein, so dass sich die in Abbildung 5.9 gezeigte Szene ergibt. Der Versuchsablauf ist vergleichbar mit dem Experiment mit der einmündenden spitzen Straße, die Geschwindigkeit des Gegenverkehrs liegt hier jedoch bei 50 km/h. Abbildung 5.18 zeigt die Ergebnisse des mit

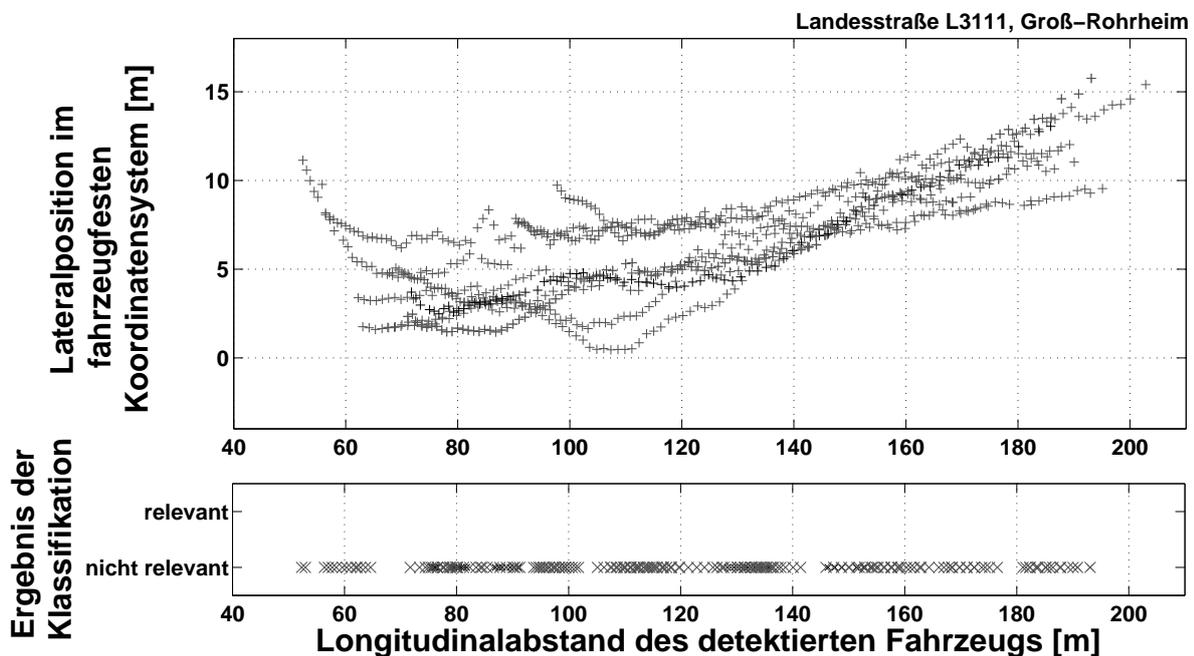


Abbildung 5.18: Nicht relevanter Gegenverkehr auf einer Straße in der geraden Verlängerung einer abknickenden Straße. Die obere Grafik zeigt die Position des erkannten *nicht relevanten* Fahrzeugs, die untere das Klassifikationsergebnis des Algorithmus. Das *nicht relevante* Fahrzeug wird zu jedem Zeitpunkt richtig als solches klassifiziert.

insgesamt 10 Wiederholungen durchgeführten Experiments: Im oberen Teil sind die Positionen des erkannten Objekts in fahrzeugfesten Koordinaten angegeben, der untere Teil zeigt die Klassifikationsergebnisse des Algorithmus. Hier ist erneut der Effekt zu erkennen, dass das Objekt zwar kontinuierlich beobachtet werden kann, eine Klassifikation jedoch aufgrund der diskutierten Einschränkungen der verwendeten Extraktionssoftware nur mit Unterbrechungen möglich ist. Parametriert wurde mit einer Tor-Weite für den Lateralabstand von 4,7m. Der Verlauf der detektierten Objekte kann aus der Straßengeometrie erklärt werden, die Messungen bleiben unterhalb einer Longitudinaldistanz von etwa 60 m aus, da das Fahrzeug auf der einmündenden Straße anhält und für die Verarbeitung nur bewegte Objekte berücksichtigt werden. Offenbar kann das *nicht relevante* Fahrzeug in allen

Experimenten korrekt als nicht zum vorausliegenden Straßenverlauf zugehörig klassifiziert werden.

Gierwinkelkompensation

Um die in Abschnitt 5.3.2 definierte Hypothese zur Kompensation der Fahrzeugeigenbewegung durch die im Fahrzeug vorhandenen Seriensensorik zu bewerten, wird ein Versuch auf dem abgesperrten Testgelände in Griesheim definiert. Ziel ist es, die durch die Eigenbewegung des EGO-Fahrzeugs hervorgerufenen Schein-Bewegungen beobachteter Fahrzeuge soweit zu kompensieren, dass die hierdurch verursachte Abweichung in der Lateralposition beobachteter Objekte immer kleiner als 2m bleibt. Auf einer geraden Strecke mit einem Gegenverkehrsfahrzeug, welches stationär auf dem Gegenverkehrsfahrbahnstreifen fährt, sind prinzipiell zwei Effekte zu beobachten, die eine Änderung der y -Position eines verfolgten Fahrzeugs verursachen: Gierbewegungen und Lateralbewegungen zur Straßenlängsrichtung. Wenn diese beiden Effekte durch Bestimmung der entsprechenden Größen aus Informationen der ESC-Inertialsensorik des EGO-Fahrzeugs quantitativ in ausreichender Präzision bestimmbar sind, ist es möglich, die resultierenden Änderungen in der y -Position beobachteter Fahrzeuge zu kompensieren.

Die Gierbewegung ist über den Gierratensensor erfassbar. Da hier die Änderung des Gierwinkels über der Zeit gemessen wird, ist zur Bestimmung des gesuchten Wertes für den Gierwinkel zur Fahrbahn eine Integration notwendig. Hierdurch kann ermittelt werden, wie schräg das EGO-Fahrzeug im Bezug auf den momentan befahrenen Fahrbahnverlauf ausgerichtet ist und in welcher Größe eine hierdurch verursachte Lateralbewegung verfolgter Objekte zu erwarten ist. Für die translatorische Bewegung des EGO-Fahrzeugs auf der Fahrbahn kann die Querschleunigung als Maßstab herangezogen werden, hier ist eine zweifache Integration notwendig.

Zur Evaluation der Hypothese wird ein Fahrversuch auf dem Testgelände in Griesheim durchgeführt. Dabei fährt das EGO-Fahrzeug einem anderen Versuchsfahrzeug entgegen, welches mit konstanter Geschwindigkeit auf dem Gegenverkehrsfahrbahnstreifen fährt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.19 skizziert. Während sich das entgegenkommende Fahrzeug im Erfassungsbereich der Umfelderkennung befindet, führt das EGO-Fahrzeug zwei rasche Fahrbahnwechsel durch, aufgezeichnet werden dabei die Daten des Objekttrackings sowie die Messwerte für die Gierrate und Querschleunigung. Der Verlauf der Strecke auf dem Versuchsgelände weist keine Krümmung auf, so dass die Querschleunigungen beobachteter Objekte besser auf Bewegungen des EGO-Fahrzeugs zurückgeführt werden können. Für den Ablauf eines Überholvorgangs werden diese Manöver als Worst-Case Fall angenommen, da hier die höchsten in einem solchen Überholablauf zu erwartenden Werte für Gier- und Lateralbewegung auftreten. Es werden insgesamt 15 Versuche nach dem aufgezeigten Muster durchgeführt. In der Auswertung kann nun die y -Position der real beobachteten Objektspur des verfolgten Gegenverkehrsobjekts mit dem entsprechenden Verlauf der Bewegungen verglichen werden, die aufgrund der gemessenen Eigenbewegung des EGO-Fahrzeugs erwartet werden. Der Idealfall ist die Deckungsgleichheit dieser beiden Verläufe. Die Pseudo-Bewegung verfolgter Objekte wäre in diesem Fall vollständig kompensierbar, also durch die einfache Fahrzeug-Seriensensorik korrigierbar. Der obere Graph in Abbildung 5.20 zeigt einen repräsentativen Verlauf aus den Versuchsauswertungen. Am Verlauf der y -Position des verfolgten Objekts sind deutlich die Effekte der Eigenbewegung zu erkennen. Nach dem Eintritt in den Sensorerfassungsbereich knapp unter

