

Lidarbasierte Fahrstreifenzuordnung von Objekten für eine Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

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

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Alexander von Reyher

aus Hamburg

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

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. C. Tropea

Tag der Einreichung: 11.07.2006

Tag der mündlichen Prüfung: 01.11.2006

Darmstadt 2006

D17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Doktorandentätigkeit in der Fahrzeugforschung der DaimlerChrysler AG in Stuttgart (Abteilung Assistenzsysteme (REI/AA)) und wurde an der Technischen Universität Darmstadt als Dissertation eingereicht.

Mein ganz besonderer Dank gilt dem Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, der mir durch seine wissenschaftliche Anleitung wertvolle Anregungen gab und über die Jahre stets die Weiterentwicklung meiner Persönlichkeit förderte. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea für die Übernahme des Koreferats danken.

Ausdrücklich bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Abteilung REI/AA der DaimlerChrysler AG und ihrem Leiter Herrn Dr.-Ing. Claus Ehlers. Herrn Lorenz Schäfers danke ich für die Betreuung von Seiten der DaimlerChrysler AG und die regelmäßige Begleitung zu meinen Seminaren an der TU Darmstadt. Namentlich danke ich meinen Kollegen Dr.-Ing. Andreas Spieker, Armin Joos, Uli Kolbe, Markus Raab, Svetlana Rau, Dr.-Ing. Alexander Schanz, Dr.-Ing. Zoltan Zomotor, Dr. rer. nat. Ismail Dagli und Dr.-Ing. Gabi Breuel sowie den von mir betreuten Studenten für ihre Anregungen und ihre Unterstützung.

Der Firma Denso sei an dieser Stelle Dank ausgesprochen für die materielle Unterstützung der Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, ohne die diese Arbeit nicht entstanden wäre, sowie meinen Brüdern, die mir durch ihren humorvollen Beistand nicht nur die Promotionszeit sehr erleichtert haben. Vor allem auch meine Freundin Daniela Diehl war mir eine unersetzliche moralische sowie tatkräftige Unterstützung, wofür ich ihr sehr dankbar bin.

Stuttgart, im Juli 2006

Alexander von Reyher

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Methodik	2
1.3	Stand der Forschung	4
1.3.1	Sensorbasierte Umgebungserfassung	4
1.3.2	Grundlegender Aufbau heutiger ACC-Systeme	10
1.3.3	Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr	17
1.4	Fazit	21
2	Aufbau des Gesamtsystems	24
2.1	Anforderungen an die Sensorik	24
2.1.1	Horizontaler Erfassungsbereich	24
2.1.2	Vertikaler Erfassungsbereich	27
2.2	Systemintegration im Versuchsträger	28
2.2.1	Sensorkonstellation	28
2.2.2	Gesamtsystem	30
2.3	Fazit	32
3	Lidarbasierte Markierungsdetektion	33
3.1	Reflexionseigenschaften einer Fahrbahnmarkierung	33
3.2	Messung mit einem fahrbahnorientierten Laserstrahl	36
3.2.1	Einfluss der Sensorposition und der Markierungsbeschaffenheit	36
3.2.2	Einfluss der Sensorwahl	40
3.2.3	Theoretische Betrachtungen zur Messgenauigkeit	44
3.3	Detektion und Interpretation einer Markierung	47
3.3.1	Gradientenbasierte Kantendetektion	47
3.3.2	Interpretation eines Markierungsmaximums	53
3.4	Verfügbarkeit der Markierungsdetektion	55
3.4.1	Trockene Fahrbahn	57
3.4.2	Nasse Fahrbahn	61
3.5	Fazit	64

4	Schätzung des Fahrstreifenverlaufs	66
4.1	Fahrstreifenmodell	66
4.1.1	Kreismodell	67
4.1.2	Dynamisches Kreismodell	70
4.1.3	Einflüsse durch die Fahrbahnneigung	71
4.2	Fahrstreifenschätzung	73
4.2.1	Modellbasierte Zustandsschätzung	73
4.2.2	Auswahl relevanter Markierungspositionen	76
4.2.3	Verwendung paralleler Filter	78
4.3	Bewertung	81
4.3.1	Methodik	81
4.3.2	Ergebnisse	83
4.4	Fazit	87
5	Fahrstreifenzuordnung im Stop&Go-Verkehr	88
5.1	Datenerhebung im Stop&Go-Verkehr	88
5.1.1	Durchführung	88
5.1.2	Vorverarbeitung der Daten	89
5.1.3	Zwischenergebnisse	92
5.2	Fahrstreifenzuordnung	93
5.2.1	Systemausprägungen	93
5.2.2	Ergebnisse	95
5.3	Fahrstreifenzuordnung versus herkömmliche Zielauswahl	97
5.3.1	Aufbau des Referenzsystems	98
5.3.2	Parametrierung des Referenzsystems	100
5.3.3	Systemvergleich	103
5.4	Fazit	104
6	Diskussion der Ergebnisse	106
6.1	Objektivität, Reliabilität und Validität	106
6.2	Empfehlungen zur Weiterentwicklung	107
6.3	Fazit	108
7	Zusammenfassung und Ausblick	110
	Anhang	113
A.1	Koordinatensysteme	113
A.2	Vereinfachung der Messgleichung	114
A.3	Bewertung der Fahrstreifenschätzung	116
	Literatur	119

Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

Die nachfolgende Auflistung enthält nur solche Symbole, die in der Arbeit durchgängig verwendet werden. In lokalem Zusammenhang eingeführte Zeichen sind nicht aufgeführt.

Abkürzungen

ESP	Elektronisches Stabilitäts-Programm
FSZ	Fahrstreifenzuordnung
GPS	Global Positioning System
LDW	Lane Departure Warning
Lkw	Lastkraftwagen
max	Maximal
min	Minimal
Pkw	Personenkraftwagen

Formelzeichen

A	[m]	Klothoidenparameter
I	[-]	Rückstrahlintensität
N	[-]	Anzahl
R	[m]	Radius
Δ	[-]	Differenz
a	[m/s ²]	Beschleunigung
b	[m]	Breite
c	[m ⁻¹]	Krümmung
d	[m]	Distanz
e	[m]	Fehler
f	[Hz]	Frequenz
l	[m]	Länge
t	[s]	Zeit

v	[km/h]	Geschwindigkeit
x, y, z	[m]	Kartesische Koordinaten
α_S	[°]	Horizontaler Austrittswinkel des Laserstrahls
β_S	[°]	Vertikaler Austrittswinkel des Laserstrahls
δ	[°]	Lenkwinkel
ψ	[°]	Gierwinkel
τ	[s]	Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen
κ	[°]	Auftreffwinkel zwischen Laserstrahl und Reflexionsfläche

Indizes

F	Fahrzeug
FS	Fahrstreifen
M	Markierung
NS	Nebenspurstörung
O	Objekt
OV	Objektverlust
S	Sensor
SK	Sensorkonstellation
W	Wunsch
i, j, k	Komponenten- und Zählindizes
ref	Referenz
ges	Gesamt
off	Offset

Begriffsdefinitionen

In dieser Arbeit werden nicht genormte oder im täglichen Gebrauch mehrfach belegte Begriffe verwendet, die im Folgenden definiert werden. Die verwendeten Koordinatensysteme sind im Anhang in Kapitel A.1 beschrieben.

Stop&Go-Verkehr

Durch gebundenes Anhalten und Anfahren¹ geprägter Verkehr im Geschwindigkeitsbereich zwischen 0 und 50 km/h.

Innenkante der Markierung

Die dem Betrachter zugewandte Kante einer Markierung.

Aussenkante der Markierung

Die dem Betrachter abgewandte Kante einer Markierung.

Fahrstreifen

Durch die Aussenkanten einer rechten und einer linken Markierung begrenzter Bereich der Fahrbahn.

Fahrschlauch

Prädizierter Bewegungskorridor eines Fahrzeugs bis in ca. 150 m Entfernung.

Ego-Fahrzeug²

Fahrzeug, aus dessen Sicht die Umgebung beschrieben wird.

Nicht relevantes Objekt

Ein Objekt, das sich außerhalb des Fahrschlauchs des Ego-Fahrzeugs aufhält.

Potentiell relevantes Objekt

Ein Objekt, das sich innerhalb des Fahrschlauchs des Ego-Fahrzeugs aufhält.

¹MoTiV – Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr: Abschlussbericht MoTiV, 2000, S. 9

²Für ACC-Systeme wird auch der Begriff ACC-Fahrzeug verwendet.

Relevantes Objekt oder Führungsfahrzeug

Das potentiell relevante Objekt, das für die Längsregelung verwendet wird.

Einscherer

Ein Objekt, das aus einem der benachbarten Fahrstreifen auf den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs wechselt.

Auscherer

Ein Objekt, das aus dem Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs auf einen der benachbarten Fahrstreifen wechselt.

Nebenspurstörung

Interpretation eines nicht relevanten Objekts als potentiell relevant bzw. relevant.

Objektverlust

Interpretation eines relevanten Objekts als nicht relevant, obwohl es in den vorangehenden Zeitschritten richtig als relevant eingestuft wurde.

Zielauswahl oder Objektauswahl

Auswahl des relevanten Objekts (in aktuellen Abstandsregelsystemen in der Regel unter Nutzung eines Fahrschlauchs).

Fahrstreifenzuordnung³

Zuordnung eines Objekts zu einem Fahrstreifen.

Fahrstreifenwechsel

Wechsel des Ego-Fahrzeugs oder eines Objekts von dem aktuell befahrenen Fahrstreifen auf einen benachbarten Fahrstreifen.

Markierungsmaximum

Durch eine Markierung hervorgerufenen, lokales Maximum im Intensitätsverlauf einer Messebene eines Lidarsensors.

³Die Fahrstreifenzuordnung unterscheidet sich von einer Zuordnung zum Fahrschlauch durch die zusätzliche Kenntnis des Fahrstreifenverlaufs.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Thema Mobilität bildet den Schwerpunkt einer Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten. Viele technische Entwicklungen der Vergangenheit entstanden aus dem Wunsch des Menschen, sich sowohl schnell als auch bequem von einem Ort zu einem anderen bewegen zu können. Als wichtigstes Transportmittel der heutigen Zeit ist in diesem Zusammenhang das Automobil zu nennen. Es bietet dem Nutzer eine bequeme und dabei trotzdem individuelle Möglichkeit sich fortzubewegen und Güter zu transportieren. Diese Eigenschaften haben unter anderem dazu geführt, dass im Jahre 2002 auf 1000 deutsche Erwachsene allein 630 Pkw zugelassen waren und für das Jahr 2020 mit einem weiteren Zuwachs auf 750 Pkw gerechnet wird¹. Prognosen² gehen davon aus, dass der Personenverkehr bis 2015 um weitere 20 % steigt, der Güterverkehr sogar um 64 % (Basisjahr 1997). Als Folge ist mit einem weiteren Anstieg von Verkehrsproblemen in Form von Staus zu rechnen. Schon heute verbringt der durchschnittliche Autofahrer 45 % seiner Fahrtzeit³ im Geschwindigkeitsbereich unterhalb von 50 km/h. Während dieser Zeit ist der Fahrer in erster Linie mit dem gebundenen Anhalten und Anfahren hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug beschäftigt, was er in der Regel als lästig und unbequem empfindet. Ein Assistenzsystem, das den Fahrer in diesen Stausituationen unterstützt, verspricht daher eine deutliche Steigerung des Reisekomforts⁴. Bereits seit dem Jahr 2004 sind Abstandsregelsysteme von Toyota⁵ und Nissan⁶ auf dem japanischen Markt erhältlich. Seit September 2005 bietet die DaimlerChrysler AG auch für den europäischen Markt in ihrer S-Klasse das Abstandsregelsystem „DistronicPlus“ für den Stauverkehr an⁷, Audi führte im Jahr 2006 einen Stauassistenten⁸ in seinem Q7 ein. Alle diese Systeme stellen eine konsequente Weiterentwicklung herkömmlicher ACC-Systeme (**A**daptive **C**ruise **C**ontrol) dar, die den Fahrer bislang bei der Abstandsregelung im Geschwindigkeitsbereich oberhalb von ca. 30 km/h unterstützten. Der Detektionsbereich eines ACC, der in erster Linie auf den eigenen Fahrstreifen optimiert ist, wurde im Zuge dieser Entwicklung auf den Stauverkehr angepasst.

¹Nahverkehrsgesellschaft Baden Württemberg mbH: Blickpunkt Mobilität – Entwicklung, 2006, S. 3

²Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Verkehrsbericht 2000, 2000, S. 6

³Invent: Teilprojekt Stauassistent STA, 2006, S. 4

⁴Weilkes, Baum, Hummel, Sauerbrey: Stauassistent, 2002, S. 337

⁵Toyota: Toyota Radar Cruise Control, 2006, S. 1

⁶Nissan: Nissan Sedan, 2006, S. 1

⁷DaimlerChrysler AG: Betriebsanleitung S-Klasse, 2005, S. 306

⁸Wolkenstein: Der Audi Q7, 2005, S. 967

Analog zum Aufbau der meisten ACC-Systeme stehen den Abstandsregelsystemen für den Stauverkehr allerdings keine Informationen über Position und Verlauf des Fahrstreifens zur Verfügung. Sie wählen das regelungsrelevante Objekt auf Basis einer zeitlichen Prädiktion der eigenen Fahrzeugbewegung. Ein- oder ausscherende Fahrzeuge werden bei dieser Form der Zielauswahl in manchen Fällen erst sehr spät als solche erkannt⁹, stark versetzt fahrende Fahrzeuge teilweise dem falschen Fahrstreifen zugeordnet. In den geschilderten Situationen kann es zu einer Reaktion der Abstandsregelung kommen, die vom Fahrer so nicht erwartet wird. Das System reagiert auf ein Fahrzeug, das für den Fahrer nicht relevant ist, und erzwingt dadurch im schlimmsten Fall einen Eingriff durch den Fahrer. Wie Untersuchungen von ACC-Systemen bereits belegen, empfindet der Kunde solche Situationen im Vergleich zu anderen Übernahmesituationen als gefährlicher¹⁰ und als unkomfortabel¹¹.

Die Verbesserung der Zielauswahl und eine damit verbundene Komfortsteigerung und erhöhte Kundenakzeptanz ist wichtiger Bestandteil aktueller Entwicklungsbemühungen. Dabei sind die zwei vorherrschenden Herausforderungen bei der Weiterentwicklung heutiger Fahrerassistenzsysteme die Erhöhung des Kundennutzens und die Reduktion der Kosten¹². Zwei Zielsetzungen, die in vielen Fällen gegensätzlich sind. So kann die Zielauswahl durch eine zusätzliche Kamera zur Fahrstreifendetektion zwar möglicherweise verbessert werden, dem so erhöhten Kundennutzen steht jedoch ein Anstieg der Systemkosten entgegen. Eine kostengünstigere Möglichkeit zur funktionalen Erweiterung ist die Verwendung eines einzelnen Sensors, der in der Lage ist, sowohl andere Fahrzeuge als auch den Fahrstreifenverlauf zu detektieren. Prinzipbedingt kommen für diese Aufgabe sowohl eine Kamera als auch ein Lidarsensor in Betracht. Die Kamera wird bereits als Seriensensor zur Detektion des Fahrstreifens eingesetzt^{13,14}, findet jedoch als Einzelsensor bislang keine Anwendung für eine Objektdetektion. Im Gegensatz dazu werden Lidarsensoren vor allem in Japan zur Objektdetektion in Abstandsregelsystemen verwendet¹⁵. Ihre Fähigkeit hingegen, den Fahrstreifenverlauf vor dem Fahrzeug zu detektieren, ist bislang wenig untersucht. Sie würde jedoch eine Erhöhung des Systemnutzens versprechen, ohne dabei eine Neuentwicklung der bereits vorhandenen Funktionalität zu erfordern.

1.2 Zielsetzung und Methodik

Zentrale Fragestellung der vorgelegten Arbeit ist eine Analyse der Möglichkeiten und Grenzen von Lidarsensorik zur kombinierten Objekt- und Fahrstreifendetektion. Als Anwendung dieser Form der Umgebungserfassung wird eine Abstandsregelung für den Stop&Go-Verkehr

⁹Filzek: Abstandsverhalten auf Autobahnen, 2002, S. 69

¹⁰Weinberger: ACC-Einfluß auf das Fahrverhalten, 2001, S. 134

¹¹Dorißen, Höver: Autonome Intelligente Geschwindigkeitsregelung (AICC), 1996, S. 9

¹²Bishop: Technology and Trends, 2005, S. 93

¹³Mercedes-Benz: Telligent Spurassistent, 2006, S. 1

¹⁴Honda: Honda LKAS, 2006, S. 1

¹⁵Nissan: Nissan Sedan, 2006, S. 1

betrachtet, deren Nutzung auf Bundesstraßen und Autobahnen beschränkt bleibt. Zur Bewertung der lidarbasierten Fahrstreifeninformation wird die These untersucht, dass durch sie ein- und ausscherende Fahrzeuge früher als mit herkömmlichen Methoden der Zielauswahl detektiert werden können, ohne dass dabei die Anzahl der Fehldetektionen erhöht wird. Die Methodik der vorgelegten Arbeit ist in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt.

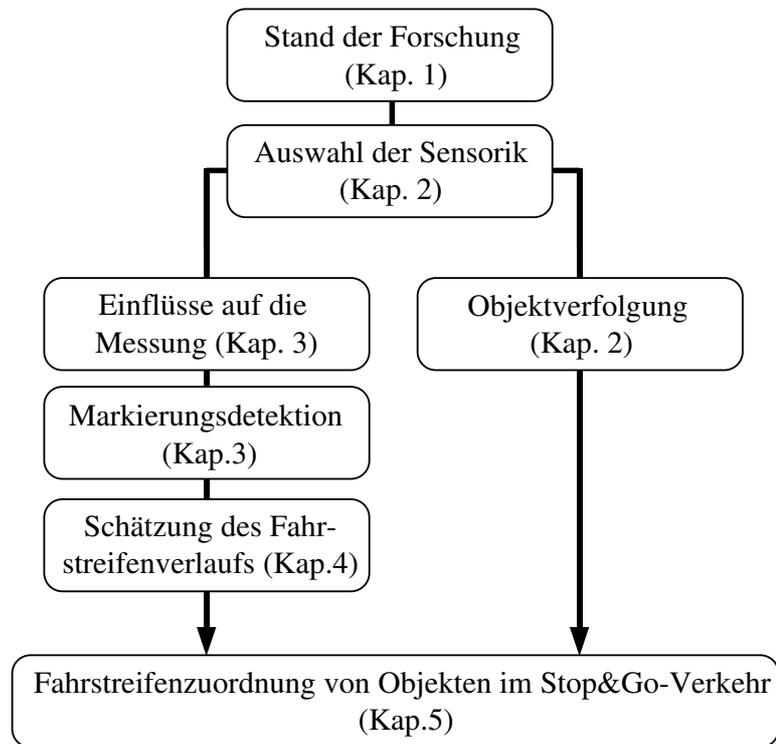


Abbildung 1.1: Methodischer Aufbau der Arbeit

Nach einem Überblick über den Stand der Forschung in Kapitel 1 wird in Kapitel 2 auf Basis der Anforderungen, die die Zielanwendung an die Sensorik stellt, die Auswahl der Sensorik-Konstellation vorgestellt sowie der Aufbau des Versuchsträgers beschrieben. Eine Objekterkennung ist notwendig für die spätere Nutzenbewertung der entwickelten Fahrstreifenzuordnung. Ihre Optimierung oder Weiterentwicklung war jedoch nicht Aufgabe dieser Arbeit. Aus diesem Grund wird sie nur kurz in Kapitel 2 angerissen. Im Vergleich zu der bisherigen Anwendung von Lidarsensorik zur Objektdetektion sind im vorliegenden Fall einer fahrbahnorientierten Messung veränderte Einflüsse auf die Reichweite und Genauigkeit der Messung zu erwarten. In Kapitel 3 wird zunächst auf diese Einflüsse eingegangen, bevor anschließend ein Verfahren beschrieben wird, mit dessen Hilfe die Markierung in der Messung eines Lidarsensors detektiert und interpretiert werden kann. Abschließend werden Untersuchungen zur Verfügbarkeit der entwickelten Markierungsdetektion durchgeführt. Ist die Position der Markierung an mehreren Stellen auf der Fahrbahn bekannt, so kann darauf aufbauend der Fahrstreifenverlauf bestimmt werden. Kapitel 4 beschreibt die Auswahl des dazu verwendeten Filterverfahrens, die Herleitung der Filtergleichungen sowie eine Bewertung der erzielten Ergebnisse. Das fünfte Kapitel befasst sich mit der Entwicklung einer Fahrstreifenzuordnung,

die die detektierten Objekte sowie den Fahrstreifenverlauf kombiniert. Mit dem Ziel, die zu Beginn dieses Kapitels angeführte These zu erhärten, wird eine vergleichende Bewertung der entwickelten Fahrstreifenzuordnung mit einer herkömmlichen Zielauswahl im Stop&Go-Verkehr durchgeführt.

1.3 Stand der Forschung

In der vorgelegten Arbeit wird durch zusätzliche Kenntnis des Fahrstreifenverlaufs versucht, die Zielauswahl von Abstandsregelsystemen für den Stop&Go-Verkehr zu verbessern. Die Vorgehensweise bei einer solchen Zielauswahl ist nur wenig dokumentiert, leitet sich jedoch aus den Methoden ab, die schon bei ACC-Systemen eingesetzt werden. Bei der Auswahl des Ziels sind insbesondere die Eigenschaften der umgebungserfassenden Sensorik zu berücksichtigen. Im Folgenden wird daher zunächst ein Überblick über die sensorbasierte Umgebungserfassung gegeben, bevor anschließend der grundlegende Aufbau heutiger ACC-Systeme mit einem Schwerpunkt auf der Zielauswahl diskutiert wird. Am Ende des Kapitels wird auf die bislang wichtigsten Schritte in der Weiterentwicklung des ACC auf den Stop&Go-Verkehr eingegangen.

1.3.1 Sensorbasierte Umgebungserfassung

Für die vorgelegte Arbeit sind drei Sensoren relevant: Radar-, Lidar- und Videosensor. Es wird kurz auf ihre charakteristischen Eigenschaften sowie ihre Anwendungsgebiete eingegangen.

Radar (Radio detection and ranging)

Ein Großteil aktueller Abstandsregelsysteme verwendet Radarsensoren für die Objekterkennung^{16,17}. Diese Sensoren senden eine elektromagnetische Welle mit einer Trägerfrequenz von typischerweise 76,5 GHz aus. Die direkte oder indirekte¹⁸ Messung der Signallaufzeit t ermöglicht die Ermittlung der Distanz zu einem reflektierenden Objekt. Alle elektrisch leitfähigen Materialien sowie alle Materialien mit einer hohen Dielektrizität reflektieren das Radarsignal. Dadurch können nahezu alle Verkehrsteilnehmer detektiert werden. Allerdings werden auch Gullideckel oder auf der Straße liegende Blechdosen erfasst. Um Fehlreaktionen auf solche „Scheinobjekte“ auszuschließen, werden stehende Ziele in ACC-Systemen heutiger Prägung nicht als Zielobjekte verwendet. Die Bewegung eines Objekts relativ zur Radar-Antenne bewirkt aufgrund des Doppler-Effekts eine Frequenzverschiebung des Signalechos. Durch Messung der Frequenzverschiebung kann auf direktem Weg die Relativgeschwindigkeit gewonnen werden. Dies ermöglicht eine schnelle Klassifikation stehender Objekte und bietet

¹⁶Winner: Adaptive Cruise Control, 1999, S. 22–23

¹⁷Frost & Sullivan: Fahrerassistenzsysteme, 2006, S. 1

¹⁸Gebräuchliche Verfahren sind FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) oder Pulsmodulation.

zudem den Vorteil, frühzeitig dynamische Geschwindigkeitsänderungen eines Objekts zu detektieren. Aufgrund der großen Wellenlänge des Signals hat die Radarsensorik im Vergleich zu optischen Verfahren¹⁹ Vorteile unter ungünstigen Wetterbedingungen (z.B. Nebel).

Die üblichen Detektionsbereiche heutiger Radarsensoren liegen im Bereich von $\pm 4^\circ$ bis $\pm 8^\circ$, sie weisen damit vor allem im Nahbereich eine starke Fokussierung der Detektion auf den eigenen Fahrstreifen auf. Eine Großzahl der Sensoren arbeitet mit einer geringen Anzahl fester Keulen relativ hoher Halbwertsbreite²⁰ im Bereich oberhalb von 2° . Erst die gemeinsame Auswertung der einzelnen Keulen ermöglicht eine genauere Bestimmung des Winkels unter dem sich das reflektierende Objekt befindet. Deswegen sind, im Vergleich zu anderen Sensoren, die schlechte Trennbarkeit unterschiedlicher Ziele und die fehlende Kenntnis der effektiven Reflexionspunkte Nachteile, die in einer mangelhaften Kenntnis des Winkels resultieren. Scannende Sensoren haben diesbezüglich Vorteile. Schneider²¹ stellt ein mechanisch scannendes Radar vor, das mit einer Strahlbreite von einem Grad sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung scannt. Die aufgrund der schmalen Keulen breitere Apertur führt jedoch zu einem deutlich höheren Bauvolumen²². Dies und die niedrige Scanfrequenz verhindern zur Zeit noch eine Anwendung in Serie. Zukünftige Technologien elektronisch geschalteter Richtungselemente könnten diese Probleme allerdings schnell lösen²³.

Zur Aufweitung des Sensorsichtbereichs ist seit 2005 der Frequenzbereich von 24 GHz für die Nutzung im Automobil zugelassen. Diese bislang vorläufige Zulassung endet im Jahr 2012. Aufgrund der im Vergleich zur 77 GHz-Technik geringeren Kosten ist es unter Hinzunahme der 24 GHz -Technik wirtschaftlich rentabel mehrere Sensoren zu verbauen, die den gesamten Bereich vor dem Fahrzeug bis zu einer Entfernung von ca. 30 m abdecken. Erste Anwendung auf dem europäischen Markt finden diese Sensoren seit September 2005 mit der „Distro-nicPlus“ der DaimlerChrysler AG. Audi bietet in seinem Q7 seit dem Frühjahr 2006 einen Spurwechselassistenten auf Basis von 24 GHz-Sensorik an.

Fahrstreifenmarkierungen reflektieren das Radarsignal ähnlich wie normaler Fahrbahnbelag und können deswegen nicht erfasst werden. Durch Detektion der Fahrbahnberandung²⁴ oder des Bürgersteigs^{25,26} lässt sich allerdings zeitweise der Verlauf der Fahrbahn schätzen.

¹⁹Robert Bosch GmbH: ACC, 2002, S. 7

²⁰Winner: Adaptive Cruise Control, 1999, S. 23

²¹Schneider, Wanielik, Wenger: Millimeter-Wave Imaging, 1996, S. 1

²²Winner: Adaptive Cruise Control, 1999, S. 20

²³Winner: ACC-Entwicklung, 2003, S. 3–4

²⁴Meis, Schneider: Bildgebendes Kfz-Radar, 2004, S. 1ff

²⁵Lakshmanan, Kaliyaperumal, Kluge: LEXLUTHER, 1998, S. 1ff

²⁶Ma, Lakshmanan, Hero: Pavement Boundary Detection, 2000, S. 1ff

Lidar (Light detection and ranging)

Lidarsensoren werden zur Zeit ausschließlich von japanischen Fahrzeugherstellern als Sensorik für ein Abstandsregelsystem verwendet (z. B. Nissan²⁷). Ähnlich manchen Radarsensoren nutzen sie das Prinzip der Pulslaufzeitmessung. Dabei sendet eine Laserdiode einen Lichtimpuls im Wellenlängenbereich zwischen 800 und 950 nm aus und eine Photodiode empfängt das an einem Objekt reflektierte Signal. Auf Basis der gemessenen Signallaufzeit t wird die Objektentfernung bestimmt. Auch für den Lidarsensor ist eine Doppler-Auswertung zwar prinzipiell denkbar, jedoch im Automobil noch nicht wirtschaftlich darstellbar²⁸. Geschwindigkeit und Beschleunigung werden durch Ableiten der Distanz über der Zeit ermittelt, weshalb lidar-basierte Abstandsregelsysteme in der Regel langsam auf Geschwindigkeitsänderungen des vorausfahrenden Objekts reagieren. Durch die im Vergleich zum Radar höhere Anzahl an Strahlen und die geringere Strahldivergenz lässt sich aus den Messungen eines Lidarsensors die Breite des vorausfahrenden Objekts extrahieren. Dies bietet sowohl bei der Klassifikation als auch bei der Zielauswahl Vorteile. Die atmosphärische Dämpfung des Lasers ist höher als bei Radarsensorik, ein Effekt der unter anderem zur Bestimmung der Sichtweite verwendet wird²⁹. Die dadurch sinkende Detektionsleistung bei schlechtem Wetter führte bei den üblicherweise hohen Reisegeschwindigkeiten in Europa jedoch bisher dazu, dass sich die Lidarsensorik auf dem europäischen Markt gegenüber der Radar-Technologie nicht durchsetzen konnte. Unter normalen Wetterverhältnissen lässt sich allerdings kein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Sensoren feststellen³⁰.

In Analogie zur Radarsensorik können Lidarsensoren als sogenannte Feststrahler verwendet werden, die mit mehreren, fest ausgerichteten Strahlen arbeiten³¹. Hinsichtlich des Erfassungsbereiches stoßen diese Sensoren jedoch an eine natürliche Kostengrenze, weil jeder zusätzliche Strahl weitere Hardware bedeutet. Dieses Problem lässt sich teilweise umgehen, indem das gesamte Strahlbündel in Abhängigkeit von der aktuellen Fahrsituation geschwenkt wird (Multibeam Sweep). Ein auf Geradeausfahrt optimierter Erfassungsbereich kann so bei Bedarf in die Kurve hinein gedreht werden. Der dadurch reduzierte Rechen- und Speicheraufwand geht mit einer starken Abhängigkeit von der Ermittlung der Bewegungsrichtung einher. In heutigen Sensormodellen wird dieses Verfahren deswegen nicht mehr verwendet. Aktuelle Seriensysteme basieren ausschließlich auf scannenden Sensoren. Dabei wird beim Scanvorgang der Strahl über eine bewegliche Optik wie z. B. einen rotierenden Spiegel^{32,33} abgelenkt. Scannende Sensoren ermöglichen große Erfassungsbereiche ohne dabei den Hardware-Aufwand deutlich zu steigern. Die horizontalen Öffnungswinkel heutiger Sensoren liegen mit bis zu 240° deutlich höher als die eines Radarsensors. Auch vertikal scannen Lidarsensoren in

²⁷Nissan: Nissan Sedan, 2006, S. 1

²⁸Winner: Skriptum Fahrerassistenzsysteme, 2005, S. 315

²⁹Winner: Skriptum Fahrerassistenzsysteme, 2005, S. 326

³⁰Widmann, Daniels: Lidar vs. Radar, 2000, S. 21-22

³¹Hella KG Hueck & Co.: Idis, 2004, S. 2

³²Lages: Laser Sensor Technologies, 2004, S. 11

³³Denso Corporation: Denso WA-C01, 2003, S. 1

der Regel in mehreren Ebenen. Dadurch kann Objektverlusten, wie sie z. B. beim Einnicken des Fahrzeugs auftreten können, vorgebeugt werden. Aufgrund der hohen Strahlbündelung tritt bei scannenden Sensoren allerdings schon bei kleineren Verschmutzungen ein erheblicher Verlust der Erkennungsleistung auf³⁴.

Die Rückstrahlintensität I des Signals, das in der Photodiode gemessen wird, hängt sowohl von der Oberflächenbeschaffenheit als auch von der Entfernung des reflektierenden Objekts ab³⁵. So sinkt die empfangene Rückstrahlintensität bei einem Fahrzeug, dessen Reflektoren und dessen Nummernschild durch Schmutz komplett bedeckt sind, stark ab. Eine Erhöhung der Sendeleistung schafft hier nur bedingt Abhilfe, weil diese durch die Forderung nach Augensicherheit in Abhängigkeit von der Wellenlänge nach IEC 60825-1 begrenzt ist.

Die geschilderte Abhängigkeit der Rückstrahlintensität von der Oberfläche des reflektierenden Objekts lässt sich zur Detektion einer Markierung nutzen. Der Übergang zwischen Markierung und Fahrbahn ist durch einen Unterschied in der Intensität messbar, was z. B. für eine Lane-Departure-Warning-Funktion (LDW) verwendet werden kann^{36,37}. Das System AFIL³⁸ (Alerte de Franchissement involontaire de Ligne) warnt den Fahrer beim Überqueren einer Markierung durch seitensensitive Vibrationen am Fahrersitz. Die zur Detektion verwendeten IR-Sensoren sind unter den Kotflügeln vor den Vorderrädern montiert. Bei den genannten Ausprägungen einer LDW-Funktion ist die Sensorik senkrecht auf die Fahrbahn gerichtet und dadurch nicht zur Bestimmung einer Vorausschau des Fahrstreifens geeignet. Fardi³⁹ richtet einen einzeiligen Laserscanner auf die Fahrbahn vor dem Fahrzeug aus und bestimmt den Übergang zwischen Fahrbahn und Fahrbahnberandung. Dazu fasst er mehrere aufeinanderfolgende Scans zu einem Bild zusammen und extrahiert die Position der Fahrbahn aus den Distanzmessungen sowie den Übergang zwischen Fahrbahn und Berandung aus den Rückstrahlintensitäten. Beide Informationen werden gemeinsam in einem Erweiterten Kalman-Filter zur Schätzung des Fahrbahnverlaufs verwendet. Das vorgestellte System wurde auf Feldwegen getestet, eine Erweiterung auf die Detektion von Markierungen ist jedoch denkbar. Die Verwendung einer einzigen Messebene reicht allerdings nicht aus, um sowohl die Markierung als auch Objekte zu detektieren. Eine Offenlegungsschrift von Denso⁴⁰ beschreibt einen Lasersensor, der mit einer Ebene die Fahrbahnmarkierungen direkt am Fahrzeug detektiert und dabei gleichzeitig mit zusätzlichen Messebenen eine Objektdetektion ermöglicht. Zielanwendung ist in erster Linie eine LDW-Funktion. Eine Offenlegungsschrift von Ibeo⁴¹, die während dieser Arbeit erschien, beschreibt ein Verfahren zur Erkennung von Markierungen auf der Fahrbahn. Unter Verwendung einer Hough-Transformation wird vorgeschlagen

³⁴Winner: Skriptum Fahrerassistenzsysteme, 2005, S. 329

³⁵SICK AG: Telegramm-Spezifikation, 2002, S. 101

³⁶Winner: Skriptum Fahrerassistenzsysteme, 2005, S. 449

³⁷Bold: Straßenranderkennung, 2000, S. 7–24

³⁸Citroen: AFIL, 2005, S. 1

³⁹Fardi, Scheunert, Cramer, Wanielik: Laserbased Lane Detection II, 2003, S. 1ff

⁴⁰Kariya: Objekt- und Fahrspurerkennung, 2000, S. 1ff

⁴¹Fürstenberg, Kämpchen, Lages, Dietmayer, Willhoeft: Markierungserkennung, 2005, S. 2–11

die Markierungspositionen aus den Messdaten eines Scanners zu extrahieren und zur Schätzung des Fahrstreifenverlaufs zu verwenden der durch ein Geradenmodell beschrieben wird. Dokumentierte Ergebnisse liegen zwar noch nicht vor, allerdings hat Ibeo⁴² bereits eine LDW-Funktion auf Basis dieser Technologie angekündigt.

Abgesehen von den Arbeiten zur direkten Detektion einer Markierung lassen sich ähnlich wie beim Radarsensor detektierte Fahrbahnmerkmale wie z. B. Leitplanken dazu nutzen, den Verlauf der Fahrbahn zu bestimmen^{43,44}.

Video

Videosensorik ist zur Zeit die mit Abstand am häufigsten verwendete Sensorik zur Detektion des Fahrstreifenverlaufs. Ihre Leistungsfähigkeit ist daher auch ein wichtiger Gradmesser für das zu entwickelnde System auf Basis von Lidarsensorik. Eingesetzt werden Videosensoren mit CCD- (Charged Coupled Device) oder CMOS-Technologie (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Das Bild wird in Form einer Matrix aus Grau- oder RGB-Werten dargestellt. Auf diese Bild-Matrix werden je nach Anwendung unterschiedliche Bildverarbeitungs-algorithmen⁴⁵ appliziert. Der Videosensor in Form einer digitalen Kamera hat als passives, optisches System die dem Menschen ähnlichsten Detektionsgrenzen der drei beschriebenen Sensortypen. Für Systeme mit Detektionsbereichen außerhalb der Scheinwerferausleuchtung ist deswegen eine aktive Beleuchtung z. B. durch Infrarotlicht erforderlich. Die Bild-Matrix beinhaltet eine Vielzahl an Informationen, durch die Fußgänger, Schilder, Fahrzeuge oder andere Objekte anhand ihrer Form und Farbe klassifiziert werden können⁴⁶. Die Extraktion der im Bild enthaltenen Informationen ist allerdings in der Regel sehr rechenaufwändig und stellt hohe Ansprüche an das verwendete Steuergerät sowie die applizierten Algorithmen. Weitere Herausforderungen entstehen für Videosensorik in Situationen tief stehender Sonne, Regen, Schnee oder Nebel sowie bei dynamischen Beleuchtungsänderungen (z. B. bei Einfahrt in einen Tunnel). Die Dynamik kann allerdings durch Nutzung einer logarithmischen CMOS-Kamera deutlich gesteigert werden⁴⁷.

Ein wichtiger Schritt bei der Nutzung einer Kamera ist die Übertragung der Attribute eines Objekts aus den Bildkoordinaten in die reale Welt. Bei Verwendung einer Mono-Kamera wird oft die Annahme getroffen, dass die Fahrbahn eben ist. Unter Kenntnis der Kameraposition lassen sich so die Koordinaten eines Bildpunktes auf die reale Welt umrechnen. Eine Verletzung der Annahme kann jedoch zu Ungenauigkeiten führen. Eine Tiefeninformation lässt sich auch durch Verwendung eines Stereo-Systems ermitteln. Durch Triangulation korrespondie-

⁴²Ibeo: ALASCA XT, 2006, S. 3

⁴³Kirchner, Heinrich: Detection of road boundaries, 1998, S. 1ff

⁴⁴Sparbert, Dietmayer, Streller: Laserbased Lane Detection I, 2001, S. 1ff

⁴⁵Jähne: Digitale Bildverarbeitung, 2002, S. 1ff

⁴⁶Gavrilla, Franke, Wöhler, Görzig: Real-time Vision, 2001, S. 1ff

⁴⁷Winner: Skriptum Fahrerassistenzsysteme, 2005, S. 410

render Punkte aus zwei versetzt verbauten Kameras^{48,49} lässt sich die Position eines Objekts in Weltkoordinaten bestimmen. Nachteile des Verfahrens sind der doppelte Sensoraufwand sowie die Kalibrierung der Kameras. Obwohl lange Zeit der Stereo-Ansatz intensiv verfolgt wurde, ist bis heute noch kein System in Serie umgesetzt. Ein weiterer Ansatz ist der optische Fluss, bei dem basierend auf der Annahme, dass Intensitätsänderungen im Bild nur durch Bewegung entstehen, ein 2-D-Feld von Geschwindigkeitsvektoren aus einer Bildfolge ermittelt wird. Die Berechnung des optischen Flusses ist sehr zeitintensiv und deswegen noch im Entwicklungsstadium⁵⁰. Franke⁵¹ ermittelt die Bewegung im Bild, indem er jedes Pixel in einem Kalman-Filter trackt.

Die wichtigste Anwendung von Videosensorik ist die Detektion der Fahrstreifenmarkierungen, wie sie z. B. im schweren LKW Actros der DaimlerChrysler AG für den Spurassistent⁵² im Serieneinsatz ist. Auf dem japanischen Markt ist mit dem Honda Inspire eine Lane-Keeping-Funktion erhältlich, die das Fahrzeug bis zu einer Geschwindigkeit von 110 km/h durch gezielte Lenkeingriffe im Fahrstreifen hält. Alle bekannten Serien-Funktionen zur Fahrstreifenenerkennung basieren auf monokularen Systemen. Ein ausführlicher Überblick über die Projektlandschaft zur optischen Fahrstreifenenerkennung findet sich in der Literatur^{53,54}. Grundsätzlich lassen sich die globale Bildanalyse und das lokale Tracking unterscheiden. Bei der globalen Bildanalyse wird das ganze oder zumindest ein großer Teil des Bildes auf potentielle Markierungen untersucht^{55,56,57,58,59,60,61}. Die globale Bildanalyse hat so zwar den Vorteil keine wichtigen Informationen zu verlieren, allerdings den Nachteil einer in der Regel sehr hohen Rechenzeit. Für Automotive-Anwendungen haben sich deswegen die Verfahren des lokalen Trackings durchgesetzt, bei denen kleinere Suchfenster in Bildregionen platziert werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit Informationen zur Markierung enthalten^{62,63,64,65}. Im Hinblick auf eine höhere Robustheit des Systems können dabei mehrere übereinanderliegende Bildzeilen gemeinsam ausgewertet werden. Sowohl bei der globalen Bildanalyse als auch beim lokalen Tracking werden in der Regel Kantenoperatoren⁶⁶ zur Extraktion potentieller Mar-

⁴⁸Gavrilla, Franke, Wöhler, Görzig: Real-time Vision, 2001, S. 1ff

⁴⁹GOLD: GOLD, 2006, S. 1

⁵⁰Bertozzi, Broggi, Fascioli: Vision-based intelligent vehicles, 2000, S. 8ff

⁵¹Franke, Rabe: Depth from Motion, 2005, S. 1ff

⁵²Iteris: Lane Departure Warning System, 2006, S. 1

⁵³Zhang: Verfahren zur Straßenerkennung, 1996, S. 29–49

⁵⁴Behringer: Rechnersehen, 1997, S. 16–32

⁵⁵Bertozzi, Broggi, Fascioli, Tibaldi: Detection of Lane Markings, 2002, S. 1ff

⁵⁶Kasprzak, Niemann, Wetzel: Road Parameter Estimation, 1994, S. 1ff

⁵⁷Kluge, Lakshmanan: Deformable-Template, 1995, S. 1ff

⁵⁸Kreucher, Lakshmanan: A Frequency Domain Approach to Lane Detection, 1999, S. 1ff

⁵⁹McDonald, Franz, Shorten: Hough Transform for Lane Detection, 2001, S. 1ff

⁶⁰Pomerleau, Jochem: Automated Vehicle Steering, 1996, S. 1ff

⁶¹Southall, Taylor: Road Shape Estimation, 2001, S. 1ff

⁶²Dickmanns, Zapp: Recursive 3-D Road Recognition, 1992, S. 1ff

⁶³Franke: Real time 3-D Road Recognition, 1992, S. 1ff

⁶⁴Risack, Klausmann, Krüger, Enkelmann: Robust Lane Recognition, 1998, S. 1ff

⁶⁵Rongben, Youchun: Road Edge Detection, 2002, S. 1ff

⁶⁶Jähne: Digitale Bildverarbeitung, 2002, S. 333–356

kierungspositionen verwendet. Der Vollständigkeit halber sei auf weitere Arbeiten verwiesen, die ihren Fokus auf die Ermittlung des zur Verfügung stehenden Verkehrsraums⁶⁷, des Fahrbahnverlaufs^{68,69} oder des Verlaufs einer unstrukturierten Straße wie z. B. eines Feldwegs⁷⁰ legen.

Neben Systemen zur Fahrstreifendetektion oder Fahrbahnverlaufsbestimmung werden Kameras immer mehr als rein informierende Systeme eingesetzt. Vor diesem Hintergrund sind vor allem Anwendungen als Rückfahrkamera oder Nachtsichtsystem⁷¹ sowie in einem „Blind Spot Information System⁷²“ zu nennen. Aufgrund weiter steigender Rechenleistung der Steuergeräte ist zukünftig mit immer mehr Funktionen auf Basis von Videosensoren zu rechnen. Sehr intensiv werden dabei in den letzten Jahren z. B. Themen wie Fußgängerdetektion^{73,74} und Verkehrszeichenerkennung⁷⁵ bearbeitet. Durch Fusion von Radar- oder Lidardaten mit einem Mono-Kamerasystem kann außerdem die Genauigkeit der Kenntnisse über Form oder Position eines detektierten Objekts verbessert werden^{76,77,78}. In unterschiedlichen Arbeiten^{79,80} steht eine generelle Verbesserung der Funktionalität von ACC-Systemen durch Hinzunahme eines Videosensors im Fokus.