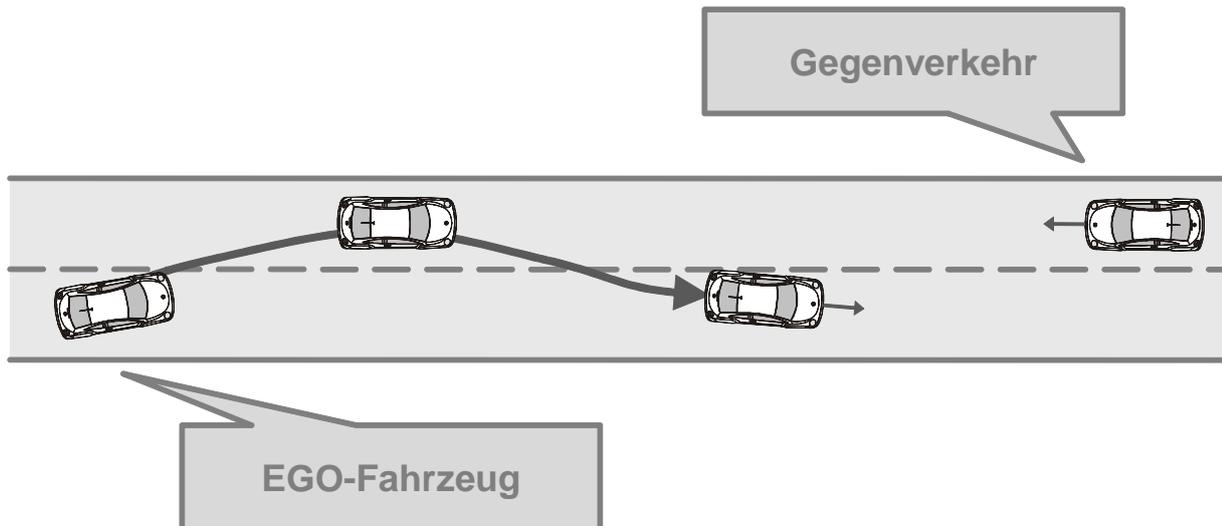


Abbildung 5.19: Fahrversuche zur Hypothese 'Eigenbewegungs-Kompensation': Sobald sich der Gegenverkehr im Sensorerfassungsbereich befindet, führt das EGO-Fahrzeug zwei Fahrstreifenwechselmanöver aus, dabei werden die Ergebnisse der Objektverfolgung und die Messwerte für Gierrate und Querbeschleunigung aufgezeichnet.

einen Distanzwert von 400 m führt das EGO-Fahrzeug zunächst einen Fahrstreifenwechsel nach links durch, hierdurch entsteht eine Pseudo-Lateralbewegung des Gegenverkehrs in die Richtung der negativen y -Achse im fahrzeugfesten Koordinatensystem. Der kurze horizontale Verlauf nach diesem Manöver stellt die Phase der stationären Fahrt des EGO-Fahrzeugs auf dem Gegenverkehrsfahrstreifen dar, es folgt der Fahrstreifenwechsel nach rechts mit entsprechender Pseudo-Bewegung des beobachteten Objekts in Richtung der positiven y -Achse. Aus den beiden dargestellten Verläufen ist zu erkennen, dass die qualitative Messbarkeit der Eigenbewegung durchaus Potential zur Kompensation dieser Effekte bietet. Im unteren Teil der Abbildung ist die Differenz der beiden Verläufe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen der beobachteten y -Positionen, zu den aufgrund der Eigenbewegungs-Messungen erwarteten Werten, über weite Bereiche innerhalb eines Bandes von 2 m verbleibt, insbesondere während der Durchführung der Fahrstreifenwechsel jedoch auch deutlich darüber hinaus geht. Die Aussage der Hypothese ist somit nicht zu bestätigen, das Ergebnis der durchgeführten Versuche liegt also in der Verwerfung der Aussage der Hypothese. Offenbar sind die Toleranzen des hier angewendeten Algorithmus und seiner Eingangsdaten zu groß, als dass sich aus der Integration dieser Werte eine ausreichende Genauigkeit für eine Kompensation von Fahrzeug-Eigenbewegungen in der erforderlichen Größenordnung erreichen ließe.

5.4 Diskussion und Fazit

Ausgangspunkt der durchgeführten Experimente war die in Abschnitt 5.3.2 definierte Hypothese 'Schwellwert Lateralposition'. Durch das Experiment auf der Versuchsstrecke Griesheim (Anhang F.4), bei der keine Identifikation einer geeigneten Tor-Weite erfolgen konnte, wird diese *Universelle Hypothese* falsifiziert, da sie eine korrekte Funktion in „jeder Situation“ voraussetzt. Dies wurde mit dem vorgeschlagenen System nicht erreicht. Alle

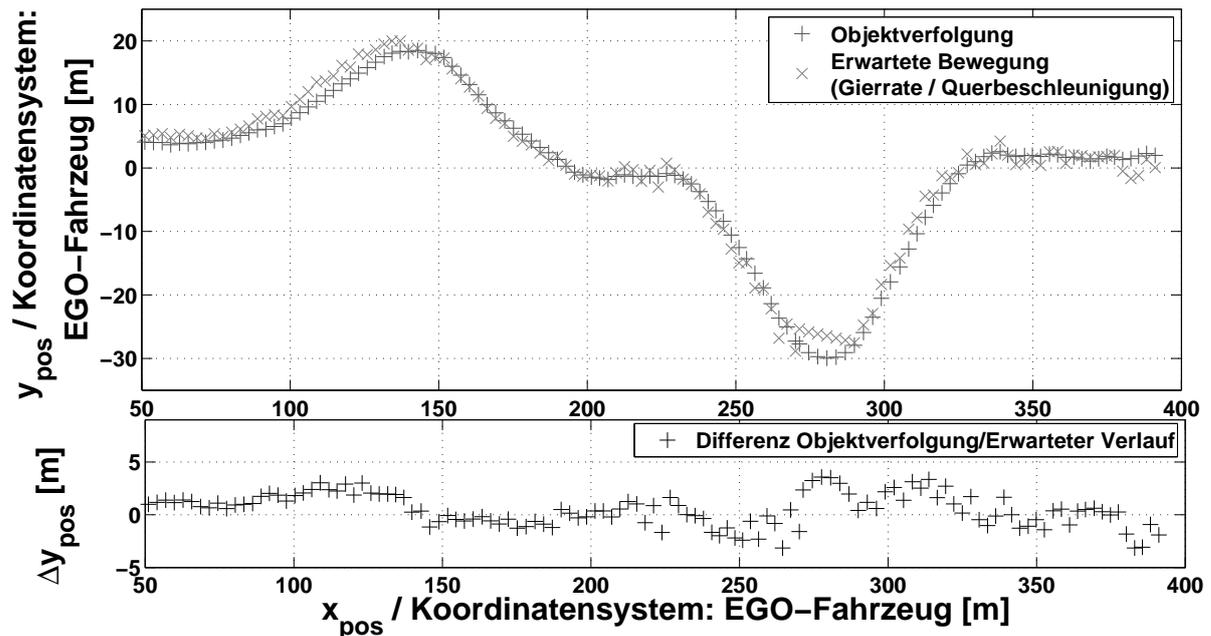


Abbildung 5.20: Oben: Verlauf der Position eines beobachteten Objekts und dem entsprechenden erwarteten Verlauf. Es zeigt sich, dass die Kompensation qualitativ durchführbar ist. Unten: Differenz zwischen den beiden oberen Werten, die in der Hypothese geforderte Grenze von 2 m wird zum Teil überschritten.

übrigen Experimente beschränken sich auf die Betrachtung von geraden Straßen, ohne horizontale Krümmung. Unter dieser Voraussetzung konnte eine Tor-Weite gefunden werden, die sowohl die korrekte Klassifikation aller in den Experimenten beobachteten *nicht relevanten* Fahrzeuge als auch der *relevanten* Fahrzeuge ermöglicht. Da der Fokus eines Überholassistenten generell im Bereich von Überholstrecken liegt, die in der Mehrzahl keine Krümmung aufweisen, kann so die Modifikation der Hypothese um diese Einschränkung mit nur kleinen Abstrichen beim Hypothesenwert durchgeführt werden:

Hypothese „Schwellwert Lateralposition auf Strecken ohne Krümmung“

Auf Basis des lotrechten Abstandes detektierter Fahrzeuge von der vorausliegenden Straße kann ein Schwellwert gefunden werden, der im Falle einer stationären, fahrstreifenmittigen Fahrt auf einem Straßenabschnitt ohne horizontale Fahrbahnkrümmung, die fehlerfreie Klassifikation nicht relevanter, entgegenkommender Fahrzeuge, sowie einen Anteil von Fehlklassifikationen relevanter Objekte von unter 1 % ermöglicht.

Da der Grundcharakter dieser Hypothese auch nach dieser Änderung der einer *Universellen Hypothese* ist, kann generell nur eine Bewährung erfolgen. Dies ist durch die durchgeführten Experimente der Fall, da durch kein Versuchsergebnis eine Falsifikation identifiziert werden kann.

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass die Klassifikation von Objekten, die von einer Umfelderkennung beobachtet werden, unter Nutzung digitaler Karteninformationen prinzipiell möglich ist. Der zu diesem Zweck vorgeschlagene Algorithmus kann, unter der Einschränkung auf gerade Fahrbahnverläufe und stationäre Fahrt, mit einem Schwellwert für die Weite des Klassifikationsstores versehen werden, der sowohl die Vermeidung von *Falsch-Positiv*- wie auch von *Falsch-Negativ*-Fehlern gestattet. Mit den Experimenten für den Problemfall von Fahrzeugen, die sich parallel zur momentan vom EGO-Fahrzeug befahrenen Straße bewegen, konnte keine Falsifizierung erfolgen. Ebenso wurde gezeigt, dass die korrekte Klassifikation von *nicht relevantem* Gegenverkehr auf einmündenden Straßen erfolgreich angewandt werden kann. Somit existiert ein Ansatz, der direkt auf marktverfügbaren digitalen Karten fußt und zudem durch einen einfachen Aufbau universell einsetzbar ist, beispielsweise auf spezieller Rechner-Hardware deren Ressourcen üblicherweise starken Restriktionen unterworfen ist. Da bislang keine entsprechenden Forschungsarbeiten in diesem Bereich bekannt sind, kann hier ein deutlicher Fortschritt verzeichnet werden, der für die potentielle, kommerzielle Anwendung eines Überholassistentensystems von entscheidender Bedeutung ist. Einschränkungen sind bei der Zahl der durchgeführten Experimente, im Bereich *nicht relevanten* Gegenverkehrs im Parallelverkehr (z. B. Abbildung 5.13), zu nennen. Da die Anzahl der durchgeführten Wiederholungen aus praktischen Erwägungen gering war, besteht hier noch Bedarf für weitere Forschungsbestrebungen, die die gefundenen Effekte näher beleuchten.