1.3.2 Grundlegender Aufbau heutiger ACC-Systeme

Die Funktionalität aktueller Abstandsregelsysteme für den Stop&Go-Verkehr leitet sich aus dem Vorgängersystem ACC ab, weshalb im vorliegenden Kapitel zunächst auf dessen Aufbau und Zielauswahl eingegangen wird. Die Grundlagen für das heute bekannte ACC wurden bereits im Projekt Prometheus (Programm für ein europäisches Transportwesen mit höchster Effizienz und unerreichter Sicherheit, 1986–1994) gelegt, das sich unter anderem mit der Entwicklung eines Systems namens AICC (Autonomous Intelligent Cruise Control) auseinandersetzte⁸¹. Nach Projektende im Jahre 1994 waren die Erfahrungen soweit vorhanden, dass das System zur Serienreife entwickelt und im Jahre 1999 mit der „DISTRONIC“ der DaimlerChrysler AG in den europäischen Markt eingeführt werden konnte. Mittlerweile bieten die meisten Hersteller zumindest im Segment der Oberklasse-Fahrzeuge ein ACC-System an. Die

⁶⁷Franke, Joos: Real-time Stereo Vision, 2000, S. 1ff

⁶⁸Paetzold, Franke, v. Seelen: Lane Recognition in Urban Environment, 2000, S. 1ff

⁶⁹Zhang: Verfahren zur Straßenerkennung, 1996, S. 1ff

⁷⁰Aufrere, Chapuis, Chausse: Locate a Vehicle on a Nonstructured Road, 2000, S. 1ff

⁷¹DaimlerChrysler AG: Betriebsanleitung S-Klasse, 2005, S. 327–332

⁷²Volvo: Volvo XC90, 2006, S. 1

⁷³Bertozzi, Broggi, Lasagni, Del Rose: Pedestrian Detection, 2005, S. 1ff

⁷⁴Gavrilla: Pedestrian Detection, 2001, S. 1ff

⁷⁵Gavrilla, Franke, Wöhler, Görzig: Real-time Vision, 2001, S. 1ff

⁷⁶Gern: Multisensorielle Spurerkennung, 2005, S. 110–112

⁷⁷Kämpchen, Bühler, Dietmayer: Fusion of Laserscanner and Video, 2005, S. 1ff

⁷⁸Shimomura, Fujimoto, Oki, Muro: Laser Radar and Vision, 2002, S. 1ff

⁷⁹Hofmann, Rieder, Dickmanns: Hybrid ACC, 2003, S. 1ff

⁸⁰Watanabe, Kishimoto, Hayafune, Yamada: Intelligent Cruise Control, 1995, S. 1ff

⁸¹Braess, Reichart: Prometheus, 1995, S. 1ff

Bezeichnung ACC kann dabei als Oberbegriff für Abstandsregelsysteme verwendet werden, für den allerdings je nach Hersteller unterschiedliche Bezeichnungen wie ICC (Intelligent Cruise Control), ART (Abstandsregeltempomat), ADR (Automatische Distanz-Regelung) oder „DISTRONIC“ gebräuchlich sind. Je nach Hersteller wird ein Radar- oder Lidarsensor zur Objekterkennung eingesetzt, der prinzipielle Systemaufbau unterscheidet sich jedoch in der Regel nicht. Abbildung 1.2 zeigt diesen schematisch für ein radarbasiertes ACC.

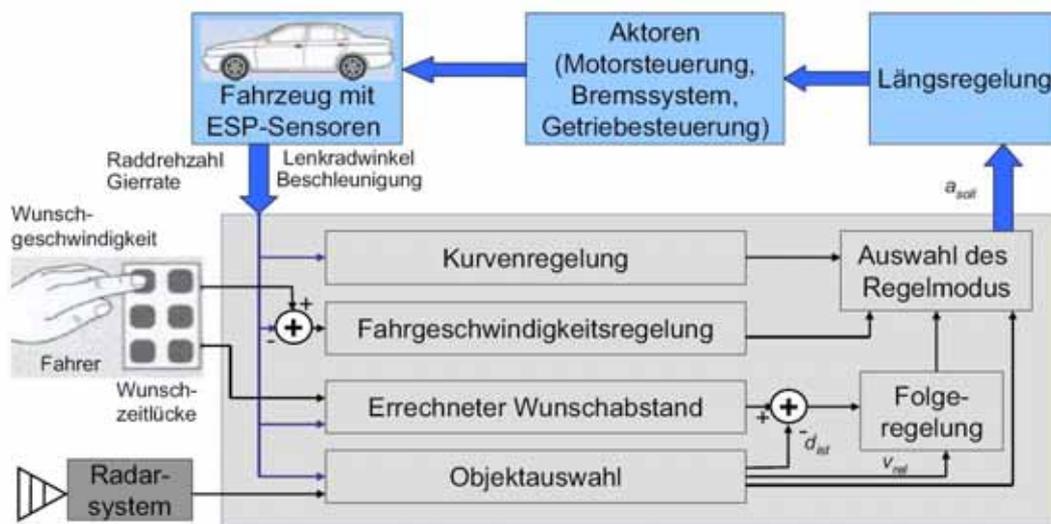


Abbildung 1.2: Schematischer Aufbau ACC⁸²

In allen heute bekannten Ausprägungen eines ACC kann der Fahrer eine Wunschgeschwindigkeit v_W sowie den zeitlichen Abstand zum Vordermann in Form einer Zeitlücke τ_W wählen. Bei freier Fahrt weicht die Funktionalität nicht von der eines herkömmlichen Tempomats ab und besteht darin, die vorgegebene Geschwindigkeit v_W einzuregeln. Wird jedoch durch die Radarsensorik ein Fahrzeug innerhalb des eigenen Bewegungshorizonts detektiert, beginnt das System unter Berücksichtigung von Relativabstand und -geschwindigkeit die vorgegebene Zeitlücke τ_W einzuregeln. Dies geschieht durch Eingriffe des Systems in Motor-, Bremsen- sowie Getriebesteuerung, wobei kleinere Bremsmomente auch allein durch das Motorschleppmoment realisiert werden können. Als Eingangsgrößen liegen neben den Fahrervorgaben die Objektinformationen der umgebungserfassenden Sensorik sowie Fahrzeugdaten wie z. B. Querbeschleunigung und Gierrate aus dem ESP vor. Funktionalität und Systemgrenzen heutiger ACC-Systeme sind im ISO-Standard ISO/FDIS 15622 festgehalten, der die Aktivierung des Systems erst ab einer Fahrzeuggeschwindigkeit v_F von mindestens 7 m/s definiert und kein autonomes Abbremsen bis in den Stillstand vorsieht. Eine Berücksichtigung stationärer Ziele in der Längsregelung wird nicht definiert, weil oft eine Unterscheidung zwischen einem stehenden Fahrzeug und z. B. einem Schild nicht eindeutig möglich ist. Als maximale Bremsverzögerung wird ein Normwert von 3 m/s² definiert.

⁸²Robert Bosch GmbH: ACC, 2002, S.40

Die Art der Auslegung heutiger ACC-Systeme lässt sich vor allem durch die Eigenschaften der eingesetzten Umgebungssensorik begründen. Die Zielauswahl berücksichtigt die in der Umgebungserkennung vorhandenen Unsicherheiten. Weil die dabei entstandenen Methoden auch für Abstandsregelsysteme im Stop&Go-Verkehr ihre Gültigkeit behalten, wird im Folgenden kurz auf die von Winner⁸³ dokumentierte Zielauswahl heutiger ACC-Systeme eingegangen. Dabei werden zunächst noch einmal die vorhandenen Unsicherheiten für radar- und lidarbasierte Systeme erläutert, bevor anschließend Methoden beschrieben werden, die deren Berücksichtigung ermöglichen.

Unsicherheiten bei der Zielauswahl

Eine wichtige Voraussetzung für eine komfortable Längsregelung ist die Auswahl des Objekts oder Ziels, das für die Regelung relevant ist. Aufgrund fehlender Sensorik zur Fahrstreifenenerkennung baut die Zielauswahl heutiger ACC-Systeme auf einer Kursprädiktion auf, die auf Basis von Fahrzeugdaten ermittelt wird (siehe Abbildung 1.3).

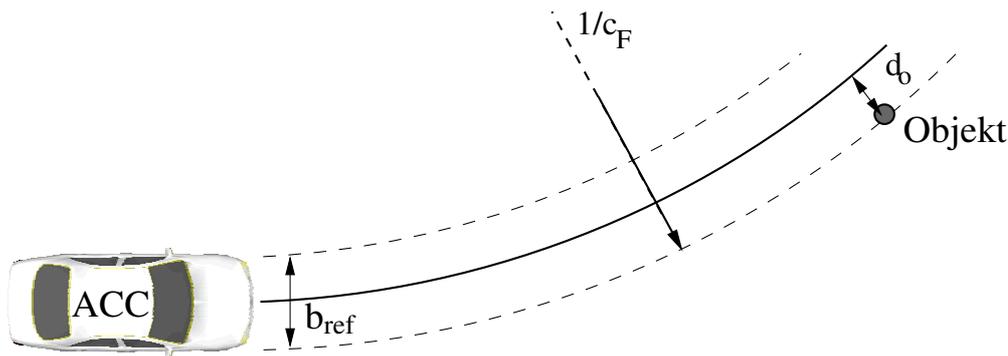


Abbildung 1.3: Kursprädiktion und Fahrschlauchmodell

Dabei wird die Trajektorie des eigenen Fahrzeugs durch die Krümmung c_F beschrieben, die die Richtungsänderung in Abhängigkeit des zurückgelegten Weges beschreibt. Aufbauend auf Fahrzeugdaten kann c_F entweder anhand der Gierrate $\dot{\psi}_F$, dem Lenkwinkel δ_F , der Querbewegungsbeschleunigung $a_{y,F}$ oder den Raddrehzahlen $r_{F,i}$ des ACC- oder Ego-Fahrzeugs bestimmt werden. Die jeweiligen Methoden haben ihre Vor- und Nachteile⁸⁴, gerade für autobahntypische Geschwindigkeiten bietet sich jedoch die Verwendung der Gierrate an. Unter der vereinfachenden Annahme stationärer Kreisfahrt (Schwimmwinkeländerung $\dot{\beta}_F = 0$) fällt der Momentanpol der aktuellen Bewegung mit dem Mittelpunkt des befahrenen Kreises zusammen, dessen Krümmung sich dann nach Mitschke⁸⁵ in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit v_F zu

$$c_F = \frac{\dot{\psi}_F}{v_F} \quad (1.1)$$

⁸³Winner: Skriptum Fahrerassistenzsysteme, 2005, S. 335–352

⁸⁴Robert Bosch GmbH: ACC, 2002, S. 37

⁸⁵Mitschke: Fahrverhalten, 1990, S. 7

ergibt. Die Gierrate $\dot{\psi}_F$, die durch einen Drehratensensor gemessen wird, ist in der Regel mit einem Offset behaftet. Die Kursprädiktion kann dadurch ungenau werden. Ein übliches Verfahren sieht eine Schätzung dieses Offsets im Stand und seine anschließende Subtraktion vom Messwert vor. Bei langer Fahrt driftet jedoch auch dieser Wert, die Qualität der Offset-Korrektur sinkt. Eine Verwendung unterschiedlicher Korrektur-Verfahren und deren Kombination ist in der Patentanmeldung von Winner⁸⁶ beschrieben. Neben der fehlerbehafteten Messung der Gierrate können ein Pendeln innerhalb des Fahrstreifens oder auch ein Spurwechsel des Ego-Fahrzeugs zu Fehlern in der Kursprädiktion führen. Änderungen im Straßenverlauf, die vor dem Fahrzeug auftreten, werden durch die fahrzeugdatenbasierte Kursprädiktion ebenfalls nicht abgedeckt. Befindet sich ein vorausfahrendes Fahrzeug schon in einer Kurve, während das eigene Fahrzeug noch auf einer Geraden fährt, so ist die Zielauswahl deutlich beeinträchtigt. Vor diesem Hintergrund wird in unterschiedlichen Arbeiten^{87,88,89} eine Optimierung der Kursprädiktion durch eine Schätzung des Fahrbahnverlaufs auf Basis stehender Ziele (auf Autobahnen meist Leitplanken, Schilder, Leitpfosten usw.) vorgeschlagen. Die über der Zeit beobachteten Trajektorien anderer Fahrzeuge können ebenfalls zur Verbesserung der Krümmungsinformation verwendet werden⁹⁰, dabei ist jedoch zu beachten, dass ein beobachtetes Fahrzeug ebenfalls einen Spurwechsel durchführen kann. Andere Ansätze^{91,92,93} verbessern die Vorausschau durch zusätzliche Nutzung von GPS in Kombination mit einer digitalen Karte. Bei Verwendung einer Kamera stehen detaillierte Informationen über den Fahrstreifenverlauf zur Verfügung, die für die Fahrstreifenzuordnung anderer Objekte verwendet werden können^{94,95}.

Neben der fehlenden Kenntnis der Fahrstreifenkrümmung haben heutige ACC-Systeme keinerlei Informationen über die Fahrstreifenbreite oder die Position des ACC-Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens. Die Zielauswahl wird auf Basis des lateralen Abstands d_o eines Objekts zum prädizierten Kurs durchgeführt (siehe Abbildung 1.3). Ein Schwellwert b_{ref} definiert dabei den Fahrschlauch (siehe gestrichelte Linie in Abbildung 1.3), innerhalb dessen sich das Ego-Fahrzeug voraussichtlich weiter bewegen wird. Ist d_o dabei kleiner $\frac{b_{\text{ref}}}{2}$ ist das Objekt potentiell relevant für die Abstandsregelung. Aus allen potentiell relevanten Objekten wird das mit der höchsten Relevanz⁹⁶ für die ACC-Funktion als regelungsrelevant gewählt. Unterschiedliche Fahrstreifenbreiten sowie dezentriertes Fahren erschweren die Wahl von b_{ref}

⁸⁶Winner, Urban, Lueder, Keller: Gierratenkorrektur, 2002, S. 1ff

⁸⁷Meis, Schneider: Bildgebendes Kfz-Radar, 2004, S. 1ff

⁸⁸Kirchner: Sensordatenverarbeitung eines Laserscanners, 2000, S. 41–48

⁸⁹Sparbert, Dietmayer, Streller: Laserbased Lane Detection I, 2001, S. 1ff

⁹⁰Schiffmann, Widmann: Radar Tracking, 1998, S. 1ff

⁹¹Schraut: Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten, 2000, S. 1ff

⁹²Baum, Hamann, Schubert: High Performance ACC, 1996, S. 1ff

⁹³Lauffenburger, Baujon, Basset, Gissinger: Das NAICC-Projekt, 2000, S. 1ff

⁹⁴Watanabe, Kishimoto, Hayafune, Yamada: Intelligent Cruise Control, 1995, S. 1ff

⁹⁵Hofmann, Rieder, Dickmanns: Hybrid ACC, 2003, S. 1ff

⁹⁶In der Regel handelt es sich hier um das Objekt mit dem geringsten, longitudinalen Abstand zum Ego-Fahrzeug. In bestimmten Situationen kann jedoch auch ein weiter voraus fahrendes Objekt, das z. B. stark verzögert, als regelungsrelevant ausgewählt werden.

in der Realität. Durch Beobachtung stehender Ziele bzw. entgegenkommender Fahrzeuge wird deswegen oft versucht, eine situationsadaptive Wahl von b_{ref} für Landstraßen, Autobahnen usw. durchzuführen. Auch diese Vorgehensweise kann sich der Realität jedoch nur annähern. Die Radarmessung liefert ein Punktziel, dessen Winkelinformation fehlerbehaftet ist (siehe Kapitel 1.3.1). Zusätzlich ist weder die Breite des detektierten Objekts noch der genaue Ursprung der Reflexion auf dem Objekt bekannt. Das in Abbildung 1.3 dargestellte Objekt könnte eine Reflexion der äußeren Kante eines Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen oder eine Reflexion einer Fahrzeugkante aus dem Nachbarstreifen sein.

Eine Synthese aller genannten Fehlerquellen, die bei der Zielauswahl eines radarbasierten ACC-Systems zu berücksichtigen sind, führt zu Tabelle 1.1.

Tabelle 1.1: Fehlerquellen bei der Zielauswahl eines radarbasierten ACC⁹⁷

1	Unklarheit, an welcher Stelle des Objekts die Radarstrahlen reflektiert wurden, also ob von der linken oder der rechten Seite oder von der Mitte.
2	Unklarheit über die aktuelle Lage des ACC-Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens.
3	Der stochastische Winkelfehler des Radars beträgt ca. $0,25^\circ$.
4	Langzeit-Winkelfehler z. B. (Offset-Error) liegen bei ca. $0,15^\circ$.
5	Eine Kursunruhe (Abweichung von Ideallinie) von $1,0^\circ$ Lenkradwinkel führt zu einem Krümmungsfehler von ca. 10^{-4} m^{-1} .
6	Rauschen des Drehratensensors liefert einen stochastischen Gierratenfehler von ca. $0,25^\circ/\text{s}$.
7	Der Langzeit-Gierratenfehler (Offset-Error) ist mit $0,25^\circ/\text{s}$ anzusetzen.

In einem günstigen Fall heben sich die Fehler gegenseitig auf, im ungünstigsten Fall jedoch addieren sie sich. Dadurch ist es schwer die Zielauswahl für alle Fahrsituationen gleich zu parametrieren. Es resultiert daher ein Verhalten, das Winner⁹⁸ mit dem Wort „Tagesform“ beschreibt.

Ein lidarbasiertes ACC hat mit den gleichen Fehlerquellen umzugehen, wie ein radarbasiertes System, mit dem Unterschied, dass bei Verwendung eines Laserscanners oder eines Sensors mit schmaler Strahlöffnung die Winkelinformation der Objektposition und die Objektbreite genauer bekannt sind. Beides lässt sich in einer genaueren Kenntnis des Winkels zusammenfassen, unter dem ein Objekt sich zum Ego-Fahrzeug befindet. Abbildung 1.4 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Winkelfehler auf die Bestimmung der lateralen Position eines Objekts, in Abhängigkeit von der Distanz zum Ego-Fahrzeug.

⁹⁷Winner: ACC-Tagesform, 2005, S.3

⁹⁸Winner: ACC-Tagesform, 2005, S. 1ff

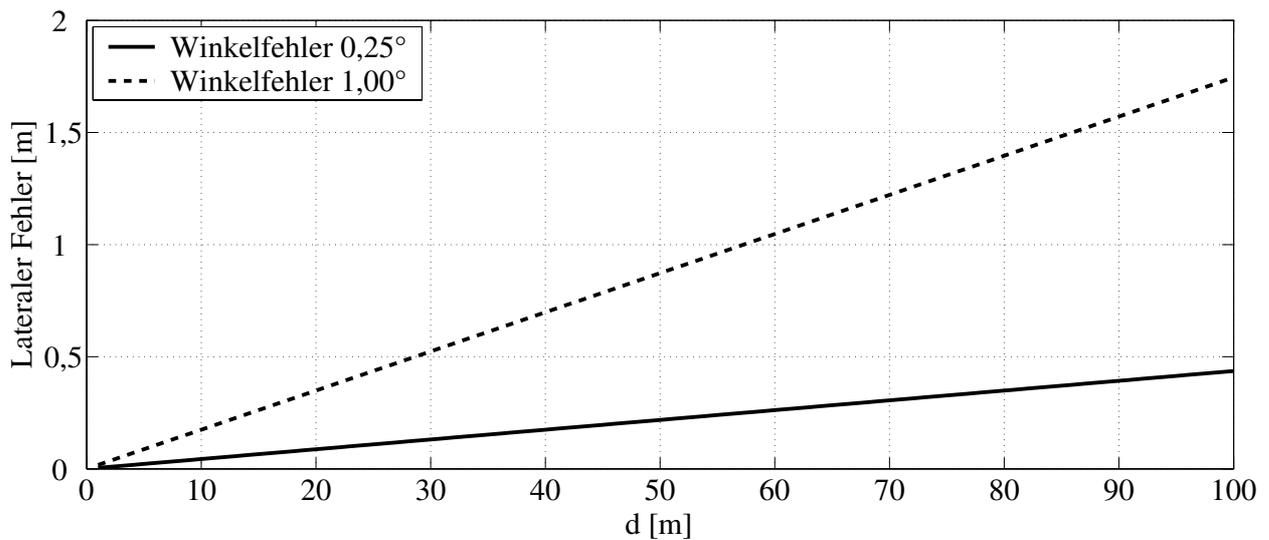


Abbildung 1.4: Lateraler Fehler bei fehlerbehafteter Winkelmessung

Der laterale Fehler kann danach auch schon in einer Entfernung von z. B. 30 m mehr als 0,5 m betragen. Dadurch ist zum einen eine Relevanz der Abweichungen auch für den Stop&Go-Verkehr gegeben. Zum anderen spricht dies dafür, dass die Zielauswahl eines lidarbasierten ACC-Systems der eines radarbasierten Systems im Mittel überlegen ist, solange die Einflüsse nicht durch die „Tagesform“ überlagert werden.

Methoden der Zielauswahl

Die geschilderten Unsicherheiten machen die Auswahl des für die Regelung relevanten Objekts zu einer schwierigen Aufgabe. Dabei besteht die Forderung, eine minimale Anzahl an Fehlinterpretationen und eine dynamische Reaktion bei Objektwechseln zu kombinieren. Allgemein lassen sich folgende zwei Anforderungen formulieren:

A-1 Minimale Nebenspurstörungen und Objektverluste [$\min(N_{NS})$ und $\min(N_{OV})$]

A-2 Minimale Detektionszeiten von Ein- und Ausscherern [$\min(t_E)$ und $\min(t_A)$]

Die genannten Anforderungen widersprechen sich. So lässt sich z. B. die Anzahl der Nebenspurstörungen N_{NS} zwar beliebig minimieren, indem die Fahrschlauchbreite b_{ref} sehr klein gewählt wird. Je kleiner der Wert für b_{ref} ist, desto größer werden jedoch die Detektionszeiten t_E bei einscherenden Fahrzeugen. Gleiches gilt für die Anzahl der Objektverluste N_{OV} in Verbindung mit den Detektionszeiten t_A bei ausscherenden Fahrzeugen. Der entstehende Zielkonflikt kann ohne Informationen über die Fahrstreifenposition nicht vollständig aufgelöst werden. Um einer optimalen Lösung möglichst nahe zu kommen, sind unterschiedliche Methoden entstanden, die die vorhandenen Unsicherheiten berücksichtigen. Da diese in Kapitel 5 als Basis für das zu entwickelnde Referenzsystem erforderlich sind, werden im Folgenden die vier wichtigsten Methoden näher erläutert.