Gier- bzw. Lateralbewegungen des EGO-Fahrzeugs führen zu Scheinbewegungen beobachteter Fahrzeuge. Für die korrekte Klassifikation ist es jedoch wichtig, die Position beobachteter Objekte, insbesondere lateral zur Fahrbahn, möglichst genau feststellen zu können. Bei der Untersuchung der Möglichkeit einer Kompensation dieser Scheinbewegungen durch den Einsatz von Serien-Inertialsensorik zeigte sich, dass die geforderten Maximalabweichungen von 2 m bei der Durchführung von dynamischen Fahrstreifenwechseln überschritten werden. Offenbar ist die Präzision der hier durchgeführten Vorgehensweise nicht ausreichend.

Um die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen, gibt es ausblickend Ansätze, die zentralen Einfluss auf die Güte des Klassifikationsresultats erwarten lassen:

- Präzision der digitalen Karten: Jede Abweichung des in der digitalen Karte modellierten Straßenverlaufs von der tatsächlichen Situation wirkt sich direkt auf das Klassifikationsergebnis aus, da der beispielhaft umgesetzte Algorithmus den modellierten Fahrbahnverlauf als Bewertungsgrundlage nutzt. Um Nachteile durch Ungenauigkeiten in Karten abzumildern, sind integrale Ansätze denkbar, die zur Bestimmung der Form des vorausliegenden Straßenverlaufs neben den Daten digitaler Karten auch Informationen einer Fahrschlauchprädiktion heranziehen. Ebenso ist eine Fusion mit videobildbasierten Methoden denkbar, die den unmittelbar vorausliegenden Fahrbahnverlauf durch spezielle Algorithmen schätzen.
- Bestimmung des Gierwinkels zur Fahrbahn: Die Ausrichtung des Koordinatensystems der Umfelderkennung (fahrzeugfest) zum Koordinatensystem der Karte (erdfest) ist unmittelbar von der Größe des Gierwinkels des EGO-Fahrzeugs zur Fahrbahntangentialen abhängig. Die hier vorgestellte, nahezu direkte Verwendung von Daten einer Inertialsensorik auf Serienstand zeigte keine ausreichende Präzision bei der Bestimmung dieser Größe. Hier sind weitere Untersuchungen anzuraten, Zielrichtung dabei

kann beispielsweise die weitere Verfeinerung des vorgestellten Algorithmus umfassen oder auch die Verfolgung grundlegend abweichender Ansätze, so beispielsweise die Schätzung der relevanten Größen aus den Fahrstreifenmarkierungen über eine Videobildverarbeitung.

Als Fazit zum Einsatz digitaler Karten zur Umfeldklassifikation liegt ein erster Nachweis der Machbarkeit vor, Objekte aus einer Umgebungserfassung für Fahrerassistenzsysteme mit Hilfe einer digitalen Karte zu klassifizieren. Um jedoch an dieser Stelle eine universelle Anwendbarkeit zu erreichen, sind weiterführende Forschungsaktivitäten zu unternehmen.

6 Zusammenfassung

Überholvorgänge auf Landstraßen sind auf Grund hoher Relativgeschwindigkeiten zwischen den beteiligten Fahrzeugen häufige Ursache von Verkehrsunfällen mit Schwerverletzten und Getöteten. Vielfach sind diese durch Fehleinschätzungen des überholenden Fahrers bedingt. Untersuchungen zeigen, dass Autofahrer mit der Wahrnehmung der für die Einschätzung der Gefährlichkeit eines Überholmanövers wichtigen Größen generell überfordert sind. Dies motiviert die Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems, da in der experimentellen Forschung oder in Serienfahrzeugen bislang noch keine Systeme existieren, die den Fahrer vor gefährlichen Situationen bei der Durchführung eines Überholmanövers warnen. In dieser Arbeit wurde eine Umfelderkennung für ein derartiges Überholassistenzsystem beschrieben und hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte untersucht.

Eine strukturierte Darstellung eines Umfelderkennenden Systems für Überholsituationen liegt vor. Sie weist drei zentrale Forschungsfelder auf: Die Ermittlung von Parametern, die grundlegende Bedeutung für die Funktion eines Überholassistenzsystems besitzen, die Sicherstellung einer robusten Objekterfassung sowie die Klassifikation von Umfeldobjekten hinsichtlich ihrer Relevanz für die Ableitung einer Gefahrenbewertung in einer Überholsituation. Diese Elemente dienen der Detektion von sogenannten *Überholzielen* – Freiräume zwischen überholten oder entgegenkommenden Fahrzeugen – und deren Bewertung in Bezug auf die Durchführung eines sicheren Überholvorgangs.

Als zentrales Kriterium für die Bewertung eines Überholziels wurde die Grenz-TTC identifiziert, der zeitliche Abstand zwischen Überholer und Gegenverkehr zum Ende eines Überholmanövers. Bei Unterschreitung eines als Overtaking Margin (OM) bezeichneten Grenzwertes im Rahmen der Vorausberechnung des Überholablaufs, wird das betrachtete Überholziel als gefährlich angenommen und eine entsprechende Warnung an den Fahrer ausgegeben. Um für diese Funktionalität einen Grenzwert zu ermitteln, dessen Auslegung eine maximale Zufriedenheit potentieller Anwender mit dem Systemverhalten eines solchen Assistenzsystems erwarten lässt, wurde eine Studie mit 24 Versuchspersonen und über 680 Versuchsfahrten durchgeführt. Als zentrales Ergebnis dieser Versuche resultiert die Empfehlung für einen OM von 1,4s. Ferner erlaubt die detaillierte Ergebnisdarstellung auch eine Abschätzung dahingehend, inwieweit aus einer Variation dieses Wertes eine Änderung der Fahrerakzeptanz resultiert. Ein weiterer wichtiger Parameter ist der minimale Einschereabstand zum überholten Fahrzeug, den überholende Personen am Ende des Überholmanövers wählen. In den hierzu durchgeführten Versuchen konnte ein entsprechender Wert von 27,2m ermittelt werden, mit dem 80 % der Personen der Grundgesamtheit einverstanden sind.

Mit dem Ziel der Ermittlung quantitativer Anforderungen an die zu entwickelnde Umfelderkennung wurde in dieser Arbeit der Verlauf eines idealtypischen Überholmanövers analysiert und in verschiedene Phasen unterschieden. Aus der qualitativen Bewertung der Kritikalität in diesen Überholphasen wird als zentrales Assistenzziel die möglichst früh erwünschte Warnung des Fahrers während des Verlaufs eines gefährlichen Überholmanövers

abgeleitet, dieser Zeitpunkt wird durch den Manöverbeginn repräsentiert. Ausgehend von dieser Prämisse wurde durch kinematische Betrachtungen ein Überholmodell aufgestellt, um benötigte Sensorreichweiten quantitativ zu bestimmen. Im Zentrum der maßgeblichen Einflussgrößen stehen die „Leistungsfähigkeit des überholenden Fahrzeugs“, die „Geschwindigkeit des zu überholenden Fahrzeugs“ sowie die „Geschwindigkeit des Gegenverkehrs“. Als Ergebnis wird deutlich, dass zur Erfüllung des Anspruches, einen Großteil repräsentativer Überholvorgänge auf Landstraßen abdecken zu können, in vergleichsweise leistungsstarken Fahrzeugen Sensorsichtweiten in der Größenordnung von 400 m benötigt werden. Diese Werte werden von aktuellen, marktverfügbaren Sensoren nicht erreicht. In einem Versuchsfahrzeug wurde daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Radar-Sensor so modifiziert, dass eine Erkennung von Objekten, insbesondere von Gegenverkehr, bis hin zu Distanzen von 400 m möglich ist. Weiterhin wurde ein Algorithmus zur Objektverfolgung entworfen, der Objektzustände auf Grundlage eines erweiterten Kalman-Filters schätzt und durch Anwendung heuristischer Regeln Objekts Spuren initiiert oder löscht. Als Resultat verschiedener Evaluations-Fahrversuche zur so implementierten Umfelderkennung im öffentlichen Straßenverkehr wurde gezeigt, dass die kontinuierliche Verfolgung von Gegenverkehr im Distanzbereich bis 375 m auf nahezu geraden Strecken in verschiedenen untersuchten Worst-Case-Szenarien immer erreicht werden konnte. Innerhalb dieses Entfernungsbereichs kann also von einer robusten Umfelderkennung ausgegangen werden. Ebenso wurde bestätigt, dass Gegenverkehr, der für die Gefahrenbewertung eines Überholvorgangs relevant ist, immer bereits zu einem Zeitpunkt erkannt wird, zu dem das überholende Fahrzeug den rechten Fahrstreifen noch nicht verlassen hat. Zu diesem Zeitpunkt ist die Gefahr noch als gering zu bezeichnen.

Als weiteren zentralen Punkt bei der Bewertung einer potentiellen Gefahr durch den in der frühen Überholphase noch weit entfernten Gegenverkehr muss ein Überholassistenzsystem außerdem erkennen, ob ein entgegenkommendes Fahrzeug, welches durch die Umfeldsensorik erkannt wird, tatsächlich auf dem vorausliegenden Straßenverlauf fährt, oder ob sich dieses beispielsweise auf einer angrenzenden Straße befindet und für die Gefahrenbewertung somit nicht relevant ist. Um ein solches Fahrzeug durch entsprechende Klassifikation auszuschließen, wurde ein Algorithmus beschrieben, der die Position erkannter Objekte mit dem Fahrbahnverlauf vor dem EGO-Fahrzeug abgleicht und eine entsprechende Klassifikation durchführt. Bei Versuchsfahrten auf typischen Landstraßenstrecken im Umland von Darmstadt wurde gezeigt, dass der beispielhaft umgesetzte Algorithmus – unter der Voraussetzung eines ungekrümmten Fahrbahnverlaufs – in allen untersuchten Fällen erfolgreich angewendet werden konnte. Lediglich bei entsprechenden Versuchen auf gekrümmten Straßen gelang dies nicht.

Als Gesamtfazit der vorliegenden Arbeit steht der Nachweis der prinzipiellen Realisierbarkeit einer Umfelderkennung für eine Überholassistenzfunktion unter Anwendung von Sensorprinzipien, die in Fahrerassistenzsystemen im Automobil bereits heute Verwendung finden. Dabei wurde gezeigt, dass alle relevanten Objekte für die Gefahrenbewertung eines Überholmanövers ausreichend rechtzeitig robust erfasst und klassifiziert werden können, so dass im Fall einer gefährlichen Situation ein problemloser Abbruch des Manövers durch den Fahrer möglich ist. Zahlreiche Unfälle, die durch eine fehlerhafte Einschätzung von Geschwindigkeiten der beim Überholvorgang beteiligten Fahrzeuge sowie der Größe und Distanz des Überholziels verursacht werden, könnten mit einem solchen Assistenzsystem verhindert werden.

Ausblickend liegt der größte Forschungsbedarf zur Umfelderkennung für ein Überholas-

sistenzsystem im Bereich der Klassifikation von beobachteten Fahrzeugen. Hier kann ein Assistenzsystem nach dem in dieser Arbeit dargestellten Muster, signifikant von einer präziseren Bestimmung des vorausliegenden Straßenverlaufs profitieren, so dass fehlerhafte Systemreaktionen zuverlässig vermieden werden können.

A Ergebnisdarstellung

Probandenstudie: OM als Distanz

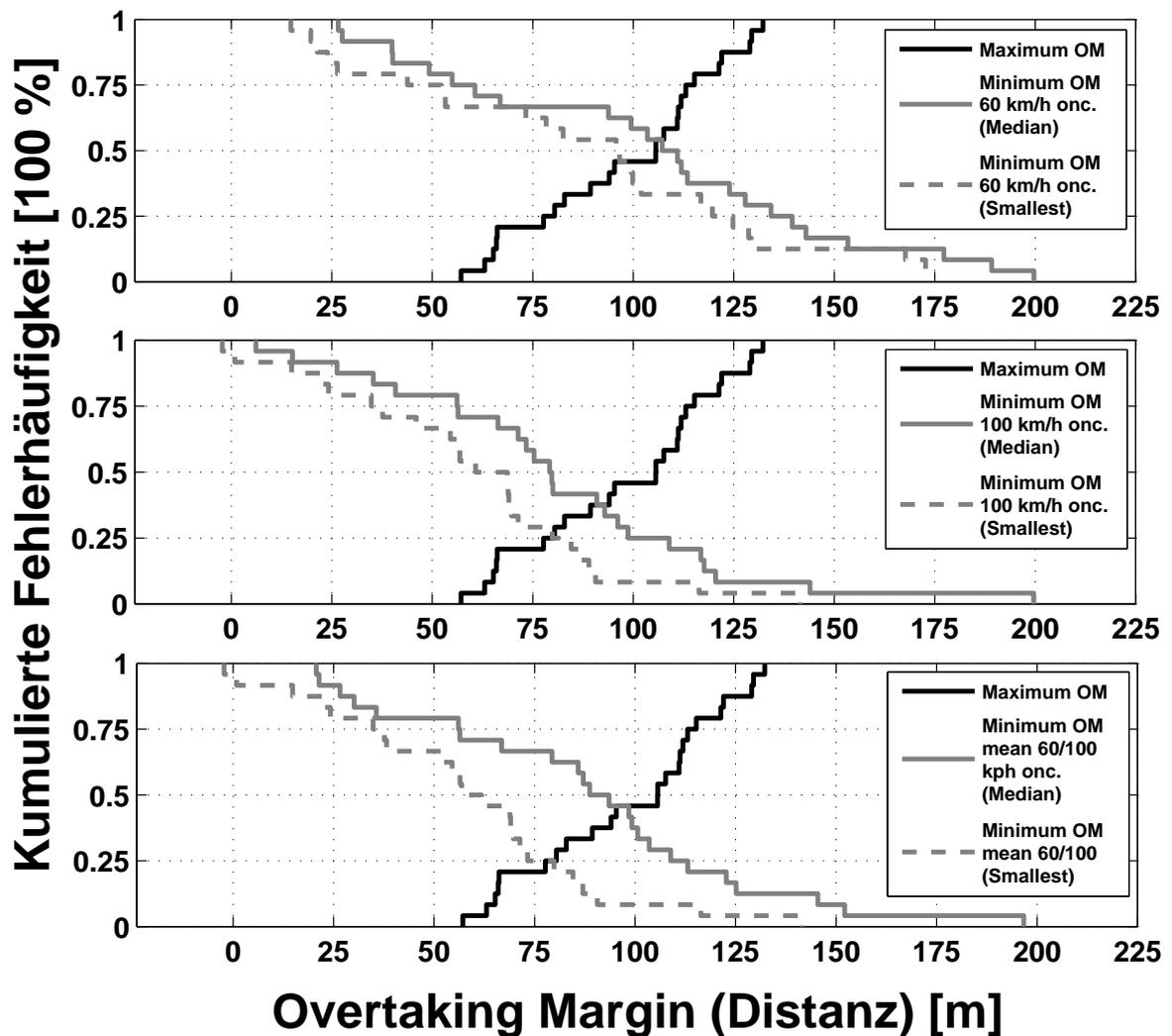


Abbildung A.1: Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung der unteren bzw. oberen Schranken für die Wahl des AOM für die Betrachtung von Distanzen zum Ende des Überholmanövers. Die Verläufe für die untere Grenze (hellgrau) sind nach der Auswertemethode unterschieden (Minimalwert oder Median der Wiederholungen eines Probanden), die drei Plots repräsentieren die unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Gegenverkehrs (60/100 km/h) und das zusammengefasste Ergebnis ohne Unterscheidung nach der Gegenverkehrsgeschwindigkeit.

B Sichtweiten Gegenverkehrsfahrstreifen

Erfassungsbereich Kreissegment - Grenzkrümmung

Für einen horizontalen Sensoröffnungswinkel θ wird bestimmt, ab welcher Grenzkrümmung die durch den Sensor zur Verfügung stehende Sichtweite nicht mehr durch das Kreisbogenstück des modellierten Sensorerfassungsbereiches begrenzt wird, sondern durch den eingeschränkten Öffnungswinkel. Hierbei ist der Öffnungswinkel in horizontaler Richtung immer als „einfach“ definiert, der Gesamt-Öffnungswinkel beträgt somit also 2θ . Die Ecke E zwischen Kreisbogenstück und Seitenbegrenzung des als Kreissegment modellierten Sensorerfassungsbereiches, dargestellt in kartesischen Koordinaten lautet:

$$x_E = r_{max} \cos(\theta) \quad (\text{B.1})$$

$$y_E = r_{max} \sin(\theta). \quad (\text{B.2})$$

Die Kreisgleichung für die obere Hälfte der Mitte des Gegenverkehrsfahrstreifens beträgt:

$$x(y) = \sqrt{\left(\frac{1}{\kappa_{CL}} - \frac{w_L}{2}\right)^2 - \left(y - \left(\frac{1}{\kappa_{CL}} + \frac{w_L}{2}\right)\right)^2}. \quad (\text{B.3})$$

Für die Bestimmung des Grenzfalls, also genau der Krümmung κ_{CL} , bei der der Verlauf des Gegenverkehrsfahrstreifens genau durch den Punkt E verläuft, repräsentiert den Grenzfall zwischen den beiden möglichen Begrenzungen der Sensorsichtweite durch Kreisbogenstück oder seitlicher Begrenzungslinie. Durch Einsetzen der Koordinaten von E in die Kreisgleichung folgt

$$r_{max} \cos(\theta) = \sqrt{\left(\frac{1}{\kappa_{CL}} - \frac{w_L}{2}\right)^2 - \left(y - \left(\frac{1}{\kappa_{CL}} + \frac{w_L}{2}\right)\right)^2}, \quad (\text{B.4})$$

dieser Ausdruck nach der Krümmung κ_{CL} aufgelöst, lässt den gesuchten Grenzwert ermitteln:

$$\kappa_{grenz} = 2 \frac{w_L - r_{max} \sin(\theta)}{r_{max}(w_L \sin(\theta) - r_{max})}. \quad (\text{B.5})$$

Erfassungsbereich Kreissegment - Geringe Krümmung

Für den Fall einer Straßenkrümmung, die so gering ist, dass $\kappa_{CL} \leq \kappa_{grenz}$ gilt, wird die Sensorsichtweite durch das Kreisbogenstück des modellierten Sensorerfassungsbereiches begrenzt. Zunächst ist also der Schnittpunkt zwischen dem Verlauf dieses Kreisbogens

$$x(y) = \sqrt{r_{max}^2 - y^2} \quad (\text{B.6})$$

und der Kreislinie der Mittellinie des Gegenverkehrsfahrstreifens

$$x(y) = \sqrt{\left(\frac{1}{\kappa_{CL}} - \frac{w_L}{2}\right)^2 - \left(y - \left(\frac{1}{\kappa_{CL}} + \frac{w_L}{2}\right)\right)^2} \quad (\text{B.7})$$

zu bestimmen. Das Lösen dieses Gleichungssystems liefert die x -Komponente

$$x_{SP1} = \sqrt{\frac{r_{max}^2 - (r_{max}^2 \kappa_{CL} + 2w_L)^2}{(w_L \kappa_{CL} + 2)^2}}. \quad (B.8)$$