- M-1 Doppelfahrschlauch
- M-2 Entfernungsabhängige Form des Fahrschlauchs
- M-3 Unscharfe Logik (Fuzzy Logic)
- M-4 Zeitliche Mindest-Schwellwerte für die Fahrschlauchzugehörigkeit

Eine oft angewandte Methode (M-1) ist die Verwendung von zwei Fahrschläuchen unterschiedlicher Breite b_i und b_a (mit $b_i \leq b_a$), durch die eine Hysterese in der Zielauswahl erreicht wird. Ein Objekt wird erst dann relevant für die Regelung, sobald es sich im Inneren der beiden Fahrschläuche aufhält. Solange sich ein relevantes Objekt innerhalb des äußeren Fahrschlauchs befindet bleibt es relevant. So wird eine unterschiedliche Behandlung relevanter und nicht relevanter Objekte ermöglicht. Die zusätzliche Verwendung einer entfernungsabhängigen Fahrschlauchform (M-2) lässt eine anwendungsorientierte Berücksichtigung von Phänomenen wie z.B. dem mit der Entfernung wachsenden Einfluss einer fehlerbehafteten Kursprädiktion zu. Der Doppelfahrschlauch ermöglicht eine einfache Gewichtung der Anforderungen A-1 und A-2. Je breiter z.B. der innere Fahrschlauch gewählt wird, desto kürzer sind die Detektionszeiten bei Einscherern, desto größer ist allerdings auch die Anzahl der Nebenspurstörungen. Ein Objekt, das aufgrund von Messausreißern nur kurzzeitig in den Fahrschlauch gerät, wird bei ausschließlicher Verwendung des Doppelfahrschlauchs sofort relevant. Diese oft ungewünscht hohe Dynamik lässt sich z. B. durch unscharfe Logik (M-3) oder zeitliche Mindestschwelle (M-4) reduzieren. Abbildung 1.5 zeigt die Fahrschlauchmodellierung einmal ohne (oben) und einmal mit Fuzzy-Logik (unten).

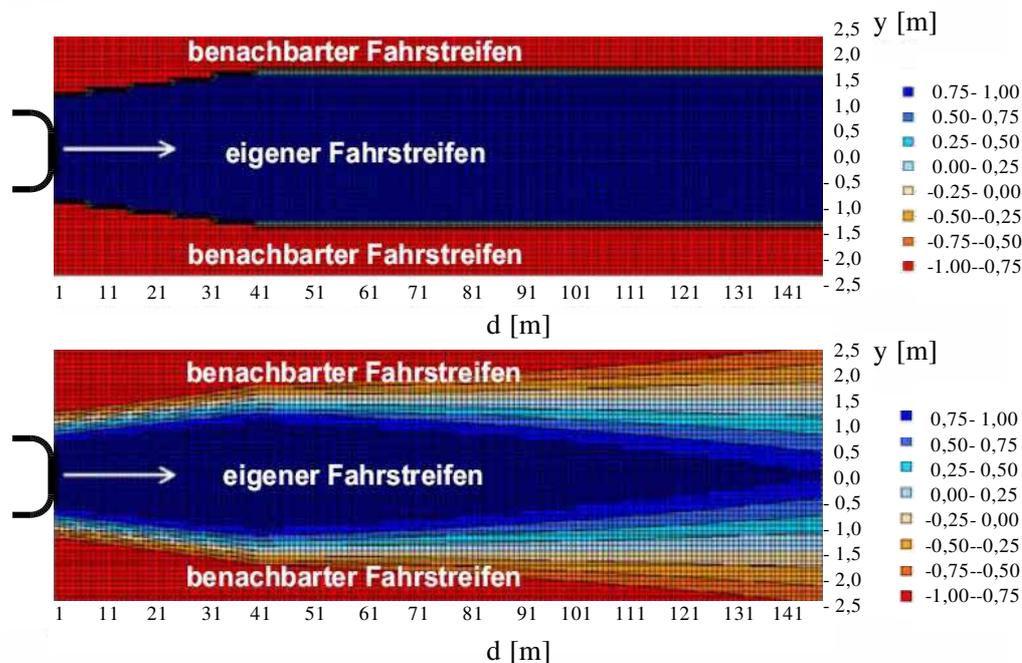


Abbildung 1.5: ACC-Fahrschlauch⁹⁹

⁹⁹Winner: Skriptum Fahrerassistenzsysteme, 2005, S. 348

Bei Verwendung unscharfer Logik (Fuzzy-Logic) wird für jedes Objekt eine integrale Fahrerschlauchwahrscheinlichkeit gebildet. Die dabei aufaddierte Größe sinkt zu den Seiten des Fahrerschlauchs. Ein sich lange Zeit am Rande bewegendes Objekt wird so deutlich später relevant als eins in Fahrerschlauchmitte. Einflüsse durch kurzzeitige Messausreißer werden dadurch minimiert. Die Festlegung eines zeitlichen Schwellwertes t_{\min} für die Fahrerschlauchzugehörigkeit eines Objekts (M-4) ist eine weitere Methode zur Unterdrückung von Messausreißern. Dabei ist es erforderlich, dass sich ein Objekt mindestens t_{\min} Sekunden im Fahrerschlauch aufhält, bevor es diesem zugeordnet wird. M-3 und M-4 können in Verbindung mit einem einzelnen Fahrerschlauch aber auch mit einem Doppelfahrerschlauch eingesetzt werden. Allerdings bietet die Fuzzy-Logic Vorteile in Situationen, in denen ein relevantes Objekt kurzzeitig ganz verloren geht, ein Problem das z. B. bei starken Fahrzeugnickenbewegungen auftreten kann. Vorausgesetzt das Objekt bewegt sich in der Fahrerschlauchmitte, so ermöglicht M-3 im geschilderten Fall die sofortige Übernahme eines neu entstehenden Objekts als relevant. Die Reaktion von M-4 ist in dieser Situation deutlich langsamer. Weiterhin ist die Dynamik der Fuzzy-Logic bei einem schnell einscherenden Fahrzeug der des zeitlichen Schwellwertes überlegen. Insgesamt sinkt jedoch sowohl durch zusätzliche Verwendung von M-3 als auch M-4 die Dynamik der Zielauswahl bei Objektwechseln.

Die Auslegung der Methoden M-1 bis M-4 ist abhängig von den verwendeten Systemkomponenten und benötigt daher in der Regel eine spezielle Anpassung¹⁰⁰. Als Konsequenz wird die Zielauswahl heutiger ACC-Systeme über einen langen Zeitraum auf das Fahrzeug und den Kunden angepasst und optimiert. Diese Vorgehensweise führte zu einer hohen Verfügbarkeit von ACC. Das System konnte seine Alltagstauglichkeit über die Jahre unter Beweis stellen. In einer Studie unter ACC-Käufern geben 81 % an, dass sie sehr zufrieden mit dem System sind¹⁰¹. Viele Fahrer erleben einen Komfortgewinn¹⁰², Untersuchungen belegen außerdem einen positiven Einfluss auf das Abstandsverhalten der Fahrer¹⁰³. Allerdings zeigt die Erfahrung ebenfalls, dass sich Fehlinterpretationen und träge Reaktionen auf einscherende Fahrzeuge mit den aktuellen Algorithmen nicht ganz ausschließen lassen. So empfinden die meisten Fahrer vor allem Übernahmesituationen, in denen das System nicht rechtzeitig auf ein einscherendes Fahrzeug reagiert, als schwierig¹⁰⁴. Eine zusätzliche Information über den Fahrstreifenverlauf könnte helfen, solche Situationen richtig einzuschätzen und dadurch den Systemkomfort weiter erhöhen.

1.3.3 Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr

Ein großer Teil wissenschaftlicher Arbeiten auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme hat sich in den letzten Jahren der Weiterentwicklung des ACC auf den Stau- und Innenstadt-

¹⁰⁰In Anlehnung an die Praxis wird im weiteren Verlauf der Arbeit auch der Begriff Tuning verwendet.

¹⁰¹Winner: Skriptum Fahrerassistenzsysteme, 2005, S. 386

¹⁰²Dorißen, Höver: Autonome Intelligente Geschwindigkeitsregelung (AICC), 1996, S. 9

¹⁰³Filzek: Abstandsverhalten auf Autobahnen, 2002, S. 102

¹⁰⁴Dorißen, Höver: Autonome Intelligente Geschwindigkeitsregelung (AICC), 1996, S. 9

bereich gewidmet. Verkehrssimulationen haben gezeigt, dass eine derartige Ausweitung der ACC-Funktionalität den Verkehrsdurchsatz verbessern¹⁰⁵ und die Belastung des Fahrers reduzieren¹⁰⁶ kann. Dabei stand in den meisten Arbeiten neben der Systemausprägung vor allem eine Anpassung der Umgebungserkennung und damit die Frage nach einer geeigneten Sensorik im Vordergrund. Im Folgenden werden die in diesem Zusammenhang wichtigsten Forschungs- und Entwicklungsprojekte skizziert.

Als eines der ersten Projekte beschäftigte sich UDC¹⁰⁷ (Urban Drive Control, 1994–1998) mit der Ausweitung der herkömmlichen ACC-Funktion. Mit zusätzlich per Kurzwellenkommunikation übermittelten Geschwindigkeitsempfehlungen wurde versucht, neben dem ACC eine Stop&Go-Funktion und eine Funktion namens Traffic Light Controller darzustellen, mit dem Ziel einen optimierten Verkehrsfluss im Stadtverkehr zu erreichen.

Ein auf deutscher Ebene sehr bedeutendes Projekt war das Prometheus-Nachfolgeprojekt MoTiV (Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr, 1996–2000), das eine Ausweitung von ACC in den Bereich von Ballungsräumen¹⁰⁸ zum Ziel hatte. Es wurden Messdaten aufgezeichnet, auf deren Basis eine Situationsklassifikation und anschließend eine Systemspezifikation für ein Abstandsregelsystem im Stop&Go-Verkehr erarbeitet wurden. Ausgehend davon ließen sich Anforderungen an den Erfassungsbereich und die Objektklassifikation formulieren. Dabei ergab sich die Forderung nach einer zusätzlichen Berücksichtigung stehender Objekte sowie einer Aufweitung des Sensorerfassungsbereiches direkt vor und seitlich des Fahrzeugs. Den Herausforderungen der Umgebungsinterpretation begegnete man in MoTiV mit dem Vorschlag eines Multisensoransatzes und der Fusion von Radar-, Laser-, Video- und DGPS-Daten. Die Nutzung einer Kamera zur Fahrstreifenenerkennung wurde dabei in erster Linie zur Verbesserung der Zielauswahl empfohlen^{109,110}. Neben den Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Umgebungserfassung konnte in der Simulation ein verbesserter Verkehrsfluss sowie ein geringerer Verbrauch in unterschiedlichen typischen Stausituationen nachgewiesen werden. Von dem zu Beginn gesteckten Ziel der Unterstützung in urbanen Gebieten nahm man jedoch im Laufe des Projekts wieder Abstand und schlug eine Umsetzung zunächst nur für „Stausituationen in gut strukturierten Bereichen“¹¹¹ vor.

Aufgrund der Erkenntnis, dass die Komplexität der Umgebungsinterpretation im Stop&Go-Verkehr stark zunimmt, befasste sich das Projekt CARSENSE¹¹² (2000–2003) ausschließlich mit den Anforderungen an die Umgebungserkennung. Mit Hilfe von Laser, Radar und Videosensorik sowie einer darauf aufbauenden Datenfusion wurde ein Multisensoransatz zur

¹⁰⁵Parent, Daviet, Denis, M'Saada: Influence of ACC, 1999, S. 25

¹⁰⁶Yamamura, Tabe, Kanehira, Murakami: ACC with Stop-And-Go Capability, 2001, S. 43

¹⁰⁷Sala: Urban Drive Control Applications, 1999, S. 1ff

¹⁰⁸MoTiV – Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr: Abschlussbericht MoTiV, 2000, S. 1

¹⁰⁹Naab: ACC in Ballungsräumen, 1998, S. 559

¹¹⁰Uhler, Weilkes: Systemkonzept eines erweiterten ACC, 2000, S. 36

¹¹¹MoTiV – Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr: Abschlussbericht MoTiV, 2000, S. 130

¹¹²Carsense: Carsense, 2006, S. 1

Umgebungserfassung favorisiert, der auf die Anwendung im Stop&Go-Verkehr ausgerichtet war.

Als Nachfolgeprojekt von MoTiV wurde im Jahr 2000 das Projekt Invent¹¹³ (Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik, 2000–2005) ins Leben gerufen, das die in MoTiV erarbeiteten Ergebnisse aufgriff. Hintergrund des Teilprojekts „Stauassistent“ war durch automatisiertes Fahren im Stau sowohl Fahrkomfort und Verkehrsfluss zu verbessern, als auch den Kraftstoffverbrauch zu senken. Auch in Invent wurde ein Multisensoransatz verfolgt, bei dem zur Fahrstreifenenerkennung eine Kamera zum Einsatz kam. Die Objekterkennung führten die Projektpartner mit unterschiedlichen Sensoren durch (Radar- oder Lidarsensorik). Es wurde versucht, die Regelung des Fahrzeugs stärker auf die vorliegende Situation zu beziehen. Dazu wurden zunächst Probandenversuche^{114,115} durchgeführt, mit deren Hilfe eine Situationsklassifikation aus Fahrersicht ermittelt sowie eine Datenbasis für typisches Fahrerverhalten im Stau erarbeitet wurde. Darauf aufbauend wurde ein Regler¹¹⁶ entworfen, der bei Wiedererkennen einer bestimmten Situation ein adäquates Regelverhalten wählt. Das bisherige Konzept der reinen Längsführung wurde um eine Querführung innerhalb des Fahrstreifens erweitert¹¹⁷. Neben der fahrstreifenbasierten Regelung kann eine Querregelung alternativ auch anhand des sogenannten Platoonings realisiert werden, bei dem der Pfad des vorausfahrenden Fahrzeugs abgefahren wird^{118,119,120}. Das Platooning bietet im Vergleich zu einer fahrstreifenbasierten Querführung den Vorteil, dass keine Information über den Fahrstreifen notwendig ist. Dies kann gerade im Stop&Go-Verkehr Vorteile haben, in dem die longitudinalen und lateralen Abstände zwischen Fahrzeugen mitunter sehr klein werden. Eine typischerweise am Innenspiegel montierte Kamera hat dadurch nicht immer eine freie Sicht auf die Markierungen. Allerdings setzt das Platooning eine sehr genaue Bestimmung des relevanten Fahrzeugs voraus, wodurch, ähnlich wie bei einem reinen Abstandsregelsystem, das Problem der richtigen Zielauswahl entsteht.

Neben Invent verfolgten weitere Arbeiten^{121,122,123,124} das Ziel, speziell auf den Stop&Go-Verkehr angepasste Regel- und HMI-Konzepte zu entwickeln. Der direkte Vergleich eines solchen Stop&Go-Reglers mit dem Fahrverhalten von sechs Probanden zeigte jedoch unter anderem, dass Abweichungen in vielen Fällen durch fehlende Informationen über die Umgebung, im Speziellen über den Verlauf des Fahrstreifens auftreten¹²⁵. Neben den fehlenden

¹¹³Invent: Teilprojekt Stauassistent STA, 2006, S. 1

¹¹⁴Sandkühler, Benmimoun: Verkehrssituationserkennung, 2004, S. 1ff

¹¹⁵Weilkes, Baum, Hummel, Sauerbrey: Stauassistent, 2002, S. 335

¹¹⁶Richert: Modellbasierte Stop&Go-Regelung, 2004, S. 1ff

¹¹⁷Weilkes, Bürkle, Rentschler, Scherl: Zukünftige Fahrzeugführungsassistentz, 2004, S. 1ff

¹¹⁸Fritz: CHAUFFEUR, 1999, S. 1ff

¹¹⁹Gehrig: Vision-Based Vehicle-Following System, 2000, S. 41–54

¹²⁰Parent: Automatic Driving, 1994, S. 1ff

¹²¹Adiprasito: Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich, 2004, S. 21–50

¹²²Persson, Botling, Hesslow, Johansson: Stop&Go Controller, 1999, S. 1ff

¹²³Yamamura, Tabe, Kanehira, Murakami: ACC with Stop-And-Go Capability, 2001, S. 1ff

¹²⁴Yi, Hong, Kwon: A vehicle control algorithm, 2001, S. 1ff

¹²⁵Adiprasito: Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich, 2004, S. 152

Schon im Jahr 2004 stellten Nissan¹²⁹ und Toyota¹³⁰ erste, lidarbasierte Abstandsregelsysteme für den japanischen Markt vor, die für den Einsatz im Stop&Go-Verkehr konzipiert waren. Zusätzlich zum herkömmlichen ACC kann im Nissan im Bereich zwischen 10 km/h und 30 km/h ein Low-Speed-Modus gewählt werden, in dem das System, abweichend von der herkömmlichen ACC-Funktion, nur noch bremst, jedoch nicht mehr Gas gibt¹³¹. Das Toyota-System bietet eine durchgehende Unterstützung in der Art eines ACC bis hinunter zu einer Geschwindigkeit von 0 km/h an¹³². Seit September 2005 ist mit der „Distro-nicPlus“ der DaimlerChrysler AG das erste System auf dem europäischen Markt erhältlich, das durch eine durchgängige Abstandsregelung zwischen 0 und 200 km/h die ursprüngliche ACC-Funktionalität auf eine Nutzung im Stau ausweitet. Auch Audi führte im Jahr 2006 einen Stauassistenten¹³³ ein. Auf einen zusätzlichen Sensor zur Detektion der Fahrstreifenmarkierung wird jedoch in allen Systemen weiterhin verzichtet, die Zielauswahl wird analog zu der eines ACC-Systems durchgeführt.

1.4 Fazit

Seit nunmehr sieben Jahren sind Abstandsregelsysteme auf dem europäischen Markt erhältlich. Es hat sich gezeigt, dass durch ACC-Systeme der Fahrkomfort erhöht wird, weswegen ihre Weiterentwicklung auf den Bereich zwischen 0 und 200 km/h vorangetrieben wurde. Seit 2005 kann der europäische Kunde nun auch ein Abstandsregelsystem für den Stau erwerben. Trotz des in vielen Forschungsarbeiten geforderten Einsatzes einer Kamera zur Fahrstreifendetektion hat diese sich weder in herkömmlichen ACC-Systemen noch in Systemen für den Stop&Go-Verkehr als Serienlösung etabliert. Vor allem der zusätzliche Aufwand und die dadurch entstehenden Kosten haben dies bisher verhindert, obgleich die Vorteile einer Fahrstreifeninformation für die Zielauswahl und auch zukünftige Querregelungsfunktionen auf der Hand liegen. Im Zuge einer steten Optimierung wird jedoch über kurz oder lang eine Technologie benötigt, die eine sichere Interpretation der Umgebung auch in Situationen von z. B. einscherenden Fahrzeugen ermöglicht. Die heute übliche Zielauswahl stößt trotz einer insgesamt hohen Verfügbarkeit in solchen Situationen an die Grenzen ihrer Möglichkeiten. Im Projekt MoTiV setzte man sich schon früh mit der Spezifikation der Systemfunktionen einer Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr auseinander. Als übergeordnetes Ziel wurde die Forderung formuliert, dass sich der Fahrer bei Nutzung des Systems „wohl und sicher“ fühlt. Ohne sich dabei zunächst sensoriiellen Einschränkungen zu unterwerfen, konnte dieses sehr allgemeine Ziel in generelle Systemziele aufgegliedert und anschließend zu einer Liste „möglicher und in absehbarer Zeit darstellbarer Systemfunktionen“ zusammengefasst wer-

¹²⁹Nissan: Nissan Sedan, 2006, S. 1

¹³⁰Toyota: Toyota Radar Cruise Control, 2006, S. 1

¹³¹Bishop: Technology and Trends, 2005, S. 133

¹³²Bishop: Technology and Trends, 2005, S. 133

¹³³Wolkenstein: Der Audi Q7, 2005, S. 967

den. Seriensysteme setzen die meisten dieser Funktionen schon um, orientieren sich dabei jedoch noch immer stark an der herkömmlichen Funktionalität von ACC-Systemen, mit den bekannten Unsicherheiten der Zielauswahl. Bei einem direkten Vergleich der in MoTiV¹³⁴ geforderten und in heutigen Abstandsregelsystemen umgesetzten Systemfunktionen ergeben sich sechs, heute noch nicht erfüllte Anforderungen an das System. Diese Anforderungen sowie die aus ihnen resultierenden Erfordernisse für die Umgebungsinterpretation fasst Tabelle 1.2 zusammen.

Tabelle 1.2: Systemfunktionen nach MoTiV¹³⁵

Nr.	Anforderung: System ..	Anforderung: Umgebungsinterpretation ..
1	.. reagiert (weich) auf nahe Einscherer, solange keine direkte Kollisionsgefahr besteht.	.. klassifiziert einscherende Fahrzeuge früh und zuverlässig.
2	.. lässt einfädeln.	.. klassifiziert einfädelnde Fahrzeuge früh und zuverlässig.
3	.. erkennt Überholabsicht des Fahrers und schließt ggf. auf.	.. erkennt den Fahrerwunsch.
4	.. erkennt Kurve voraus und reduziert ggf. Geschwindigkeit.	.. erkennt eine vorausliegende Krueve.
5	.. fährt defensiv bei verringerter Fahrstreifenbreite.	.. erkennt die Fahrstreifenbreite.
6	.. verringert Abstand zu Objekten, welche in Kürze die Spur verlassen.	.. klassifiziert ausscherende Fahrzeuge früh und zuverlässig.

Eine Synthese der aufgelisteten Anforderungen führt zu dem Schluss, dass alle sechs noch ausstehenden Systemfunktionen nur durch zusätzliche Kenntnis von Fahrstreifenposition und -verlauf sowie durch detailliertere Informationen über die laterale Objektposition und -breite ermöglicht werden. Es scheint daher nur eine Frage der Zeit und der Kosten zu sein, wann ein fahrstreifenerkennendes System auch für die Situationsinterpretation einer Abstandsregelung eingesetzt wird. Je kostengünstiger ein solches System angeboten werden kann, desto früher kann es in den Markt eingeführt werden. Tabelle 1.3 stellt vor diesem Hintergrund den Zusammenhang zwischen heute in Serie verfügbaren Assistenzsystemen¹³⁶ und der dabei jeweils verwendeten Sensorik her.