Die mögliche Sichtweite entlang des Gegenverkehrsfahstreifens resultiert damit zu:

$$R_C \arcsin\left(\frac{x_{SP1}}{R_{onc}}\right). \quad (B.9)$$

Erfassungsbereich Kreissegment - Höhere Krümmung

Für den Fall einer Straßenkrümmung mit $\kappa_{CL} \geq \kappa_{grenz}$ wird die Begrenzung der Sensorsichtweite durch den horizontalen Öffnungswinkel des modellierten Sensorerfassungsbereiches bestimmt. Relevant ist also der Schnittpunkt zwischen dieser Randlinie

$$y = x \sin(\theta) \quad (B.10)$$

und der Kreislinie der Mittellinie des Gegenverkehrsfahstreifens

$$x(y) = \sqrt{\left(\frac{1}{\kappa_{CL}} - \frac{w_L}{2}\right)^2 - \left(y - \left(\frac{1}{\kappa_{CL}} + \frac{w_L}{2}\right)\right)^2}. \quad (B.11)$$

Das Lösen dieses Gleichungssystems liefert die x -Komponente des Schnittpunktes zu

$$x_{SP2} = \frac{2 \sin(\theta) + \sin(\theta) \kappa_{CL} w_L}{2 \kappa_{CL} (\sin(\theta)^2 + 1)} + \frac{\sqrt{4 \sin(\theta)^2 - 4 \sin(\theta)^2 \kappa_{CL} w_L + \sin(\theta)^2 \kappa_{CL}^2 w_L^2 - 8 w_L \kappa_{CL}}}{2 \kappa_{CL} (\sin(\theta)^2 + 1)}. \quad (B.12)$$

Die mögliche Sichtweite entlang des Gegenverkehrsfahstreifens resultiert damit zu:

$$R_C \arcsin\left(\frac{x_{SP2}}{R_{onc}}\right). \quad (B.13)$$

C Berechnung der Überholdauer

$$t_{\text{UeEND}}(m, P_{\text{netto}}, v_0^{(A)}, v^{(B)}, d_{\text{AHS}}) = -\frac{m}{2P_{\text{netto}}}(v_0^{(A)})^2 - \left(\frac{1}{2m}\Gamma + \frac{v^{(B)2}m}{2\Gamma} + \frac{v^{(B)}}{2}\right)^2 \quad (\text{C.1})$$

mit

$$\begin{aligned} \Gamma = & ((12d_{\text{AHS}}P_{\text{netto}} + 4mv_0^{(A)3} - 6v^{(B)}mv_0^{(A)2} \\ & + v^{(B)3}m + 2(36d_{\text{AHS}}^2P_{\text{netto}}^2 \\ & + 24d_{\text{AHS}}P_{\text{netto}}mv_0^{(A)3} - 36d_{\text{AHS}}P_{\text{netto}}v^{(B)}mv_0^{(A)2} \\ & + 6d_{\text{AHS}}P_{\text{netto}}v^{(B)3}m + 4m^2v_0^{(A)6} - 12m^2v_0^{(A)5}v^{(B)} \\ & + 2m^2v_0^{(A)3}v^{(B)3} + 9v^{(B)2}m^2v_0^{(A)4} \\ & - 3v^{(B)4}m^2v_0^{(A)2})^{\frac{1}{2}})m^2)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

D Versuchsfahrzeuge



Abbildung D.1: Versuchsfahrzeug BMW 5er 540i E60.

Tabelle D.1: Technische Daten des Versuchsfahrzeugs BMW

Fahrzeugtyp	BMW 540i (E60)
Nennleistung	225 kW
Hubraum	4000 ccm
Leergewicht	1725 kg
Getriebe	6-Gang-Automatik
Abmessungen (L/B/H)	4841/1846/1468
Baujahr	2006

Tabelle D.2: Technische Daten des Versuchsfahrzeugs Mercedes-Benz

Fahrzeugtyp	Mercedes-Benz S430 (W220)
Nennleistung	205 kW
Hubraum	4266 ccm
Leergewicht	1875 kg
Getriebe	5-Gang-Automatik
Abmessungen (L/B/H)	5158/1855/1444
Baujahr	1999



Abbildung D.2: Versuchsfahrzeug Mercedes-Benz S-Klasse W220 S430.



Abbildung D.3: Versuchsfahrzeug Mercedes-Benz Sprinter (T1N).

E Parameter Objektverwaltung

Alle Parameter wurden empirisch so ermittelt, dass ein Optimum hinsichtlich der aufgestellten Hypothesen resultiert. Hierbei ist zu beachten, dass eine deutliche Abhängigkeit vom konkret vorliegenden Sensoriksystem besteht, die angegebenen Werte sind daher nicht als globales Optimum zu verstehen.

Detektierte Objekte erhalten im Rahmen des beispielhaft umgesetzten Systems erst ab der zweiten erfolgreichen Zuordnung einer Messung den Status *CONFIRMED*. Die übrigen Parameter, die den Verlauf der Löschschwellen über dem Objektalter kennzeichnen, sind in Abbildung E.1 angegeben.

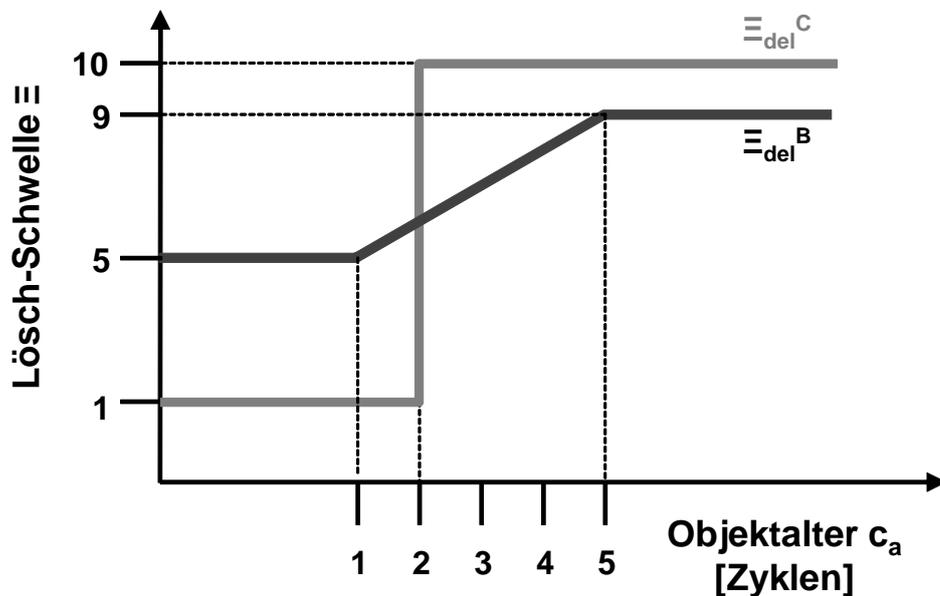


Abbildung E.1: Löschschwellen für die Objektverwaltung

F Versuchsstrecken

F.1 August-Euler-Flugplatz Griesheim

Der August-Euler-Flugplatz in Griesheim¹ gehört zur Technischen Universität Darmstadt und ist ein vielgenutzter Bereich für verschiedene Disziplinen. Für die Durchführung von Fahrversuchen zu Überholvorgängen zeigt sich besonders die etwa 1,4 km lange Start- und Landebahn geeignet, die auf einer Länge von 500 m mit einer Fahrbahnmarkierung versehen ist, die der einer typischen Landstraße in Deutschland entspricht.

F.2 Bundesstraße 26 Altheim-Babenhausen (Hessen)

Bundesstraße 26 zwischen Alheim² und Babenhausen³ (Abbildung F.1, links oben): Nach den Richtlinien zur Anlage von Straßen⁴ besitzt diese Straße einen Regelquerschnitt (RQ) von 11,5, daher beträgt die Breite eines Fahrstreifens 3,5 m, die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit auf dem Streckenabschnitt beträgt 70 km/h. In einem Abstand von etwa 2 m neben der geraden, ungekrümmten Fahrbahn, ist in Fahrtrichtung Babenhausen ein Fahrradweg installiert, der häufig auch von landwirtschaftlichem Verkehr zum Zugang zu Feldern genutzt wird. Aufgrund dieses Aufbaus eignet sich dieser Abschnitt der B26 besonders für Versuche zu Klassifikationsuntersuchungen von parallel fahrendem Gegenverkehr.

F.3 Landesstraße Aschaffenburg/Nilkheim-Niedernberg (Bayern)

Landstraße zwischen Aschaffenburg⁵ und Niedernberg⁶, Abbildung F.1, rechts oben. Der Regelquerschnitt beträgt hier 9,5; die erlaubte Höchstgeschwindigkeit liegt bei 100 km/h, der Streckenabschnitt weist keine nennenswerte horizontale Fahrbahnkrümmung auf. An den Fahrbahnrand in Fahrtrichtung Aschaffenburg grenzt ein etwa 5 m breiter Grünstreifen, der häufig durch landwirtschaftlichen Verkehr genutzt wird. Das Befahren dieses Grünstreifens eignet sich zur Darstellung von *nicht relevantem* Verkehr bei der Untersuchung von Klassifikationsalgorithmen.

¹www.griesheim.de

²www.muenster-hessen.de

³www.babenhausen.de

⁴FGSV (1996): RAS-Q S. 22.

⁵www.aschaffenburg.de

⁶www.niedernberg.de

B26 Altheim-Babenhäusen



Aschaffenburg/Nilkheim-Niedernberg



L3094 Darmstadt-Dieburg



L3303 Büttelborn-Griesheim



Abbildung F.1: Versuchsstrecken im Umland von Darmstadt.

F.4 Landesstraße L3303 Büttelborn-Griesheim (Hessen)

Die Versuchsstrecke zwischen Büttelborn⁷ und Griesheim⁸ (Abbildung F.1, links unten) befindet sich westlich von Darmstadt⁹. Der Regelquerschnitt beträgt 10,5; die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit ist mit 70 km/h festgelegt. Die Fahrbahn weist eine horizontale Krümmung auf. Zu beiden Seiten der Fahrbahn befinden sich Schotterwege, als Zugang zu landwirtschaftlichen Feldern, die zur Darstellung von *nicht relevantem* Gegenverkehr in Versuchsfahrten genutzt werden können.

⁷ www.buettelborn.de

⁸ www.griesheim.de

⁹ www.darmstadt.de

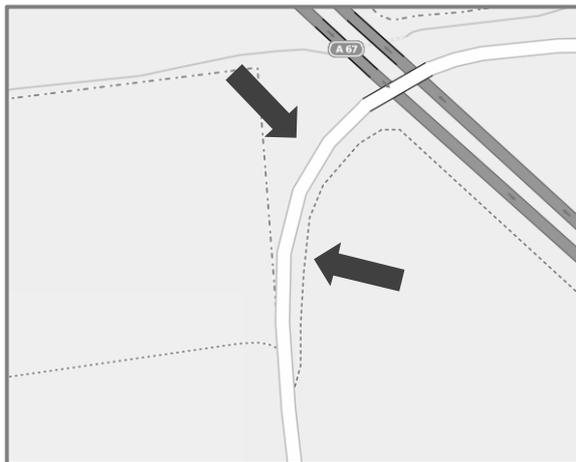
F.5 Landesstraße L3094 (Dieburger Straße) Darmstadt - Grube Messel

Abbildung F.1, unten rechts, zeigt die Landesstraße 3094, die östlich von Darmstadt in einem Waldgebiet liegt. Die Strecke weist eine Höchstgeschwindigkeit von 90 km/h auf, der Regelquerschnitt beträgt 10,5. An der Seite der Strecke ist ein Fahrradweg angelegt, der jedoch nicht von Autos befahren werden kann, hierdurch ist die Eignung dieser Strecke für Untersuchungen mit *nicht relevanten* Fahrzeugen eingeschränkt.

F.6 Griesheim nahe Brücke über A67 (Weiterstädter Straße)

Die Skizze in Abbildung F.2, links zeigt die Weiterstädter Straße in Griesheim¹⁰. Deutlich zu erkennen ist ein einmündender Landwirtschaftsweg, in der Karte gestrichelt gezeichnet.

Griesheim (bei Brücke über A67)



L3111 – Groß Rohrheim

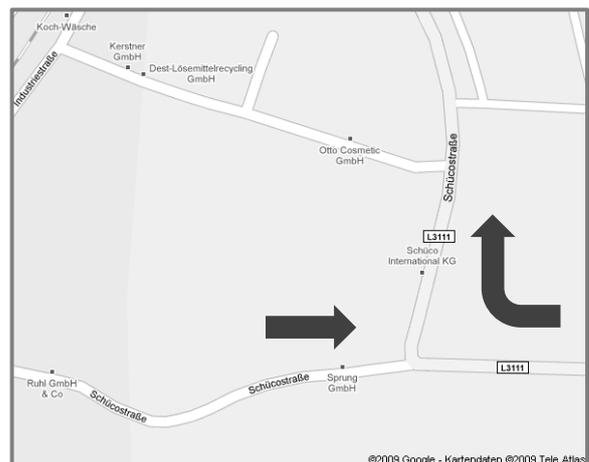


Abbildung F.2: Versuchsstrecken mit Gegenverkehrsmöglichkeit auf Straßen, die an die momentan Befahrene münden.

Entgegenkommender Verkehr auf dieser Straße kann – irrtümlich – als *relevanter* Gegenverkehr erkannt werden.

F.7 Landstraße L3111 bei Groß-Rohrheim (Hessen)

In der Nähe von Groß-Rohrheim¹¹ liegt ein Streckenabschnitt, der eine scharf abknickende Straße zeigt. Diese Strecke eignet sich für die Untersuchung des Klassifikationsalgorithmus, um Fahrzeuge, die aus der Fahrbahn in der Verlängerung der abknickenden Straße kommen, durch Klassifikation auszuschließen.

¹⁰ www.griesheim.de

¹¹ www.gross-rohrheim.de

F.8 Bundesstraße B3 Darmstadt-Bickenbach

Der Streckenabschnitt der Bundesstraße B3, der Darmstadt mit Bickenbach¹² verbindet F.3, zeigt einen völlig geraden Verlauf und liegt in einer Waldschneise. Der Regelquerschnitt der Strecke beträgt 10,5 und es existiert kein Überholverbot.

B3 Darmstadt-Bickenbach

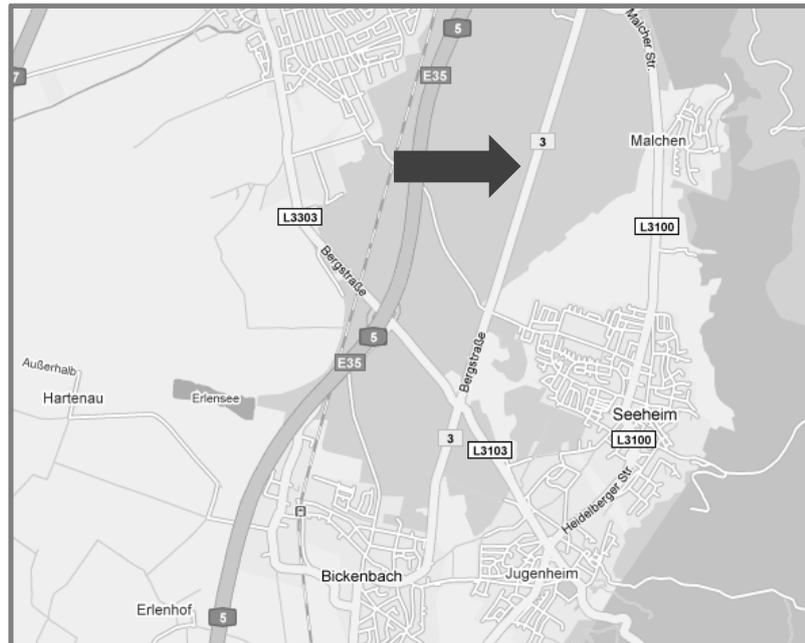


Abbildung F.3: Bundesstraße B3 ohne zusätzlichen Weg am Fahrbahnrand.

¹²www.bickenbach-bergstrasse.de

G Regelquerschnitte nach RAS-Q

Die Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil Querschnitte aus dem Jahr 1996¹ – sind das maßgebliche Regelwerk bei der Auslegung und Konstruktion neuer Straßen im Raum der Bundesrepublik Deutschland. Als Verkehrsraum relevant für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind einbahnige Straßen, wie sie typisch für die Ausführung von Landstraßen sind. Zentral sind hier die Regelquerschnitte RQ 7,5; RQ 9,5 und RQ 10,5; alle aus diesen Querschnitten resultierenden Abmessungen sind in Abbildung G.1 dargestellt.

¹FGSV (1996): RAS-Q S. 22.