¹³⁴MoTiV – Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr: Abschlussbericht MoTiV, 2000, S. 29–30

¹³⁵MoTiV – Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr: Abschlussbericht MoTiV, 2000, S. 29–30

¹³⁶Es werden nur Systeme aufgeführt, die für die vorgelegte Arbeit relevant sind.

Tabelle 1.3: Zusammenhänge zwischen aktuellen Seriensystemen und eingesetzter Sensorik

	Radar	Lidar	Video
ACC	X	X	
ACC Stop&Go	X	X	
Lane-Departure-Warning		X	X
Lane-Keeping			X

Wie aus Tabelle 1.3 ersichtlich ist der Lidar zur Zeit der einzige Sensor, der sowohl in Abstandsregelsystemen als auch zur Markierungsdetektion in LDW-Funktionen im Serieneinsatz ist. Praktische Erfahrungen auf dem Gebiet der Schätzung des vor dem Fahrzeug liegenden Fahrstreifens sowie einer kombinierten Objekt- und Fahrstreifenerkennung unter ausschließlicher Nutzung von Lidarsensorik gibt es dagegen trotz verfügbarer Sensorik bisher nur wenige. Hinzu kommt, dass ein Lidarsensor in der Regel einen großen Detektionsbereich hat und detaillierte Informationen über die laterale Ablage und die Breite eines Objekts liefert. Dadurch ist er gerade für eine Anwendung im Stop&Go-Verkehr geeignet. Die bei schlechtem Wetter reduzierte Detektionsreichweite, die dem Lidar häufig angelastet wird, verliert für eine Anwendung im Stop&Go-Verkehr ebenfalls an Gewicht. Deshalb wird in der vorgelegten Arbeit das Potential von Lidarsensorik zur kombinierten Objekt- und Fahrstreifenerkennung untersucht. Ziel dabei ist eine verbesserte Detektion von ein- und ausscherenden Fahrzeugen im Stop&Go-Verkehr und eine daraus resultierende Erhöhung des Regelkomforts von Abstandsregelsystemen.

2 Aufbau des Gesamtsystems

Um eine lidarbasierte Fahrstreifenzuordnung im realen Verkehr untersuchen zu können ist zunächst die Auswahl einer Sensorik sowie ihre Integration in einen Versuchsträger erforderlich. Die entstehende Sensorik-Konstellation muss dabei den Anforderungen der Anwendung genügen. Diese Anforderungen werden im vorliegenden Kapitel in einem ersten Schritt zusammengestellt. Erst in einem zweiten Schritt wird die Auswahl einer Sensorik-Konstellation und die Integration des Gesamtsystems in einen Versuchsträger beschrieben.

2.1 Anforderungen an die Sensorik

Die Anforderungen an die Sensorik lassen sich durch den notwendigen Öffnungsbereich, die Anzahl der Messebenen sowie die Auflösung zwischen den einzelnen Laserstrahlen beschreiben. All diese Punkte werden im Folgenden jeweils für den horizontalen und den vertikalen Erfassungsbereich genauer spezifiziert, wobei eine weitere Unterteilung in die Anforderungen aus der Objektdetektion und der Fahrstreifendetektion vorgenommen wird.

2.1.1 Horizontaler Erfassungsbereich

Für die Objekterkennung ist in erster Linie der horizontale Erfassungsbereich ausschlaggebend. Dieser sollte bei einer Anwendung im Stop&Go-Verkehr zumindest den Aktionsradius potentiell relevanter Objekte abdecken. Vor diesem Hintergrund beschreibt Adiprasito¹ den Manöverraum eines Fahrzeugs anhand der typischerweise auftretenden Quer- und Längsbeschleunigungen. Er untersucht dabei den Bereich vor dem Fahrzeug bis in eine Entfernung von 100 m, ein Wert der für eine Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr als leicht überhöht oder zumindest als Maximalwert angesehen werden kann². Lateral ist die Erfassung von Objekten auf dem Nachbarfahrstreifen nah am Fahrzeug wünschenswert, für die Lösung nach Adiprasito³ ergibt sich dadurch unter der Annahme einer mittig verbauten Sensorik ein Öffnungswinkel von ca. $\pm 20^\circ$.

¹Adiprasito: Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich, 2004, S. 16-20

²Im weiteren Verlauf des Kapitels wird eine longitudinale Reichweite ermittelt, die signifikant unterhalb von 100 m liegt. Grund für diese Abweichungen sind wahrscheinlich Unterschiede im zugrunde gelegten Geschwindigkeitsbereich für das System.

³Adiprasito: Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich, 2004, S. 16-20

Für die Fahrstreifendetektion ist eine Erfassung der Fahrbahnverläufe erforderlich, die in der Zielanwendung potentiell auftreten können. Diese wiederum sind in der Richtlinie RAS-L⁴ für unterschiedliche Straßentypen vorgegeben. Dabei wird eine Straße in Abhängigkeit ihrer Lage und Funktion in die Kategorien A bis E eingeteilt, wobei eine Gültigkeit der Norm ausschließlich für die Kategorien A („anbaufreie Straßen außerhalb bebauter Gebiete mit maßgebender Verbindungsfunktion“) und B („anbaufreie Straßen im Vorfeld und innerhalb bebauter Gebiete mit maßgebender Verbindungsfunktion“) besteht. Die Kategorien A und B decken die für diese Arbeit relevanten Autobahnen und Bundesstraßen ab, weitere Richtlinien beschreiben die Anlage anderer Straßentypen^{5,6}. Für den Lageplan einer Straße werden die Gerade und der Kreis als Hauptkonstruktionselemente eingesetzt. Um einen Übergang ohne Sprung in der Fahrbahnkrümmung zu ermöglichen werden Kreis und Gerade durch die Klothoide ineinander überführt. Die Geschwindigkeit, für die eine Fahrbahn ausgelegt wird, nennt sich Entwurfsgeschwindigkeit. In Abhängigkeit der Entwurfsgeschwindigkeit v_E sowie der Straßenkategorie sind in der RAS-L Mindeststradien⁷ vorgegeben. Für die vorgesehene Anwendung auf Autobahnen und Bundesstraßen ist die Erfassung von Markierungen bis zu einem minimalen Kurvenradius von 80 m erforderlich. In Abhängigkeit dieses Radius lässt sich bei bekannter Detektionsreichweite der Sensorik der horizontale Öffnungswinkel berechnen, bei dem die Markierung noch im Erfassungsbereich liegt. Diese Detektionsreichweite wird erst im weiteren Verlauf der Arbeit genauer untersucht. Aus diesem Grund wird vorerst eine theoretische Entfernung ermittelt, bis zu der eine Fahrstreifeninformation im Stop&Go-Verkehr erforderlich ist.

Die allgemeinste Anforderung an die Zielauswahl einer Abstandsregelung ist die rechtzeitige Detektion eines relevanten Objekts. Dabei stellt ein Objekt, das im Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs steht, den Extremfall im Hinblick auf die potentiell auftretende Relativgeschwindigkeit dar. Es lässt sich der benötigte Bremsweg und damit die Distanz berechnen, ab der ein solches Objekt als relevant klassifiziert werden muss, damit die Abstandsregelung noch reagieren kann. Ansprech- und Schwellzeit der Bremse werden jeweils zu 0,5 s gewählt. Auf Basis einer Bremsverzögerung von 5 m/s^2 ergibt sich nach Winner⁸ der in Abbildung 2.1 dargestellte Bremsweg (fett gestrichelt) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Verzögerungsbeginn. Bei einer Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs von 50 km/h ist die Klassifikation eines stehenden Objekts in einer Entfernung von ca. 30 m erforderlich, um bei der zugrunde gelegten Bremsverzögerung einen Unfall noch verhindern zu können.

⁴Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Linienführung, 1995, S. 1ff

⁵Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Anlage von Hauptverkehrsstraßen, 1993, S. 1ff

⁶Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Anlage von Erschließungsstraßen, 1995, S. 1ff

⁷Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Linienführung, 1995, S. 14–15

⁸Winner: Skriptum Kraftfahrzeuge I, 2003, S. 263–268

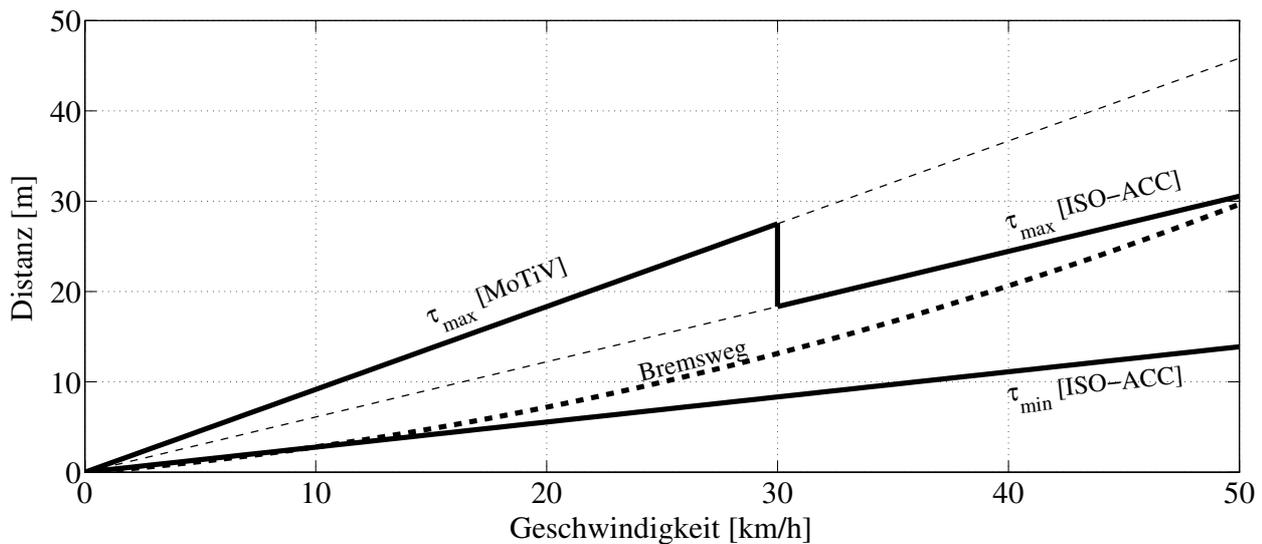


Abbildung 2.1: Stop&Go-Relevante Zeitlücken und Bremsweg ($a = -5 \text{ m/s}^2$, $t_a = 0,5 \text{ s}$, $t_s = 0,5 \text{ s}$)

Die beschriebene Situation eines Objekts, das im eigenen Fahrstreifen steht, stellt einen Sonderfall dar. Dieser liegt vor allem für ein- oder ausscherende Fahrzeuge so nicht vor, weil für den Fahrstreifenwechsel zumindest eine geringe Eigengeschwindigkeit des Objekts notwendig ist. Um auch auf diese Objekte rechtzeitig reagieren zu können, wird in einem zweiten Beispiel von einer stationären Fahrgeschwindigkeit ausgegangen, bei der ein Fahrzeug unbeschleunigt mit einer konstanten Zeitlücke τ zum Ego-Fahrzeug voraus fährt. Der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ist in Abbildung 2.1 für zwei unterschiedliche Zeitlücken dargestellt (jeweils fett durchgezogen). Die minimale Zeitlücke τ_{\min} wird dabei mit 1,0 s am unteren Rand der nach ISO/FDIS 15622 einstellbaren Zeitlücke⁹ für ACC-Systeme gewählt. τ_{\max} hingegen wird in zwei Bereiche eingeteilt. Im unteren Bereich bis 30 km/h wird eine in MoTiV¹⁰ für diesen Geschwindigkeitsbereich im Mittel gemessene Zeitlücke von 3,3 s verwendet. Ab einer Geschwindigkeit von 30 km/h wird die Kurve durch den oberen Richtwert $\tau = 2,2 \text{ s}$ der Norm für die Zeitlücke eines ACC-Systems weitergeführt. Bei einer maximalen Geschwindigkeit von 50 km/h ergibt sich so insgesamt ein Abstand zum Vordermann von maximal 30 m, innerhalb dessen sich ein Ein- oder Ausschermanöver abspielen kann.

Für die gesuchte, theoretische Entfernung der Fahrstreifendetektion vor dem Fahrzeug wird daher ein Wert von 30 m gewählt. In Verbindung mit dem zuvor geforderten Mindestradius von 80 m ergibt sich ein lateraler Erfassungsbereich zu jeder Seite von ca. 6 m. Hinzu kommt die Fahrstreifenbreite, die in Anlehnung an die Richtlinie¹¹ RMS2 zu ebenfalls 6 m gewählt wird. Dadurch werden sowohl die in Deutschland üblichen Fahrstreifenbreiten als auch ein dezentriertes Fahren innerhalb des Fahrstreifens berücksichtigt. Abbildung 2.2 fasst die Anforderungen an den horizontalen Sensor-Erfassungsbereich grafisch zusammen.

⁹ISO: ISO ACC, 2002, S. 6

¹⁰MoTiV – Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr: Abschlussbericht MoTiV, 2000, S. 15

¹¹Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Anwendung von Fahrbahnmarkierungen, 1980, S. 9

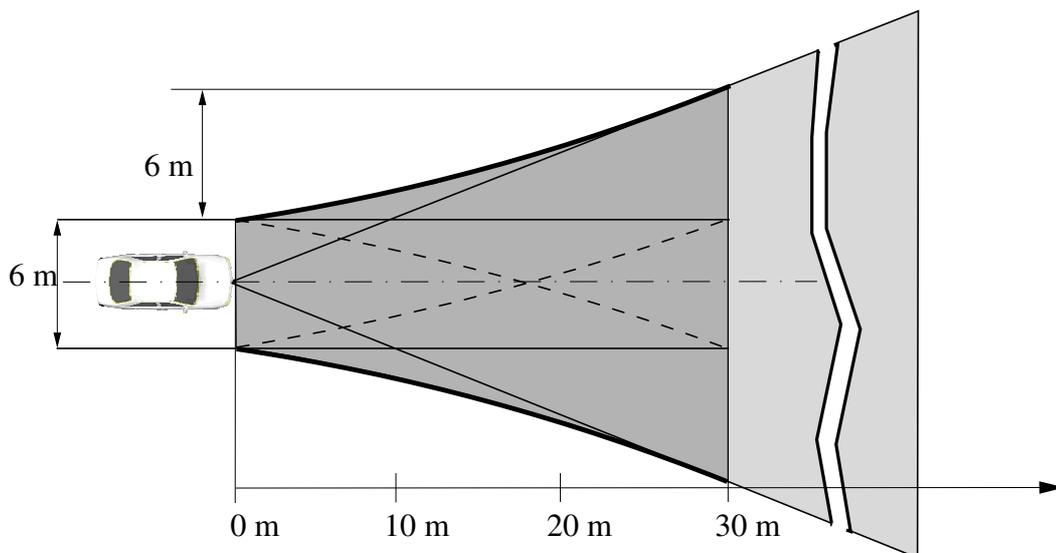


Abbildung 2.2: Theoretische Anforderungen an den horizontalen Sensor-Erfassungsbereich

Ein weiterer Aspekt für die Qualität von Objekt- und Markierungsdetektion ist die horizontale Auflösung zwischen den einzelnen Laserstrahlen. Je höher diese ist, desto besser ist zum einen die Bestimmung von Position und Breite eines Objekts. Zum anderen steigt mit der Auflösung auch die Anzahl der Laserstrahlen, die auf die Markierung treffen und somit der Informationsgehalt einer Messung.

2.1.2 Vertikaler Erfassungsbereich

Aus Sicht der Objekterkennung besteht für den vertikalen Erfassungsbereich die Forderung, dass auch bei einer Nickbewegung des Fahrzeugs keine Objektverluste auftreten. Typische Nickwinkel¹² im Stop&Go-Verkehr führen auf einen vertikalen Erfassungsbereich von maximal $\pm 4^\circ$. Wichtiger in Bezug auf den vertikalen Erfassungsbereich ist die Detektion der Markierung und das Ziel der darauf aufbauenden Fahrstreifenschätzung. Eine Fahrstreifenmarkierung kann nur mit einer Messebene detektiert werden, die auf die Fahrbahn ausgerichtet ist. Bei gleichzeitiger Objektdetektion werden so zumindest zwei Messebenen benötigt. Zur Bestimmung der Fahrstreifenkrümmung ist die Position der Markierung an mindestens drei unterschiedlichen Stellen notwendig. Auch drei Messebenen können in Situationen gestrichelter Markierungen zu wenig sein. Eine Möglichkeit, die Mindestanzahl an Messebenen im Voraus zu bestimmen, ist anhand eines Verfahrens möglich, das in Kapitel 3.4 vorgestellt wird. Weil jedoch die Anzahl der Messebenen im Wesentlichen durch die Verfügbarkeit der Sensorik bestimmt ist, soll hier zunächst eine Anzahl größer eins gefordert werden. Insgesamt besteht die Forderung, dass der vertikale Erfassungsbereich eine Detektion im gesamten Bereich ermöglicht, der auch durch den horizontalen Erfassungsbereich abgedeckt wird. So

¹²Hanau: Bestimmung der Fahrzeugaufbaubewegung, 2004, S. 46

ergibt sich als wünschenswerter, vertikaler Erfassungsbereich ein Wert von bis zu 94° (siehe Abbildung 2.3).

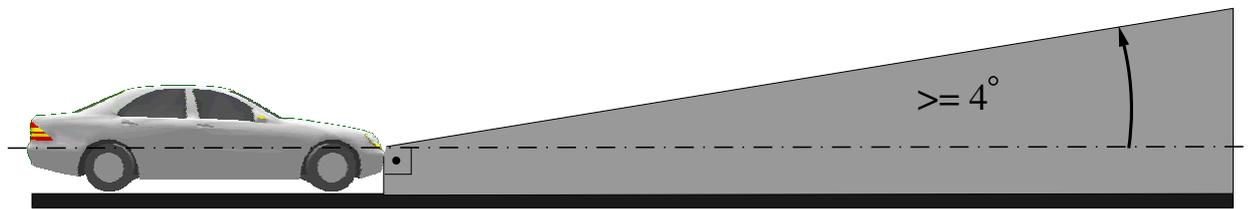


Abbildung 2.3: Theoretische Anforderungen an den vertikalen Sensor-Erfassungsbereich

Für die vertikale Auflösung gilt: je höher sie ist, desto genauer ist der Auftreffbereich¹³ des Strahls und damit die Position der Markierung bekannt. Auch hier ist deswegen eine möglichst hohe Auflösung notwendig.

2.2 Systemintegration im Versuchsträger

Die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel wurden dazu verwendet, eine Auswahl der Sensorik vorzunehmen sowie eine Sensorkonstellation am Versuchsträger zu definieren. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden dargelegt.

2.2.1 Sensorkonstellation

Der in Kapitel 2.1 ermittelte Sensor-Erfassungsbereich stellt den Idealfall dar. In Abhängigkeit von Typ, Anzahl und Positionierung der Sensorik lässt sich dieser Idealfall mehr oder weniger gut annähern. Eine lückenlose Abdeckung erfordert allerdings eine entsprechend hohe Anzahl an Sensoren. Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Markierungsdetektion und eine darauf aufbauende Ermittlung des Fahrstreifenverlaufs bei gleichzeitiger Gewährleistung einer Objektdetektion. Eine wichtige Anforderung an die Sensorik ist deshalb die Verwendung mehrerer, vertikal unterschiedlich ausgerichteter Messebenen. Schon dadurch schränkt sich die Auswahl potentieller Sensorik sehr stark ein. Mit dem gleichzeitigen Wunsch nach Verwendung einer Seriensensorik sowie dem notwendigen Zugriff auf einen Großteil der Messdaten fiel die Wahl auf den Denso WA-C01. Abbildung 2.4 fasst die wichtigsten Eckdaten des Sensors zusammen, der in sechs vertikal um $1,57^\circ$ versetzten Messebenen scannt und dabei eine sehr hohe, horizontale Strahlaufösung von $0,1^\circ$ bietet.

¹³Der geschilderte Einfluss wird an dieser Stelle postuliert und in Kapitel 3.2.3 ausführlicher betrachtet.

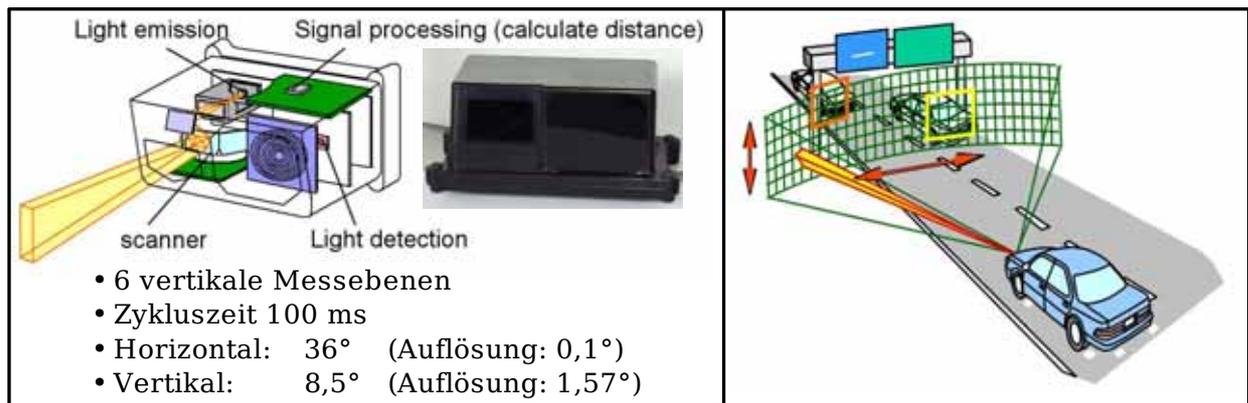


Abbildung 2.4: Spezifikation des Denso WA-C01¹⁴

Der Sensor wird bei Toyota in einem Serien-ACC eingesetzt, d. h. die verwendete Technologie ist günstig verfügbar. Des Weiteren können die geforderten Detektionsreichweiten vorausgesetzt werden, die im Stop&Go-Verkehr geringer sind als im Fall eines herkömmlichen ACC. Der horizontale Öffnungswinkel beträgt 36°, die Ausgangsleistung des Laserstrahls sinkt jedoch im Bereich über 10° von der Sensormittelachse signifikant ab. Dieser Leistungsabfall wird von Denso mit Hilfe einer Kurve in Abhängigkeit vom Austrittswinkel des Strahls angegeben und wird im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigt. Dies, der nach Kapitel 2.1 geforderte Erfassungsbereich sowie das Ziel eine möglichst geringe Anzahl an Sensoren zu verwenden, führten zu der Sensoranordnung gemäß Abbildung 2.5.