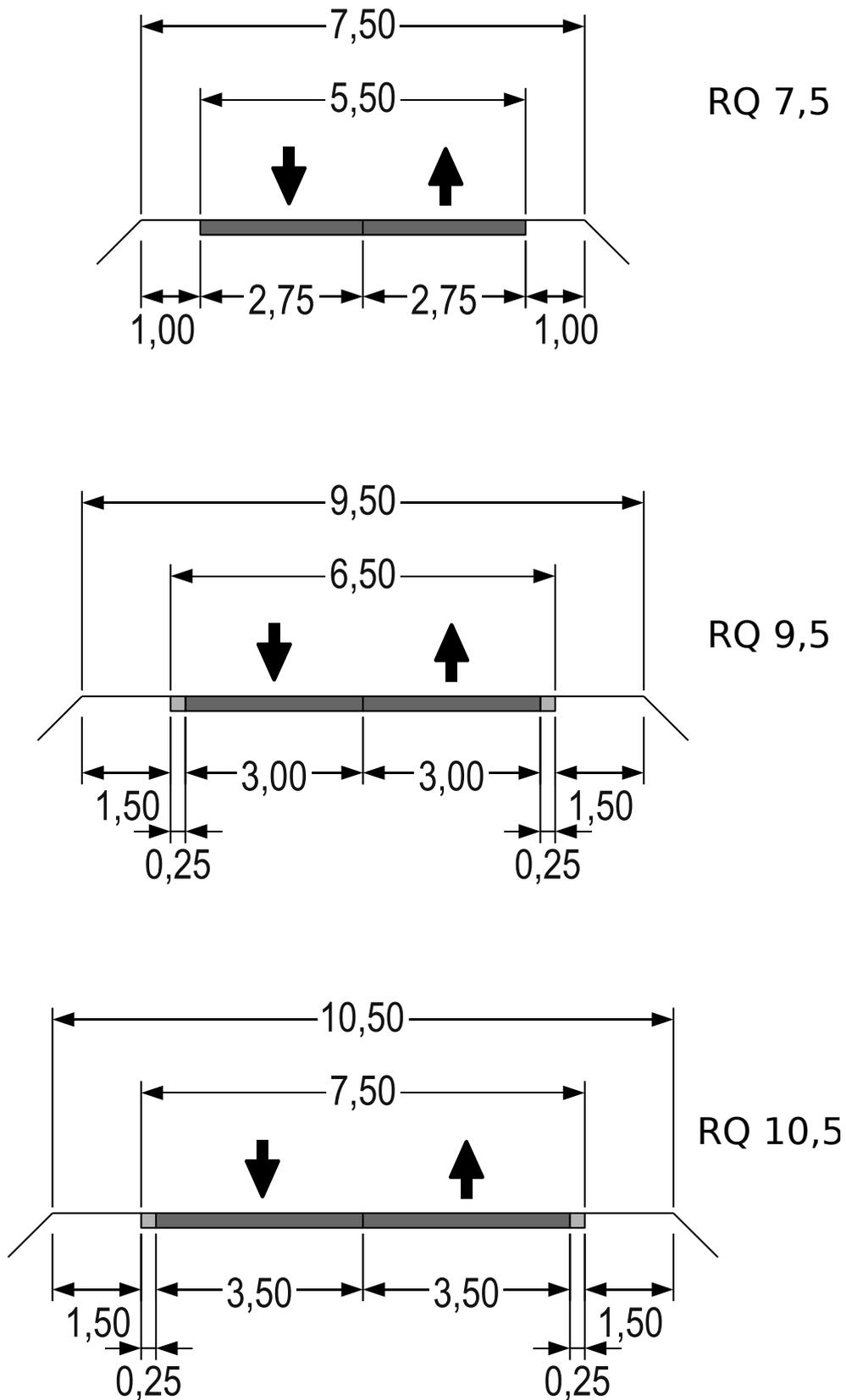


Abbildung G.1: Regelquerschnitte einbahniger Straßen in der Bundesrepublik Deutschland. Alle Maße sind in m angegeben. Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Richtlinie für die Anlage von Straßen Teil Querschnitte 1996.

H Überholen in der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)

In der Fassung der Straßenverkehrs-Ordnung für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland vom 16. November 1970 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch die Verordnung vom 28. November 2007 (BGBl. I S. 2774) finden sich die Regelungen zu Überholungen im §5:

§ 5

Überholen

(1)

Es ist links zu überholen.

(2)

Überholen darf nur, wer übersehen kann, dass während des ganzen Überholvorgangs jede Behinderung des Gegenverkehrs ausgeschlossen ist. Überholen darf ferner nur, wer mit wesentlich höherer Geschwindigkeit als der zu Überholende fährt.

(3)

Das Überholen ist unzulässig:

1. bei unklarer Verkehrslage oder
2. wo es durch Verkehrszeichen (Zeichen 276, 277) verboten ist.

(3a)

Unbeschadet sonstiger Überholverbote dürfen die Führer von Kraftfahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 7,5 t nicht überholen, wenn die Sichtweite durch Nebel, Schneefall oder Regen weniger als 50 m beträgt.

(4)

Wer zum Überholen ausscheren will, muss sich so verhalten, dass eine Gefährdung des nachfolgenden Verkehrs ausgeschlossen ist. Beim Überholen muss ein ausreichender Seitenabstand zu anderen Verkehrsteilnehmern, insbesondere zu Fußgängern und Radfahrern, eingehalten werden. Der Überholende muss sich sobald wie möglich wieder nach rechts einordnen. Er darf dabei den Überholten nicht behindern.

(4a)

Das Ausscheren zum Überholen und das Wiedereinordnen sind rechtzeitig und deutlich anzukündigen; dabei sind die Fahrtrichtungsanzeiger zu benutzen.

(5)

Außerhalb geschlossener Ortschaften darf das Überholen durch kurze Schall- oder Leuchtzeichen angekündigt werden. Wird mit Fernlicht geblinkt, so dürfen entgegenkommende Fahrzeugführer nicht geblendet werden.

(6)

Wer überholt wird, darf seine Geschwindigkeit nicht erhöhen. Der Führer eines langsameren Fahrzeugs muss seine Geschwindigkeit an geeigneter Stelle ermäßigen,notfalls warten, wenn nur so mehreren unmittelbar folgenden Fahrzeugen das Überholen möglich ist. Hierzu können auch geeignete Seitenstreifen in Anspruch genommen werden; das gilt nicht auf Autobahnen.

(7)

Wer seine Absicht, nach links abzubiegen, ankündigt und sich eingeordnet hat, ist rechts zu überholen. Schienenfahrzeuge sind rechts zu überholen. Nur wer das nicht kann, weil die Schienen zu weit rechts liegen, darf links überholen. Auf Fahrbahnen für eine Richtung dürfen Schienenfahrzeuge auch links überholt werden.

(8)

Ist ausreichender Raum vorhanden, dürfen Radfahrer und Mofa-Fahrer Fahrzeuge, die auf dem rechten Fahrstreifen warten, mit mäßiger Geschwindigkeit und besonderer Vorsicht rechts überholen.

Literaturverzeichnis

- Eurocontrol:** 'WGS 84 IMPLEMENTATION MANUAL'. 1998
- ADAC:** 'Crash test mit erhöhter Geschwindigkeit'. <http://www.presse.adac.de>, August 2008 – Pressemeldung
- Ahle, E./Söffker, D.:** 'Entwurf eines Überwachungsautomaten für Überholvorgänge'. In GMA-Kongress 2005: Automation als interdisziplinäre Herausforderung. VDI, 2005, S. 53–60
- ams:** 'Forschungsprojekt an der TU-Darmstadt - Conti Überholassistent'. Auto Motor und Sport, 24 2009, S. 14
- Baró, X. et al.:** 'Traffic Sign Recognition Using Evolutionary Adaboost Detection and Forest-ECOC Classification'. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 10 2009, S. 113–126
- Bender, E. et al.:** 'Antikollisionssystem Proreta - Auf dem Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug'. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Heft 4 2007, S. 336–341
- Bertsekas, D. P.; Floudas, C. A./Pardalos, P. M. (Hrsg.):** Kap. Auction Algorithms In 'Encyclopedia of Optimization, Second Edition'. Springer, 2009, S. 128–132
- Biervague, V.:** 'PREVENT IP MAPS&ADAS D12.1: Final Report'. PREVENT IP, 2008 – Technischer Bericht
- Blackman, S./Popoli, R.:** 'Design and Analysis of Modern Tracking Systems'. Artech, 1999
- Blaschke, C./Schmitt, J./Färber, B.:** 'Fahrmanöverprädiktion über CAN-Bus Daten'. In Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI-Berichte Nr. 2015. 2007, S. 165–177
- Braess, H.-H./Seiffert, U. (Hrsg.):** 'Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik'. 5. Auflage. Friedrich Vieweg und Sohn Verlag, 2007
- Breuer, B./Bill, K. (Hrsg.):** 'Bremsenhandbuch'. 3. Auflage. Friedrich Vieweg und Sohn Verlag, 2003
- Bubb, H.:** 'Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen?'. In **Winner, H./Bruder, R. (Hrsg.):** Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko. 2003
- Chalmers, A. F.:** 'Wege der Wissenschaft'. Springer, 2001
- Clarke, D. D./Ward, P. J./Jones, J.:** 'Overtaking accidents'. Transport Research Laboratory, 1998 – Technischer Bericht

- Crawford, A.:** 'The overtaking driver'. *Ergonomics*, 6 1963, Nr. 2, S. 153–170
- DESTATIS:** 'Verkehrsunfälle 2007'. 2008
- Diemer, R.:** 'Nachrichten aus Brüssel'. 06 2009
- DIN:** 'Straßenfahrzeuge; Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten; Begriffe (ISO 8855:1991, modifiziert)'. 1994
- Düngen, R.:** 'Electronic Horizon'. *Hanser Automotive*, 5-6 2007, S. 82–84
- Donges, A.:** 'Die Bewegung bei konstanter Beschleunigungsleistung'. *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht*, 4/56 2003, S. 211–213
- Donges, Edmund:** 'Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen'. *Automobil-Industrie*, 1982, Nr. 2, S. 183–190
- Drosdol, J./Panik, F.:** 'The Daimler-Benz Driving Simulator, a Tool for Vehicle Development'. *SAE Technical Paper Series 850334* 1985
- Durth, W./Habermehl, K.:** 'Überholvorgänge auf einbahnigen Landstraßen'. Forschungsprogramm des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., November 1986 (489).– Technischer Bericht
- EC:** 'European transport policy for 2010: time to decide'. *European Commission*, 2001
- Ehmans, D. et al.:** 'BMW 7er - Aktive Sicherheit und Fahrerassistenz'. *ATZ extra - Der neue BMW 7er*, 2008, S. 114–119
- Eichler, S./Schroth, C./Eberspächer, J.:** 'Car-To-Car Communication'. In *Proceedings of the VDE Congress - Innovations for Europe*, Aachen. 2006
- Eidehall, A.:** 'Tracking and threat assessment for automotive collision avoidance'. *Dissertation Linköping University*, 2007
- Evans, Leonard:** 'Traffic Safety'. *Science Serving Society*, 2004
- Fastenmeier, W. et al.:** 'Analyse von Spurwechselforgängen im Verkehr'. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 1 2001, S. 15–23
- FGSV:** 'Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L)'. 1995
- FGSV:** 'Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte (RAS-Q)'. 1996
- Gail, J. et al.:** 'Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen'. *Bundesanstalt für Straßenwesen*, 2008 (F 70).– BAST-Bericht
- Gray, R./Regan, D. M.:** 'Perceptual Processes Used by Drivers During Overtaking in a Driving Simulator'. *Human Factors*, 47 2005, Nr. 2, S. 394–417
- Grimm, D. K./Sadakar, V./Popp, P.:** 'A General Motors Perspective on the Deployment of Vehicle to Vehicle Communications based Active Safety and Driver Assistance Applications'. In *Elektronik im Kraftfahrzeug*. Baden-Baden, 2007, S. 871–881

- Groeger, John A.:** 'Understanding Driving'. Psychology Press, 2000
- Hegeman, G.:** 'Overtaking Frequency'. In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Parma. 2004
- Hegeman, G.:** 'Assisted Overtaking'. Dissertation, TU Delft, 2008
- Hegeman, G./Hoogendoorn, S./Brookhuis, K.:** 'Observations Overtaking Maneuvers on Bi-Directional Roads'. In 10th EWGT Meeting, Poznan. 2005
- Hella:** 'Technische Information: Elektronik - Fahrerassistenzsysteme'. Lippstadt: Internet, 2005
- Hoffmann, E. R./Mortimer, R. G.:** 'Scaling of relative velocity between vehicles'. Accident Analysis and Prevention, 28 1996, Nr. 4, S. 415–421
- Horst, R. van der/Hogema, J.:** 'Time-to-collision and collision avoidance systems'. In Proceedings 6th ICTCT Workshop Salzburg. 1993
- IBEO:** 'Seven in one blow: Broschüre Laserscanner „ALASCA XT“; Ibeo Automobile Sensor GmbH'. Internet, 2007
- Isermann, R. et al.:** 'PRORETA - Elektronische Fahrerassistenz zur Vermeidung von Überholunfällen'. In 14. Internationaler Kongress: Elektronik im Kraftfahrzeug 2009, Baden-Baden (VDI-Berichte 2075). 2009
- ISO:** 'ISO 17387: Intelligent transport systems – Lane change decision aid systems (LCDAS) – Performance requirements and test procedures'. 2008
- KBA:** 'Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Januar 2010 nach Segmenten und Modellreihen'. 2010
- Kendall, M/Gibbons, J. D.:** 'Rank Correlation Methods'. 5. Auflage. A Charles Griffin Title, September 1990, ISBN 0195208374
- Kessels, J. T. B. A./Bosch, P. P. J. van den:** 'Electronic Horizon'. In IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2007, S. 581–586
- Kim, J./Elefteriadou, L.:** 'Capacity Estimation for Two-Lane Two-Way Highways Using Simulation'. In Transportation Research Board Annual Meeting 2007. 2007
- Koorey, G.:** 'Passing Opportunities at Slow-Vehicle Bays'. Journal of Transportation Engineering, 133 (2) 2007, S. 129–137
- Kosch, T.:** 'Den Horizont der Fahrerassistenz erweitern: Vorausschauende Systeme durch Ad-hoc Vernetzung'. In 1. Konferenz Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching. 2006
- Kramer, F.:** 'Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen'. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008

- Kretzschmer, M. et al.:** 'Erkennung und Prädiktion des Fahrerverhaltens während eines Überholvorgangs'. In Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme. München, 2006
- Lange, L.:** 'Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades'. Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2008
- Lattke, B.:** 'Objektverfolgung in Gegenverkehrsszenarien für ein Advanced Driver Assistance System (ADAS) zur Vermeidung von Überholunfällen'. Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt - Fachgebiet Fahrzeugtechnik, 2007
- Leutzbach, W./Papavasiliou, V.:** 'Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Wahrnehmung in konkreten Verkehrssituationen'. Bericht zum Forschungsprojekt 8306 der Bundesanstalt für Straßenwesen, 1988 – Technischer Bericht
- Lüke, S./Komar, M./Strauss, M.:** 'Reduced Stopping Distance by Radar-Vision Fusion'. In AMAA. 2007
- Löwenau, J. et al.:** 'Dynamic Pass Prediction - A New Driver Assistance System for Superior and Safe Overtaking'. In AMAA Advanced Microsystems for Automotive Applications. 2006, S. 67–77
- Mann, H. B./Whitney, D. R.:** 'On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other'. The Annals of Mathematical Statistics, 18 1947, Nr. 1, S. 50–60
- Maurer, M./Stiller, C. (Hrsg.):** 'Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung'. Berlin: Springer, 2005
- Minderhoud, M./Bovy, P. H. L.:** 'Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment'. Accident Analysis and Prevention, 33 2001, S. 89–97
- Narbe, B. et al.:** 'Datennetzkonzepte für die Sensordatenfusion'. Elektronik Automotive, 4/5 2003, S. 40–44 / S. 54–59
- Nöcker, G./Metzger, K./Kerner, B.:** 'Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme'. Internet, 2005
- Netzer, M.:** 'Der Überholvorgang auf Landstraßen unter Berücksichtigung der Verkehrssicherheit'. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 1966, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 50
- NMEA:** 'NMEA 0183 Version 4.00'. November 2008
- Noy, Y. Ian/Karwowski, W. (Hrsg.):** 'Handbook of Human Factors in Litigation'. CRC Press, 2005
- OECD:** 'Safety strategies for rural roads'. 1999

- Oestereich, B.:** 'Objektorientierte Softwareentwicklung. Analyse und Design mit UML 2.1'. 2006
- Opel:** 'Media Information Opel Astra 2009'. Internet, September 2009
- Otte, D.:** 'bast: Charakteristika von Unfällen auf Landstraßen'. Band M122, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. 2000
- Otten, N./Habermehl, K.:** 'Vergleich der Ergebnisse von Feld- und Simulatorexperimenten zum Überholverhalten von Kraftfahrern'. Bundesanstalt für Straßenwesen, 1989 (8527/8). – Forschungsbericht
- Persaud, B.N./Retting, R.A./Lyon, C.A.:** 'Crash reduction following installation of centerline rumble strips on rural two-lane roads'. Accident Analysis & Prevention, 36 (6) 2004, S. 1073–1079
- Popken, M.:** 'Audi Q7 - side assist'. hanser automotive, 7-8 2006, S. 54–56
- Rudinger, G.:** 'Demographischer Wandel'. In 7. ADAC/BAST-Symposium Sicher fahren in Europa. 2009
- Schimmelpfennig, K.-H./Nackenhurst, U.:** 'Bedeutung der Querschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion - Sicherheitsgrenze des Normalfahrers'. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 4 1985, S. 94–96
- Schittenhelm, H.:** 'Design of Effective Collision Mitigation Systems and Prediction of Their Statistical Efficiency to Avoid or Mitigate Real World Accidents'. In FISITA World Automotive Congress. 2008
- Schmitt, K./Habenicht, S./Isermann, R.:** 'Odometrie und Manövererkennung für ein Fahrerassistenzsystem für Überholsituationen'. In 1. Automobiltechnisches Kolloquium München. 2009
- Schraut, M.:** 'Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen'. Dissertation, Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme der Technischen Universität München, 2000
- Schulze, M. et al.:** 'IP Deliverable D15: Final Report'. PREVENT IP, 2008 – Technischer Bericht
- Skutek, M.:** 'Ein PreCrash-System auf Basis multisensorieller Umgebungserfassung'. Dissertation, TU Chemnitz, Chemnitz, 2006
- Steierwald, G.:** 'Die erforderliche Überholsichtweite als fahrdynamisches Problem'. Straßenverkehrstechnik, 6 1963, S. 237
- Stüker, D.:** 'Heterogene Sensordatenfusion zur robusten Objektverfolgung im automobilen Straßenverkehr'. Dissertation, Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg, 2004
- Tapio, J.:** 'Ohitukset kaksikaistaisilla teilla (Summary in english)'. Finnish Road Administration, 2003 – Technischer Bericht

- Todosiev, E. P.:** 'The Action point model of the driver-vehicle system'. Dissertation, The Ohio State University - Engineering Experiment Station, 1963
- Trimmel, M.:** 'Wissenschaftliches Arbeiten in Psychologie und Medizin'. UTB, 2009
- Welch, G./Bishop, G.:** 'An Introduction to the Kalman Filter'. 2006
- Winner, H.:** 'Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC'. Bosch, 2002
- Winner, H.:** 'Mit aktiven Sensoren das Kfz-Umfeld erfassen - Funktion und Leistungsfähigkeit von Radar & Co'. it - Information Technology, 01/2007 2007, Nr. 1, S. 17-25
- Winner, H./Hakuli, S./Wolf, G. (Hrsg.):** 'Handbuch Fahrerassistenzsysteme'. 2009
- Wintermantel, M. et al.:** 'Ein neuartiges Fernbereichsradar und dessen Anwendung zur Lenkunterstützung in Ausweichsituationen'. In Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel. Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig e.V. (GZVB) 2009, S. 168-188
- Zanten, A. T. van/Erhardt, R./Pfaff, G.:** 'ESP - Die Fahrdynamikregelung von Bosch'. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) 96 1994, Nr. 11

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Andree Hohm
Geburtsdatum: 26. Dezember 1977
Geburtsort: Obernburg am Main
Staatsangehörigkeit: deutsch

Berufsausbildung

1995 – 1998 Berufsausbildung (IHK) zum Prozessleitelektroniker
Akzo-Nobel AG (Chemische Industrie)

Abitur

1998 – 2000 Staatliche Fachoberschule und Berufsoberschule Aschaffenburg
Abschluß: Allgemeine Hochschulreife

Studium

2000 – 2006 Technische Universität Darmstadt (TUD)
Studium der Elektro- und Informationstechnik
Thema der Diplomarbeit: „Objekthypothesenmanagement
im Rahmen der Sensordatenfusion von Umfeldsensoren
in einem Fahrerassistenzsystem“
Abschluß: Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Berufstätigkeit

2006 – 2010 Technische Universität Darmstadt
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet
Fahrzeugtechnik bei Prof. Hermann Winner