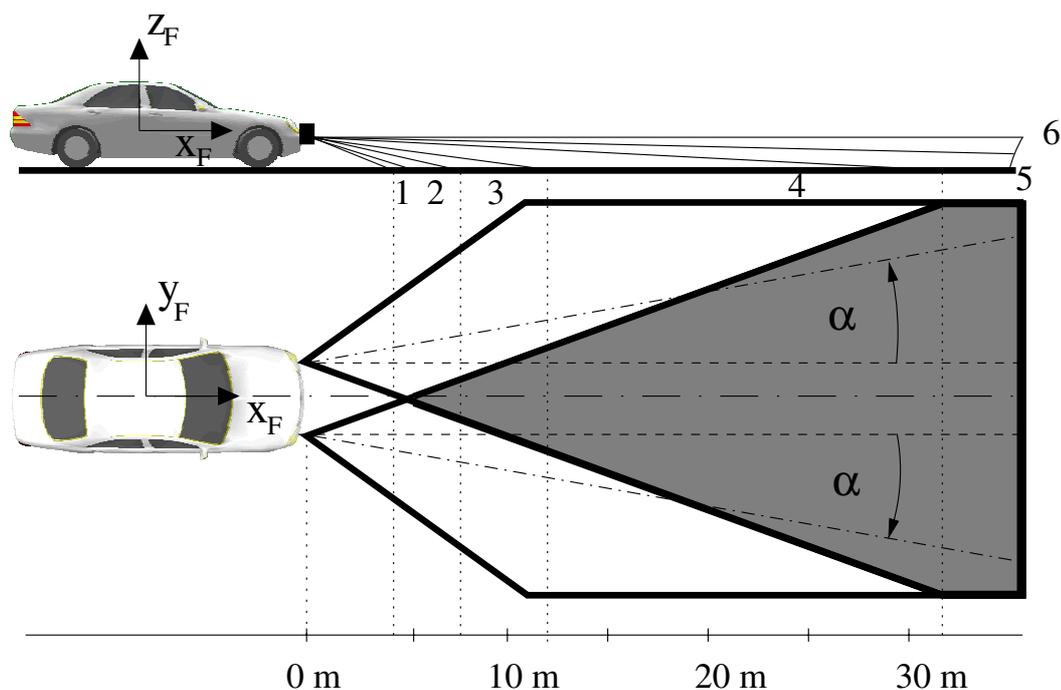


Abbildung 2.5: Sensorkonstellation

¹⁴Denso Corporation: Denso WA-C01, 2003, S.1

Die gewählte Konstellation besteht aus zwei Sensoren, was zum einen dem starken Leistungsabfall der Sensorik im seitlichen Erfassungsbereich, zum anderen den Anforderungen einer möglichst guten Erfassung der benachbarten Fahrstreifen Rechnung trägt. Die oberste der sechs vorhandenen Messebenen beider Sensoren wird horizontal ausgerichtet und zur Objekterkennung verwendet. Die Ausrichtung der restlichen Messebenen ist dadurch nicht mehr frei wählbar. Die gewählte Konstellation legt bei der Ausrichtung der Sensorik bewusst einen Schwerpunkt auf die Markierungsdetektion, möglicherweise resultierende Nachteile für die Objekterkennung bei einer Nickbewegung des Fahrzeugs werden in Kauf genommen. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die einzelnen Messebenen über die Ziffern eins bis sechs gemäß Abbildung 2.5 referenziert. Beide Sensoren sind um den Winkel α „nach außen“ gedreht, der so entstehende Öffnungswinkel von ca. 50° erfüllt die Anforderungen, die durch die Objekterkennung gestellt werden. Direkt vor dem Fahrzeug entsteht eine Zone ($\approx 2,5 \text{ m}^2$), die nicht durch die Sensorik abgedeckt ist und in der schmale und kurze Objekte „verschwinden“ können. Bevor ein Objekt in diese Zone gelangt, bewegt es sich allerdings zuerst durch den Sensorerfassungsbereich hindurch. Über die Objekterkennung können deswegen gegebenenfalls Vorkehrungen getroffen werden, die ein Fehlverhalten des Systems verhindern. Im Zentrum des Erfassungsbereichs liegt ein Gebiet, das durch beide Sensoren abgedeckt wird. Dadurch entsteht eine Redundanz in der Objekterkennung in einem Bereich, der für die Abstandsregelung am wichtigsten ist.

2.2.2 Gesamtsystem

Die Sensorkonstellation gemäß Abbildung 2.5 wurde in einen Versuchsträger MB W210 der DaimlerChrysler AG integriert (Abbildung 2.6). Die Sensoren sind auf einer zusätzlichen Schiene montiert, die an der Stoßstange befestigt ist. Zu jedem Messpunkt sendet der jeweilige Sensor die ermittelte Distanz d_S und den Intensitätswert I_S an einen Laptop. Die Daten werden für einen kompletten Messzyklus von 100 ms gesammelt und inklusive Zeitstempel via Ethernet an einen im Kofferraum verbauten Linux-PC übermittelt. Auf dem Linux-PC stehen neben den Lidardaten auch die Fahrzeugdaten vom CAN-Bus zur Verfügung. Dabei sind vor allem Informationen zu den einzelnen Raddrehzahlen ω_F , der Gierrate $\dot{\psi}_F$, dem Lenkwinkel δ_F sowie dem aktuellen Gang i_F der Automatik relevant. Grob vereinfacht lassen sich drei Module unterscheiden, die auf dem Linux-PC umgesetzt sind: Objekterkennung, Fahrstreifenerkennung und Fahrstreifenzuordnung. Die Objekterkennung wird auf Basis der Daten aus Messebene Sechs beider Sensoren durchgeführt, die restlichen Messebenen werden in der Fahrstreifenerkennung verwendet. Die Ergebnisse aus diesen zwei Modulen lassen sich anschließend für die Zuordnung der detektierten Objekte zum Fahrstreifen verwenden.

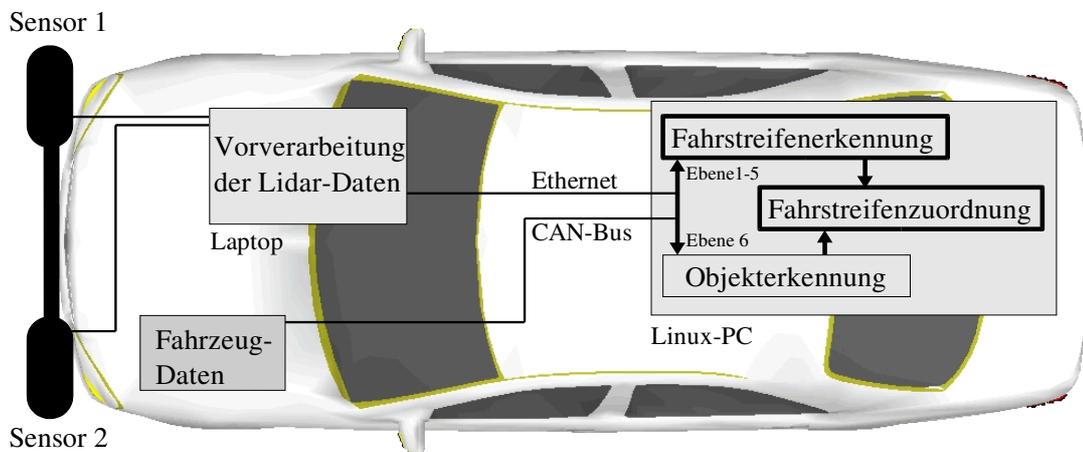


Abbildung 2.6: Versuchsträger MB W210

Die Objekterkennung nutzt das bewährte Verfahren der modellbasierten Mehrzielverfolgung auf Basis eines Kalman-Filters¹⁵. Eigenschaften und dynamisches Verhalten eines Objekts werden dabei durch ein nicht notwendigerweise für jedes Objekt gleiches Modell beschrieben. Die einzelnen Messpunkte eines neuen Scans werden zunächst zu Segmenten zusammengefasst. Mit Hilfe des Modells wird eine zeitliche Prädiktion aller schon detektierten Objekte auf den aktuellen Scan durchgeführt. Anschließend werden die Segmente den prädizierten Objekten zugeordnet. Ein Segment, dem kein Objekt zugeordnet werden konnte, initialisiert ein neues Objekt. Ein Objekt, dem eine bestimmte Zeit lang kein Segment zugeordnet werden konnte, wird gelöscht. Ein Vorteil bei der Verwendung eines Modells besteht darin, dass Objektzustände wie z. B. die Geschwindigkeit geschätzt werden können, ohne dass sie wie im Falle des Lidarsensors direkt gemessen wurden. Der Zustandsvektor \vec{x}_o fasst die wichtigsten Eigenschaften eines Objekts, im vorliegenden Fall Position, Geschwindigkeit, Breite und

¹⁵Kirchner: Sensordatenverarbeitung eines Laserscanners, 2000, S. 23–39

Länge, zusammen:

$$\vec{x}_o = [x_o \ y_o \ v_{x,o} \ v_{y,o} \ b_o \ l_o]^T \quad (2.1)$$

Die Position eines Objekts wird durch den Mittelpunkt der hinteren Objektkante (Fahrzeugheck) beschrieben. Seine Geschwindigkeit geht als Absolutwert in das Modell ein. Im Gegensatz zu Kirchner¹⁶ verwendet die vorliegende Arbeit zwei nicht synchronisierte Sensoren mit nicht deckungsgleichen Erfassungsbereichen. Dadurch notwendige Anpassungen der durch Kirchner¹⁷ beschriebenen Mehrzielverfolgung können der Arbeit von Eisenhardt¹⁸ entnommen werden. Der Zustandsvektor \vec{x}_o nach Gl. (2.1) wird im Folgenden für jedes Objekt als bekannt vorausgesetzt.

2.3 Fazit

Der für eine lidarbasierte Fahrstreifenzuordnung theoretisch zu fordernde Erfassungsbereich wurde auf Basis der Anforderungen, die sich aus der Zielanwendung ergeben, definiert. Für die anschließende Auswahl der Sensorik ist vor allem eine hohe Anzahl an vertikalen Messebenen von Bedeutung, da nur so die Detektion der Markierung an unterschiedlichen Positionen bei gleichzeitiger Erfassung anderer Fahrzeuge möglich ist. Es wurde eine Sensorkonstellation gewählt und in einen Versuchsträger integriert. Bei dieser Integration wurde versucht, die zuvor ermittelten, theoretischen Anforderungen weitestgehend zu erfüllen. Dabei orientiert sich die gewählte Sensorkonstellation jedoch stark an der Sensorik, die zum Zeitpunkt der Arbeit verfügbar war. Ein Teil der Ergebnisse, die im weiteren Verlauf der Arbeit erzielt werden, ist damit sensorabhängig und kann nicht ohne weiteres verallgemeinert werden. Soweit möglich werden jedoch allgemeine, sensorunabhängige Aussagen angestrebt. Als Seriensensor bildet die verwendete Sensorik eine realistische Referenz für die Umsetzbarkeit und die Übertragbarkeit der angestrebten Fahrstreifenzuordnung im Stop&Go-Verkehr.

¹⁶Kirchner: Sensordatenverarbeitung eines Laserscanners, 2000, S. 12–17

¹⁷Kirchner: Sensordatenverarbeitung eines Laserscanners, 2000, S. 23–39

¹⁸Eisenhardt: Datenfusion für zwei Lidar-Sensoren, 2005, S. 1ff

3 Lidarbasierte Markierungsdetektion

Erfahrung auf dem Gebiet der lidarbasierten Markierungsdetektion vor dem Fahrzeug gibt es bislang noch wenig. Im Folgenden wird daher in einem ersten Schritt auf die wichtigsten Eigenschaften heutiger Fahrbahnmarkierungen im Hinblick auf deren Detektion durch einen Lidarsensor eingegangen. In einem zweiten Schritt werden auf Ebene eines einzelnen Laserstrahls die Einflüsse der Sensorausrichtung und der Sensorwahl auf die Qualität der Messung untersucht. Dabei wird ein besonderer Schwerpunkt auf die mögliche Detektionsreichweite gelegt. Aufbauend auf diesen Untersuchungen wird die Detektion und Interpretation einer Markierung in einer Messebene des Lidarsensors diskutiert. Abgerundet wird das Kapitel durch Messungen zur Verfügbarkeit der entwickelten Markierungsdetektion auf deutschen Straßen.

3.1 Reflexionseigenschaften einer Fahrbahnmarkierung

Der Lidarsensor sendet als aktiver Sensor einen Lichtimpuls aus und wertet dessen Reflexion an einem Objekt aus. Die Detektion der Markierung hängt daher entscheidend von ihren Reflexionseigenschaften ab. Reflexion beschreibt die Eigenschaft eines Stoffes, den auf eine Grenzfläche fallenden Lichtstrom Φ in eine bestimmte Richtung zurückzuwerfen. Es wird zwischen der vollkommen gestreuten, der gemischten und der gerichteten Reflexion unterschieden (siehe Abbildung 3.1).

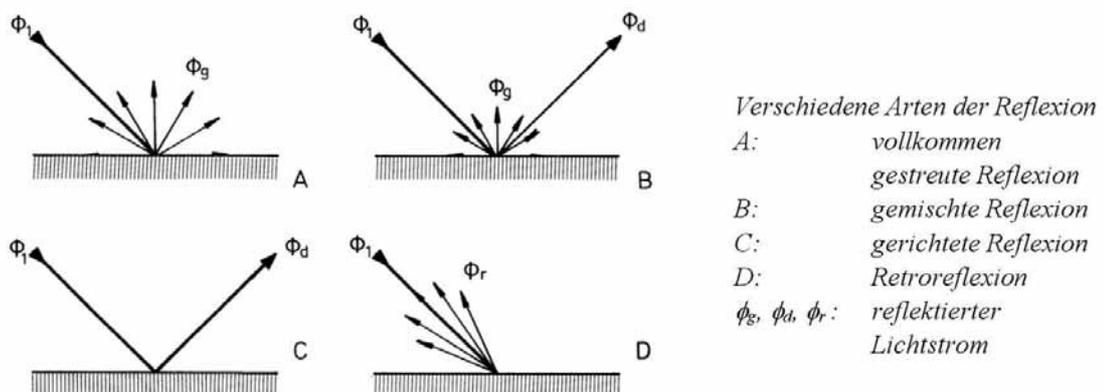


Abbildung 3.1: Verschiedene Arten der Reflexion¹

¹Wambsganss: Lichttechnische Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen, 1996, S.11

Einen Sonderfall der gerichteten Reflexion stellt die Retroreflexion dar, bei der die Orientierung der reflektierten Strahlung nahe der Einfallrichtung liegt (Abbildung 3.1 D). Durch Verwendung retroreflektierender Materialien (z. B. Reflektoren) lässt sich im Straßenverkehr eine gute Sichtbarkeit von z. B. Schildern bei Anleuchtung mit Scheinwerferlicht erreichen. Ein zur Objekterkennung verwendeter Lidarsensor profitiert ebenfalls von den retroreflektiven Eigenschaften von Schildern oder auch Fahrzeug-Heckscheinwerfern durch eine besonders gute Detektion. Dabei wirkt sich zusätzlich die Tatsache positiv aus, dass der Auftreffwinkel zwischen Strahl und Flächennormalen in der Regel recht klein ist, d. h. auch nicht retroreflektierende Materialien mitunter aufgrund der Totalreflexion an einer spiegelnden Schicht Signale liefern.

In der vorgelegten Arbeit soll eine Markierung detektiert werden. Es werden daher zunächst die Reflexionseigenschaften von Fahrbahnmarkierungen betrachtet. Diese sind durch die europäische Norm² EN 1436 festgelegt, deren Grenzwerte dem Fahrer sowohl bei Tag als auch bei Nacht eine hohe Sichtbarkeit gewährleisten. Der Leuchtdichtkoeffizient R einer Oberfläche beschreibt dabei ihre Leuchtdichte L , in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke E gemäß

$$R = \frac{L}{E} . \quad (3.1)$$

Die Beleuchtungsverhältnisse am Tag und in der Nacht sind unterschiedlich, weswegen jeweils unterschiedliche Leuchtdichtkoeffizienten definiert sind. Am Tag beleuchtet allein das Umgebungslicht die Straße und macht die Fahrbahn sowie die darauf aufgebrachte Markierung sichtbar für das menschliche Auge. Die Reflexionseigenschaften einer Markierung werden deswegen über den Leuchtdichtkoeffizienten bei diffuser Beleuchtung Q_d (mcd/m²lx) beurteilt und gemessen. In der Nacht ist hauptsächlich die Fähigkeit zur Retroreflexion des einfallenden Scheinwerferlichts ausschlaggebend für die Sichtbarkeit eines Stoffes für den Fahrer. Hier wird deswegen der Leuchtdichtkoeffizient bei Retroreflexion R_L (mcd/m²lx) verwendet. Für beide beschriebenen Leuchtdichtkoeffizienten sind durch die Norm³ sowohl Messverfahren als auch Richtwerte angegeben. Zur Detektion einer Fahrbahnmarkierung vor dem Fahrzeug wird der Lidarsensor schräg auf die Fahrbahn gerichtet. In Analogie zu einer Ausleuchtung durch Scheinwerferlicht, ist für einen Lidarsensor daher vor allem die Retroreflektivität der Markierung ausschlaggebend. Um Markierung und Fahrbahn unterscheiden zu können ist ein signifikanter Unterschied in R_L erforderlich. Gerade auch für die Markierungsdetektion ist es somit von großem Interesse, durch welche Faktoren die Retroreflektivität beeinflusst wird. Einen wichtigen Sonderfall für die Sichtbarkeit einer Markierung stellt vor diesem Hintergrund eine nasse Straße dar. Auf Fahrbahn und Markierung bildet sich ein Wasserfilm, an dem das einfallende Licht reflektiert wird, bevor es überhaupt auf die Markierung treffen kann⁴. Da so vor allem eine gerichtete Reflexion gemäß Abbildung 3.1 C auftritt, ist

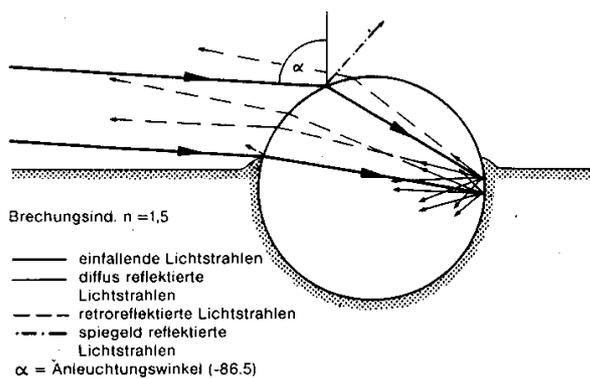
²CEN Europäisches Komitee für Normung: Anforderungen an Markierungen, 1997, S. 3–4

³CEN Europäisches Komitee für Normung: Anforderungen an Markierungen, 1997, S. 2–9

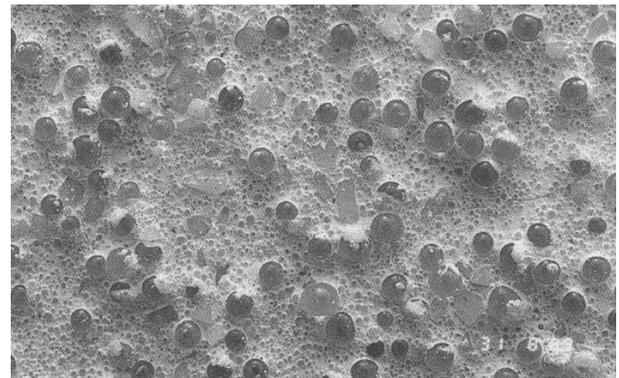
⁴Meseberg, Seliger: Nachtsichtbarkeit bei Nässe, 1993, S. 34

die Retroreflektivität der Markierung und damit ihre Nachtsichtbarkeit eingeschränkt. Die gleiche Situation am Tag ist oft weniger problematisch für den Fahrer, weil die Markierung durch die noch vorhandene diffuse Tagesbeleuchtung länger sichtbar bleibt. Zahlreiche Arbeiten^{5,6} haben sich mit der Verbesserung der Nachtsichtbarkeit einer Markierung, vor allem bei Nässe auseinandergesetzt. Die Vorschläge reichen von teilweise in die Markierung eingebrachten Reflexionsperlen, über Markierungsknöpfe bis hin zu profilierten Markierungen. Bei den genannten Lösungen wird versucht, durch eine Erhöhung der Markierung Teile der retroreflektierenden Materialien auch bei Nässe noch außerhalb des Wasserfilms und damit erreichbar für das Scheinwerferlicht zu positionieren. Eine Gesamthöhe des Profils von 7 mm darf dabei jedoch nicht überschritten werden, um eine zusätzliche Gefährdung von Zweirädern zu vermeiden.

Zur Einhaltung der festgelegten Grenzwerte für Retroreflexion bei Nässe, werden vor allem die Reflexionsperlen (siehe Abbildung 3.2) mittlerweile auf vielen deutschen Straßen eingesetzt⁷.



(a) Funktionsprinzip



(b) Struktur

Abbildung 3.2: Reflexionsperlen zur Verbesserung der Nachtsichtbarkeit einer Markierung⁸

Das einfallende Licht dringt in eine zum Teil in die Markierung eingelassene Glasperle ein und wird an deren Rückwand retroreflektiert. Solange die Perle den vorhandenen Wasserfilm noch überragt, ist eine Detektion der Markierung möglich. Sobald jedoch die eingebrachten Reflexionsperlen ebenfalls mit Wasser bedeckt sind, ist keine Nachtsichtbarkeit mehr gewährleistet. Die retroreflektiven Eigenschaften heutiger Fahrbahnmarkierungen und damit die Möglichkeit diese mit einem Lidarsensor zu detektieren, werden maßgeblich durch die eingebrachten Reflexionsperlen bestimmt.

⁵Wambsganss: Lichttechnische Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen, 1996, S. 1ff

⁶Meseberg, Seliger: Nachtsichtbarkeit bei Nässe, 1993, S. 1ff

⁷Meseberg, Seliger: Nachtsichtbarkeit bei Nässe, 1993, S. 34

⁸Meseberg, Seliger: Nachtsichtbarkeit bei Nässe, 1993, S. 34-39

Ein Problem beim Einsatz von Reflexionsperlen auf öffentlichen Straßen ist deren Abnutzung durch Überrollung. Mit zunehmender Anzahl an Radüberrollungen kann die Retroreflektivität einer Markierung um teilweise bis zu 50 % sinken⁹. Weil die Abnutzung nicht verhindert werden kann, werden den verantwortlichen Dienststellen in Deutschland im Rahmen der ZVT M02, Richtwerte zur Erhaltung der Markierungsqualität vorgegeben¹⁰, die sich an der Norm EN 1436 orientieren. Durch regelmäßige Prüfungen (Messmethoden siehe Meseberg¹¹) werden die Streckenabschnitte ermittelt, deren Leuchtdichtekoeffizienten die vorgegebenen Grenzwerte nicht mehr erfüllen. Basierend auf dieser Inventarisierung von Fahrbahnmarkierungen werden gezielt Neumarkierungen durchgeführt. Hirsche¹² beschreibt diesbezügliche Vorgehensweisen im Ausland.

3.2 Messung mit einem fahrbahnorientierten Laserstrahl

Die Ausrichtung der Lidarsensorik in der vorgelegten Arbeit entspricht nicht der Nutzung des Sensors in einem ACC-System. Des Weiteren trifft auch keine der Messebenen senkrecht auf die Fahrbahn, wie dies in der Regel bei der lidarbasierten Objektdetektion der Fall ist. Zu der geplanten Verwendung der Sensorik liegen daher wenig Erfahrungen vor, weswegen in diesem Kapitel zunächst die Einflüsse untersucht werden, denen ein einzelner Laserstrahl im vorliegenden Fall ausgesetzt ist. Dabei wird vor allem das Zusammenspiel aus Sensorposition, Markierungsbeschaffenheit und Sensorwahl genauer beleuchtet. Obwohl der Sensor und seine Einbauhöhe für diese Arbeit feststehen, wird so eine bessere Einschätzung der potentiellen Detektionsreichweite der Sensorik ermöglicht. Im Anschluss wird auf theoretischer Ebene die Messgenauigkeit diskutiert, die mit der verwendeten Sensorik zu erwarten ist.

3.2.1 Einfluss der Sensorposition und der Markierungsbeschaffenheit

Entscheidend für einen möglichen Serieneinsatz des entwickelten Systems sind die Parameter, die die Messung und damit die erzielbare Reichweite der Markierungsdetektion beeinflussen. Als Bewertungskriterium wird dafür in der folgenden Untersuchung das unbearbeitete Sensorausgangssignal der Rückstrahlintensität I_S herangezogen. Je höher der Betrag von I_S ist, desto größer ist der betragliche Abstand zum Grundrauschen der Messung und damit der Nutzen des Signals für die Markierungsdetektion. Der Betrag der Rückstrahlintensität folgt nach Angaben des Herstellers der Lidargleichung, welche wiederum die vom Detektor empfangene Energie in Abhängigkeit der ausgesandten Energie beschreibt. Auf Basis der Lidargleichung sinkt die empfangene Energie mit der vierten Potenz der reziproken Distanz zum Objekt

⁹Meseberg, Seliger: Nachtsichtbarkeit bei Nässe, 1993, S. 38

¹⁰von Rymon Lipinski: ZTV M02, 2002, S. 1ff

¹¹Meseberg, Goerner: Messung der Retroreflexion, 1984, S. 1ff

¹²Hirsche, Tenzinger: Inventarisierung von Fahrbahnmarkierungen, 1984, S. 1ff

ab. Der gemessene Photostrom sinkt in gleichem Maße¹³. Kapp¹⁴ beschreibt, dass sich diese Abhängigkeit auf die zweite Potenz reduziert, wenn der Laserstrahl stark fokussiert bzw. kollimiert ist. Unabhängig von der tatsächlichen Höhe des Einflusses im vorliegenden Fall, ist eine Abhängigkeit von der Distanz zum Objekt zu erwarten. Neben dem Einfluss der Distanz ist mit Einflüssen auf die Detektionsreichweite vor allem durch die Sensorik selbst, durch ihre Position und Ausrichtung sowie durch die Beschaffenheit der Markierung zu rechnen¹⁵. Eine genauere Betrachtung dieser Einflussparameter ist sowohl für die Wahl der Sensoreinbauposition als auch für die Abschätzung der Verfügbarkeit der lidarbasierten Markierungsdetektion von Bedeutung. Der Einfluss der Sensorik selbst, wird in diesem Kapitel zunächst noch zurückgestellt. Unter der Annahme einer festen Einbauposition der Sensorik am Fahrzeug, bleiben als Einflussfaktoren auf die Detektionsreichweite vor allem der Auftreffwinkel des Strahls auf der Markierung sowie ihre Beschaffenheit übrig. Es wird davon ausgegangen, dass der Betrag der Rückstrahlintensität mit wachsendem Auftreffwinkel κ zwischen Strahl und Oberflächennormalen der Markierung sinkt. Ab einem Grenzwinkel κ_G wäre so keine Detektion mehr möglich. Es lässt sich weiter vermuten, dass eine hohe Retroreflektivität der Objektoberfläche in einem ansteigenden Grenzwinkel κ_G resultiert und damit die Reichweite der Markierungsdetektion erhöht wird. Im Umkehrschluss sinkt die Verfügbarkeit der Markierungsdetektion mit sich verschlechternden Retroreflexionseigenschaften der Markierung.

Die formulierten Vermutungen wurden in einem Versuch überprüft, dessen Aufbau eine getrennte Beobachtung der Einflüsse gewährleistet, die durch Distanz, Oberfläche und Auftreffwinkel entstehen. Als Messobjekt wurde ein handelsüblicher Verpackungskarton (BxHxT: 63 cm x 80 cm x 12 cm) verwendet, dessen Oberfläche ausreichend groß gewählt ist, um auch in einer Distanz von mindestens 18 m von mehr als einem Laserstrahl komplett getroffen zu werden (theoretische Strahlaufrefffläche in 18 m ca. BxH: 3 cm x 50 cm). In Distanzschritten von jeweils zwei Metern ($2 \text{ m} \leq d_K \leq 18 \text{ m}$) wurde der Karton derart ausgerichtet, dass sich Sensorachse und vertikale Achse der Kartonoberfläche im Punkt P schneiden (siehe Abbildung 3.3). Der Karton wurde jeweils um die vertikale Achse im Punkt P gedreht, ohne dass sich dabei der Schnittpunkt zwischen der Sensorachse x_S und der Messoberfläche ändert. Mit Hilfe eines Laserpointers, der auf dem Sensor montiert ist, wurde sichergestellt, dass die Sensorausrichtung für jede Messung gleich ist. Bei dem gewählten Messaufbau ändert sich für den in der Sensormitte liegenden Strahl durch die Rotation des Kartons nur der Auftreffwinkel κ , die Entfernung d_S bleibt gleich. Für unterschiedliche Ausrichtungen ($\kappa = [0^\circ \ 30^\circ \ 60^\circ \ 70^\circ \ 80^\circ \ 85^\circ]$) wurden je 200 Einzelscans aufgenommen. Ausgewertet wurde ausschließlich der Strahl, der im Punkt P auf den Karton trifft. Die Messungen wurden in einem ersten Durchgang mit einem unbehandelten Karton durchgeführt.

¹³Winner: Adaptive Cruise Control, 1999, S. 14

¹⁴Kapp, Brugger: Miniaturisierter Laserscanner, 2004, S. 3

¹⁵SICK AG: Telegramm-Spezifikation, 2002, S. 101

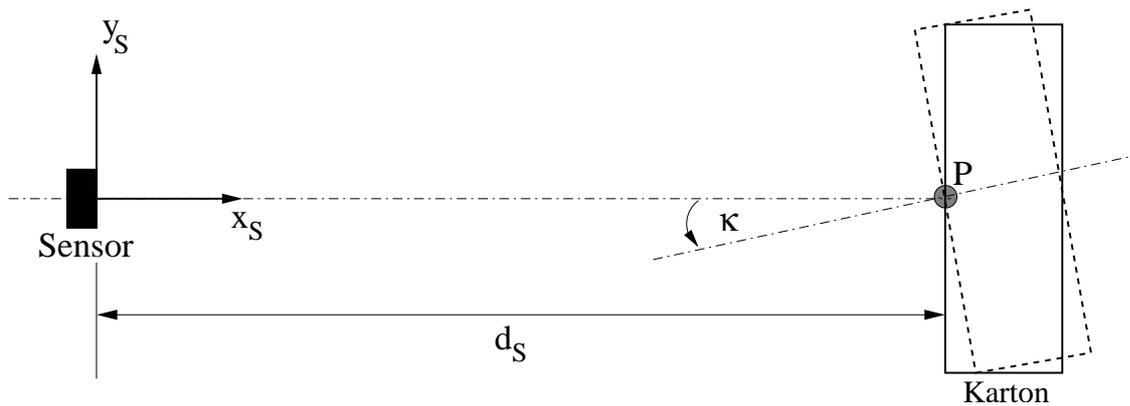


Abbildung 3.3: Messaufbau

In einem zweiten Durchgang wurde die Kartonoberfläche mit einer vorübergehend aufbringbaren Markierung¹⁶ beklebt, wie sie z. B. oft zur Markierung im Bereich von Baustellen verwendet wird. Die Markierung ist mit Reflexionsperlen ausgestattet und erfüllt die durch die nach ZTV M02 vorgegebenen Richtwerte für Nachtsichtbarkeit¹⁷. Hinsichtlich ihrer Retroreflektivität stellen die zwei gewählten Oberflächen Extremwerte dar. Die retroreflektiven Eigenschaften einer real verlegten Fahrbahnmarkierung liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb dieses Spektrums. Abbildung 3.4 stellt die Ergebnisse getrennt für den Karton und die Markierungsfolie logarithmisch dar.

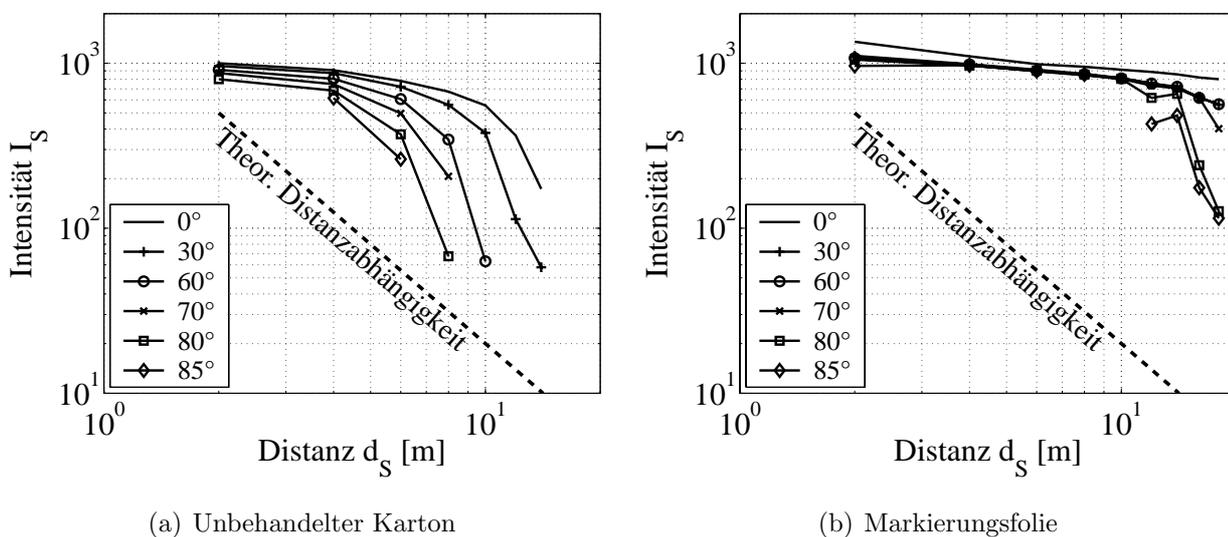


Abbildung 3.4: Intensitätsmessung in Abhängigkeit von Auftreffwinkel, Distanz und Material

Die gemessene Rückstrahlintensität ist für die unterschiedlichen Winkel über der Distanz d_S aufgetragen. Zusätzlich ist als Hilfslinie die Steigung eingezeichnet, die bei einer reziproken Distanzabhängigkeit gemäß der zweiten Potenz¹⁸ zu erwarten wäre. Es wird deutlich, dass sowohl beim Karton als auch bei der Markierung im Nahbereich, die theoretische Distanz-

¹⁶3M Deutschland: Vorübergehende Fahrbahnmarkierung, 2006, S. 1

¹⁷Bundesanstalt für Straßenwesen (bast): Prüfbericht, 2006, S. 1

¹⁸Kapp, Brugger: Miniaturisierter Laserscanner, 2004, S. 3

abhängigkeit nicht erreicht wird. Der zunächst geringe Einfluss der Distanz steigt mit wachsender Entfernung überproportional an. Eine mögliche Erklärung dieses Phänomens wäre eine trotz sorgfältiger Ausrichtung nur teilweise erreichte Überdeckung von Strahl und Karton. Dieser Vermutung widerspricht jedoch das unterschiedliche Verhalten von Karton und Markierung, bei welchen sich die Distanzabhängigkeit in unterschiedlichen Entfernungen verändert. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass die Rückstrahlintensität nicht dem direkt gemessenen Wert entspricht, sondern in Abhängigkeit von Distanz und Rückstrahlintensität sensorintern vorverarbeitet wird. Eine Verallgemeinerung der erzielten Messergebnisse ist unter dieser Voraussetzung zwar nicht möglich, eine Bestätigung der Aussage, dass die Rückstrahlintensität von der Objektdistanz abhängt, kann jedoch geleistet werden. Der eingangs vermutete Einfluss des Auftreffwinkels ist beim Karton deutlicher vorhanden als bei der Markierung. Bei Reflexion an der Markierung sind die Messwerte im Nahbereich nahezu alle auf dem gleichen Intensitätsniveau und weichen erst in höheren Entfernungen voneinander ab. Gerade im Hinblick auf die Markierungsdetektion zeigen sich so die Vorteile des retroreflektiven Markierungsmaterials, das unter jedem Winkel auch noch in 18 m detektiert wird. Der Karton wird jedoch auch unter geringen Auftreffwinkeln nur bis in eine maximale Entfernung von 14 m detektiert. Es wird schon jetzt deutlich, dass eine Markierung noch bei höheren Auftreffwinkeln sowie in größeren Distanzen Reflexionen liefert, als dies z. B. eine normale Fahrbahn tut. Die Verfügbarkeit der Markierungsdetektion für eine gewählte Sensorkonstellation wird also durch die Retroreflektivität der Markierung bestimmt. Als Referenz kann die Markierung mit den schlechtesten Retroreflexionseigenschaften definiert werden¹⁹. Zur Ermittlung der Verfügbarkeit der Markierungsdetektion bietet sich daher eine Strecke an, deren Markierungsqualität nachweislich unterhalb der nach ZTV M02 geforderten Grenzwerte für Retroreflektivität liegt.

Die Einflüsse von Auftreffwinkel, Distanz und Oberfläche können im vorliegenden Fall bestätigt, allerdings nicht quantitativ beschrieben werden. Die optimale Einbauhöhe der Sensorik ergibt sich aus dem Zusammenspiel zwischen Auftreffwinkel und Distanzabhängigkeit und könnte auf Basis des durchgeführten Versuchs nur ungenau beurteilt werden. Betrachtet man ausschließlich den Auftreffwinkel leitet sich die Empfehlung ab, die Sensorik möglichst hoch einzubauen. Dadurch ergibt sich jedoch auch eine Erhöhung der Messentfernung zur Fahrbahn ohne entsprechende Erweiterung der Detektionsreichweite. Im vorliegenden Fall kann nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die gemessene Rückstrahlintensität unbearbeitet ausgegeben wird. Eine theoretische Ermittlung der optimalen Sensoreinbauhöhe auf Basis der erzielten Ergebnisse ist dadurch nicht belastbar und weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Sensorhöhen werden erforderlich. Da das entwickelte System für einen Einsatz im Pkw vorgesehen ist, in dem ohnehin ein nur geringer Spielraum für die Einbauhöhe vorhanden ist, wird in dieser Arbeit nicht genauer auf dieses Phänomen eingegangen.

¹⁹Dies gilt unter der Voraussetzung von ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen hinsichtlich Sensorik und Sensorausrichtung.

Bei einer Nutzung in einem Lkw empfiehlt es sich jedoch eine entsprechende Untersuchung durchzuführen.

3.2.2 Einfluss der Sensorwahl

Die im vorangegangenen Kapitel ermittelten Einflüsse von Auftreffwinkel, Distanz und Markierungsbeschaffenheit auf die Rückstrahlintensität sind qualitativ auf andere Lidarsensoren übertragbar. Ohne ihre Berücksichtigung ist keine generelle Aussage über die Reichweite der lidarbasierten Markierungsdetektion möglich. Erst durch zusätzliche Betrachtung der Einflüsse durch die Wahl der Sensorik kann jedoch innerhalb bestimmter Grenzen auch eine quantitative Aussage über die Detektionsreichweite getroffen werden. Um die Ergebnisse der vorgelegten Arbeit besser einzuschätzen zu können, wird daher ein Vergleich von zwei Lidarsensoren im Hinblick auf die Detektionsreichweite durchgeführt. Eine exakte Quantifizierung von möglichem Verbesserungspotential bleibt dabei weiterhin den Experten des jeweiligen Sensorherstellers überlassen. Als Vergleichssensor wird ein Sick LMS291 verwendet, der in erster Linie zur Prozessüberwachung in der Industrie eingesetzt wird. In der gewählten Einstellung scannt der LMS291 in nur einer Messebene mit einer Auflösung von $0,25^\circ$ einen Erfassungsbereich von insgesamt 90° ab.

Auf den ersten Blick lässt sich die Diskussion um die Detektionsreichweite in die einer longitudinalen und die einer lateralen Reichweite aufteilen. Es wird zunächst die laterale Reichweite behandelt. Unter der Annahme einer ebenen Straße und einer senkrecht zur Fahrbahn ausgerichteten Rotationsachse z_S entsteht eine Schnittgerade zwischen der Sensor-Messebene und der Fahrbahn (siehe Abbildung 3.5). Geht man allerdings von einer Rotationsachse z'_S aus, die nicht senkrecht zur Fahrbahn ausgerichtet ist, dann entsteht ein Kreis. Beide geschilderten Fälle können in Abhängigkeit der Sensorausrichtung und der betrachteten Messebene eintreten. Im Falle des Kreises ist der Winkel zwischen Strahl und Fahrbahnoberfläche immer gleich, ein lateraler Einfluss auf die Messung ist demnach nur, durch die mit dem Winkel steigende Distanz zur Fahrbahn gegeben. Da diese Abhängigkeit bereits im vorangegangenen Kapitel diskutiert wurde, wird hier darauf nicht weiter eingegangen. Im Falle der Geraden ändert sich jedoch der Winkel zwischen Strahl und Fahrbahn. In einer Entfernung von 30 m und dem nutzbaren²⁰, horizontalen Sensoröffnungswinkel ergibt sich ein Unterschied im Winkel von lediglich 2 %. Im Folgenden wird daher die vereinfachende Annahme getroffen, dass keine laterale Abhängigkeit der Detektionsreichweite besteht.

²⁰In Kapitel 3.3.1 wird gezeigt, dass der tatsächlich nutzbare Öffnungsbereich in der vorliegenden Verwendung mit $\pm 12^\circ$ deutlich unterhalb des für den Sensor angegebenen Öffnungsbereichs liegt.

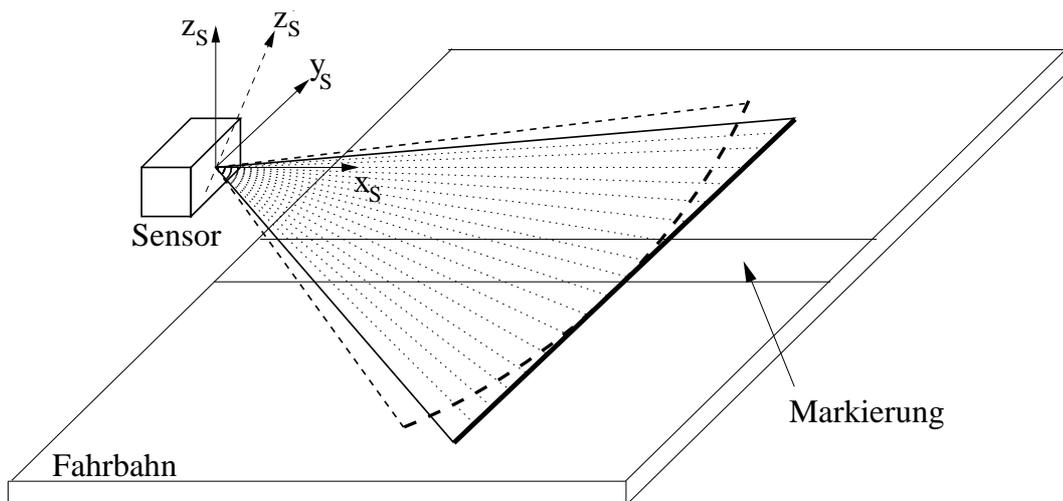


Abbildung 3.5: Schnittgerade Fahrbahn Sensormesseebene

Eine Möglichkeit, zur Bestimmung der maximalen, longitudinalen Reichweite auf eine Markierung, besteht im langsamen Schwenken des Sensors um seine Achse y_S (siehe auch Abbildung 3.5). Die Entfernung, ab der keine Reflexionen mehr empfangen werden, kann als die maximale Detektionsreichweite $x_{S,\max}$ bestimmt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine gleichmäßige Schwenkbewegung um die y_S -Achse dazu führt, dass die Geschwindigkeit, mit der der Laserstrahl über den Boden bewegt wird, mit wachsender Distanz zum Sensor ebenfalls zunimmt. Unter der Annahme einer endlichen Scanfrequenz des Sensors, steigt dadurch der longitudinale Abstand auf dem Boden zwischen zwei Einzelmessungen an. Dies wiederum hat zur Folge, dass die Genauigkeit der bestimmten Detektionsreichweite sinkt. Hinzu kommt, dass bei der diskutierten Vorgehensweise nur wenige Strahlen tatsächlich auf die Markierung treffen. Die meisten Strahlen bleiben dadurch ungenutzt. Um den Messaufwand trotzdem überschaubar zu halten, wurde der Sensor um 90° um seine x_S -Achse gedreht²¹, so dass die Messebene nicht mehr horizontal, sondern vertikal ausgerichtet ist (siehe Abbildung 3.6). Die x_S -Achse des Sensors wurde mit Hilfe eines Laserpointers parallel zur Markierung ausgerichtet. Anschließend wurde der Sensor langsam um die Achse z_S gedreht. Der Sensor ist auf einem Stativ in einer Höhe von 0,55 m montiert. Dies entspricht der Einbauhöhe im Versuchsfahrzeug. Die Bestimmung des Zeitpunktes, ab dem keine Detektion mehr erfolgt, ist mit der gleichen Ungenauigkeit behaftet wie vor der Rotation des Sensors. Dadurch, dass bei diesem Messaufbau jeder Laserstrahl auf die Markierung trifft, stehen bei der Auswertung jedoch deutlich mehr Messpunkte zur Verfügung.

²¹Die Drehung des Sensors verändert die geometrische Abdeckung der Strahlauftrefffläche mit der Markierung, die in Kapitel 3.2.3 angesprochen wird. Die Fläche der Abdeckung sinkt, es ist daher davon auszugehen, dass die tatsächlichen Reichweiten im realen Anwendungsfall gleich oder höher sind.

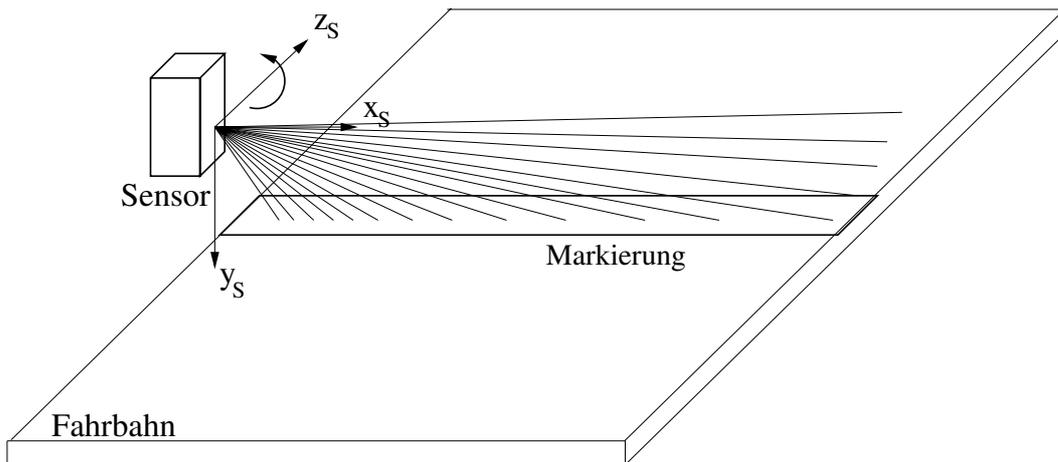


Abbildung 3.6: Messaufbau zur Ermittlung der Detektionsreichweite

Mit beiden Sensoren wurden drei Messungen auf einer willkürlich, jedoch für jede Messung gleich gewählten Asphalt-Fahrbahn durchgeführt. Bei weiteren drei Messungen wurde zusätzlich die Markierungsfolie aus dem vorangegangenen Kapitel aufgebracht. In Kapitel 2.2.2 wurde dargestellt, dass die gemessenen Intensitätswerte bei der verwendeten Sensorik herstellerseitig zu den äusseren Rändern des Erfassungsbereichs absinkt. Es wurden daher nur die Strahlen 170 bis 270 des Denso-Sensors verwendet, ein Bereich in dem das Energieniveau als konstant angenommen werden kann²². Für den Vergleichssensor von Sick ist keine Einschränkung des Auswertungsbereiches notwendig. Im Laufe einer Messung wurde der Sensor jeweils dreimal komplett in positiver und negativer Drehrichtung über die Markierung geschwenkt. Abbildung 3.7 zeigt vergleichend die Ergebnisse je einer Messung auf die Markierung für den Denso- und für den Sick-Sensor.

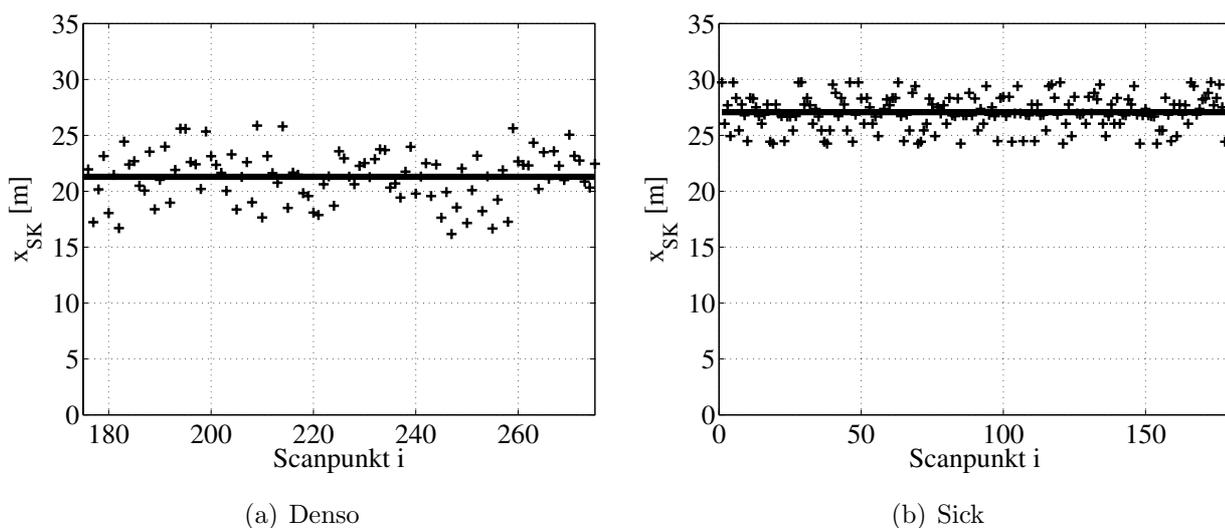


Abbildung 3.7: Relativer Vergleich der Sensorreichweiten auf die Markierung

²²Denso Corporation: Denso WA-C01, 2003, S. 1

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Reichweite beim Sick-Sensor mit maximal 30 m um fast 5 m höher liegt als beim Denso-Sensor, der im Maximum ca. 25 m erreicht. Des Weiteren ist die Streuung bei den Messungen mit dem Sick-Sensor geringer²³. Tabelle 3.1 fasst die gemittelten Reichweiten sowie die dazugehörige Standardabweichung der sechs durchgeführten Messungen zusammen.

Tabelle 3.1: Ergebnisse Detektionsreichweite

Markierung	Denso			Sick		
$\bar{x}_{S,\max}$ [m]	21,29	21,03	21,73	27,16	27,43	27,97
σ [m]	2,28	1,68	2,30	1,60	1,30	1,26
Fahrbahn	Denso			Sick		
$\bar{x}_{S,\max}$ [m]	8,84	8,79	8,79	13,20	13,00	13,20
σ [m]	0,56	0,50	0,52	0,33	0,31	0,48

Die Reichweite liegt für den Sick-Sensor im Schnitt ca. 29 % höher. Im unteren Teil von Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse der einzelnen Messungen auf die Fahrbahn zusammengefasst. Die Ergebnisse aus den Messungen mit Markierungsfolie werden bestätigt. Die Detektionsreichweite der Markierung ist jedoch mehr als doppelt so groß wie die des Fahrbahnbelags. Bemerkenswert ist, dass auch die ermittelte Standardabweichung für die Messungen auf die Markierung höher liegt. Dies kann vor allem mit dem eingangs erwähnten Phänomen zusammenhängen, dass mit steigender Distanz auch die Geschwindigkeit des Messstrahls über Grund zunimmt.

Das Detektionsniveau des Denso-Sensors liegt unter dem des Sick-Sensors. Die Tabelle bestätigt die Sensorabhängigkeit, dass die Standardabweichung für den Sick-Sensor deutlich niedriger ist als für den Denso-Sensor. Ein dadurch entstehender Detektionsvorteil des Sick-Sensors steht der Nachteil nur einer vorhandenen Messebene gegenüber, was für eine spätere Schätzung des Fahrstreifenverlaufs voraussichtlich zu wenig ist²⁴. Obwohl die durchgeführten Messungen keine direkten Empfehlungen erlauben, so weisen sie doch darauf hin, dass die im Laufe der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnisse nicht die Verfügbarkeitsgrenze des Sensorprinzips darstellen. Die maximalen Detektionsreichweiten des Sick-Sensors von bis zu 30 m zeigen, dass eine lidarbasierte Markierungsdetektion die Anforderungen der Zielanwendung, die in Kapitel 2.1 theoretisch ermittelt wurden, erfüllen kann. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die ermittelten, mittleren Detektionsreichweiten von ca. 21 m für den Denso- und ca. 27 m für den Sick-Sensor, nicht unabhängig von der im Versuch gewählten Sensorposition sowie der Markierung betrachtet werden können.

²³Diese Abhängigkeit von der Sensorik resultiert unter anderem aus den unterschiedlichen Scanfrequenzen.

²⁴von Reyher, Raab, Winner: Advanced Environment Detection, 2004, S. 5

3.2.3 Theoretische Betrachtungen zur Messgenauigkeit

Bislang wurde die Geometrie des Laserstrahls nicht berücksichtigt. Gerade für eine Abschätzung der Messgenauigkeit spielt diese jedoch eine wichtige Rolle. Die Strahlgeometrie wird vereinfacht definiert durch dessen Divergenz²⁵, die für den verwendeten Sensor in Form eines vertikalen und eines horizontalen Strahlöffnungswinkels $\Delta\beta_S$ und $\Delta\alpha_S$ beschrieben wird. Dadurch wächst die Größe der Strahlüberdeckung mit einem Objekt, in Abhängigkeit von der Distanz d_S an. Der exakte Ursprung der Reflexion kann innerhalb der Strahlöffnung nicht exakt bestimmt werden, weswegen er in der Regel idealisierend in Strahlmitte angenommen wird. Es entsteht ein Fehler in der berechneten Objektposition, der mit wachsender Entfernung zunimmt. Die Genauigkeit der lateralen Positionsbestimmung eines Objekts nimmt dadurch ab. Spurzuordnung und Zielauswahl werden ungenau. Im Vergleich dazu ist die vertikale Unsicherheit von untergeordnetem Interesse, weil diese sich kaum auf die errechnete Position des Objekts auswirkt. Im Sinne einer möglichst kompletten Abdeckung eines Fahrzeughecks sowie einer Kompensation von Nickbewegungen bietet eine hohe vertikale Strahldivergenz sogar Vorteile. Durch eine kleine horizontale, dafür aber vergleichsweise große vertikale Strahldivergenz bietet der Denso-Sensor für seine ursprüngliche Anwendung in einem ACC günstige Eigenschaften. Bei der Verwendung des Sensors zur Detektion einer Markierung stellt sich der Fall anders dar (siehe Abbildung 3.8).

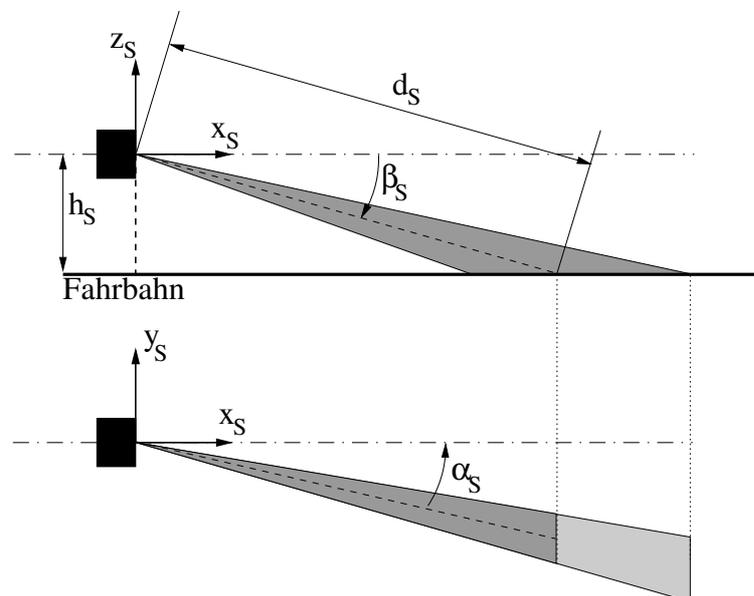


Abbildung 3.8: Theoretische Einflüsse der Strahldivergenz

Gemäß Abbildung 3.8 haben neben der gemessenen Distanz d_S auch der horizontale und der vertikale Austrittswinkel α_S und β_S einen Einfluss auf die Fläche des Auftreffbereichs. Ist weder die Geometrie der Straße noch die Bewegung des mit dem Sensor ausgestatteten Fahrzeugs um seine drei Achsen bekannt, dann ist allein anhand der Messung d_S keine exakte

²⁵Denso Corporation: Denso WA-C01, 2003, S. 1

Positionierung der Messung innerhalb des Strahlöffnungsbereichs möglich. Eine ausschließlich auf d_S , α_S und β_S aufbauende Berechnung der kartesischen Koordinaten (x_S, y_S, z_S) (siehe Kapitel A.1) kann mit einem Fehler behaftet sein. Mit dem Ziel, spätere Ergebnisse besser einschätzen zu können, wird eine Abschätzung dieses Fehlers für die verwendete Sensorik durchgeführt. Es werden die zu erwartenden Abweichungen e_d , e_α und e_β gemäß Tabelle 3.2 eingeführt.

Tabelle 3.2: Abweichungen e_d , e_β und e_γ

e_d	e_α	e_β
$\pm 0,5$ m	$\pm 0,05^\circ$	$\pm 0,79^\circ$

Der Wert für e_d entspricht dabei dem vom Sensorhersteller angegebenen 3σ -Bereich²⁶, die Winkelabweichungen e_α und e_β orientieren sich an der Strahldivergenz. Einflüsse aufgrund falscher Ausrichtung des Sensors werden vernachlässigt. Abbildung 3.9 zeigt die maximalen Abweichungen in den Sensor-Koordinaten dx_S , dy_S und dz_S bei Addition aller absoluten Fehler in Abhängigkeit des horizontalen Austrittswinkels α_S .

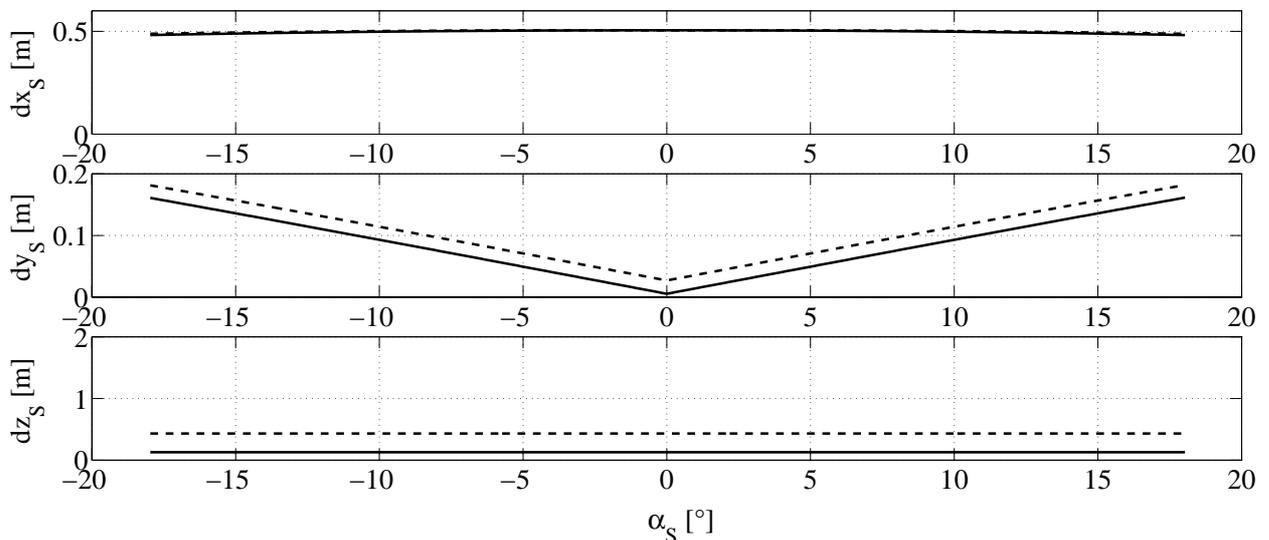


Abbildung 3.9: Fehlereinfluss $(|e_d| + |e_{\alpha}| + |e_{\beta}|)$ [— $\beta_S = 5,0^\circ$ - - $\beta_S = 1,0^\circ$]

Dargestellt sind die Ergebnisse für Messebene Eins und Fünf bei einer Einbauhöhe der Sensorik von 0,55 m. Bei Betrachtung des Fehlers in der horizontalen Ebene (x_S, y_S) lässt sich erkennen, dass vor allem x_S mit einer hohen Unsicherheit behaftet ist, die außerdem zu den Seiten des Erfassungsbereichs hin kaum absinkt. Die Abhängigkeit vom Winkel ist bei Δy_S deutlich stärker ausgeprägt, weil der Einfluss von e_d und e_β zu den Seiten zunimmt. Der

²⁶Denso Corporation: Denso WA-C01, 2003, S. 1

Unterschied zwischen den Messebenen ist sowohl für dx_S als auch dy_S im Vergleich zum Absolutwert gering. Eine Einzelbetrachtung der Anteile am Gesamtfehler ergibt weiterhin, dass die Unsicherheit in x_S und y_S vor allem durch den Fehler e_d induziert wird (siehe Abbildung 3.10).

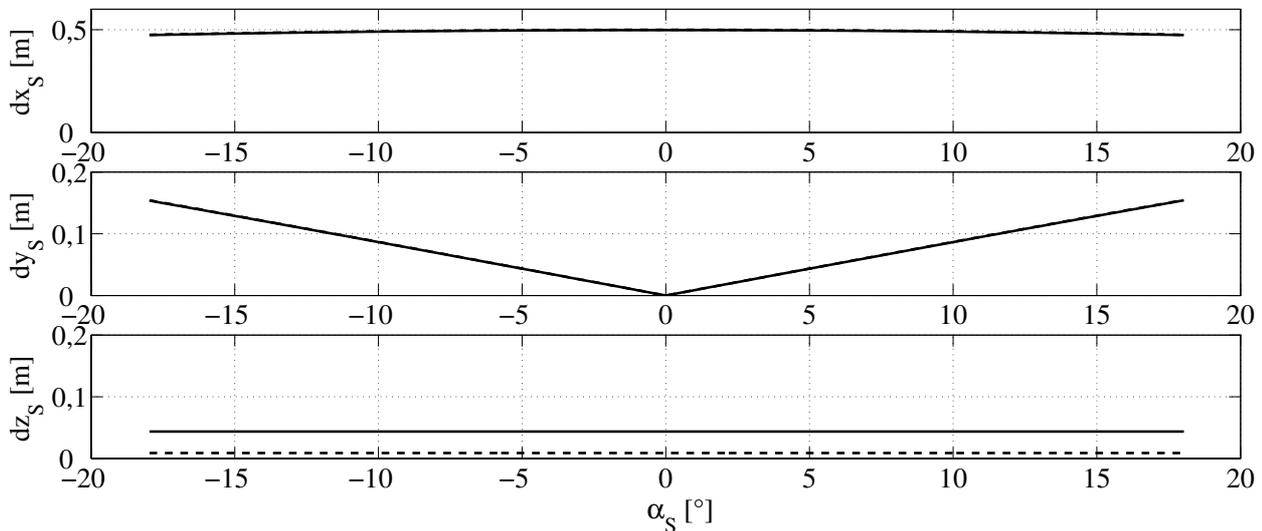


Abbildung 3.10: Fehlereinfluss e_d [— $\beta_S = 5,0^\circ$ - - $\beta_S = 1,0^\circ$]

Im Hinblick auf die Anwendung lässt sich deswegen zunächst die Empfehlung aussprechen, eine Verbesserung der Genauigkeit der Distanzmessung d_S zu verfolgen. Der Einfluss auf z_S ist nach Abbildung 3.9 über dem Winkel konstant. Je steiler der Auftreffwinkel und je größer der Auftreffbereich, desto größer wird der potentielle Fehler in der errechneten Koordinate z_S . Dabei ist allerdings weniger der Messfehler e_d als vielmehr die Unsicherheit durch die hohe vertikale Strahldivergenz e_β ausschlaggebend.

Wie in Kapitel 1.3.1 erwähnt, werden bei Verwendung einer Mono-Kamera zur Bestimmung von Tiefeninformationen in der Regel zusätzliche Annahmen getroffen. So ist es üblich der Fahrstreifenschätzung die Annahme zu Grunde zu legen, dass die Fahrbahn eben ist. Treten hohe Nickwinkel auf, so kann dies zu Fehlern in der Schätzung des horizontalen Fahrstreifenverlaufs führen. Der entstehende Einfluss lässt sich z. B. durch die zusätzliche Schätzung des Nickwinkels²⁷ reduzieren. Auch bei Verwendung von Lidarsensoren können durch eine Nick-, Wank- oder Hubbewegung des Fahrzeugs Fehler induziert werden. Liegt eine der drei Bewegungen vor, so treffen sowohl die angenommene Sensorhöhe als auch die verwendeten Winkel bei der Berechnung der Mess-Koordinaten im Fahrzeugkoordinatensystem nach Kapitel A.1 nicht mehr zu. Abbildung 3.11 stellt vor diesem Hintergrund den resultierenden Messfehler dar, der für maximale Nick- bzw. Wankbewegungen im Stop&Go-Verkehr²⁸ auftritt.

²⁷Dickmanns, Zapp: Recursive 3-D Road Recognition, 1992, S. 204

²⁸Hanau: Bestimmung der Fahrzeugaufbaubewegung, 2004, S. 46

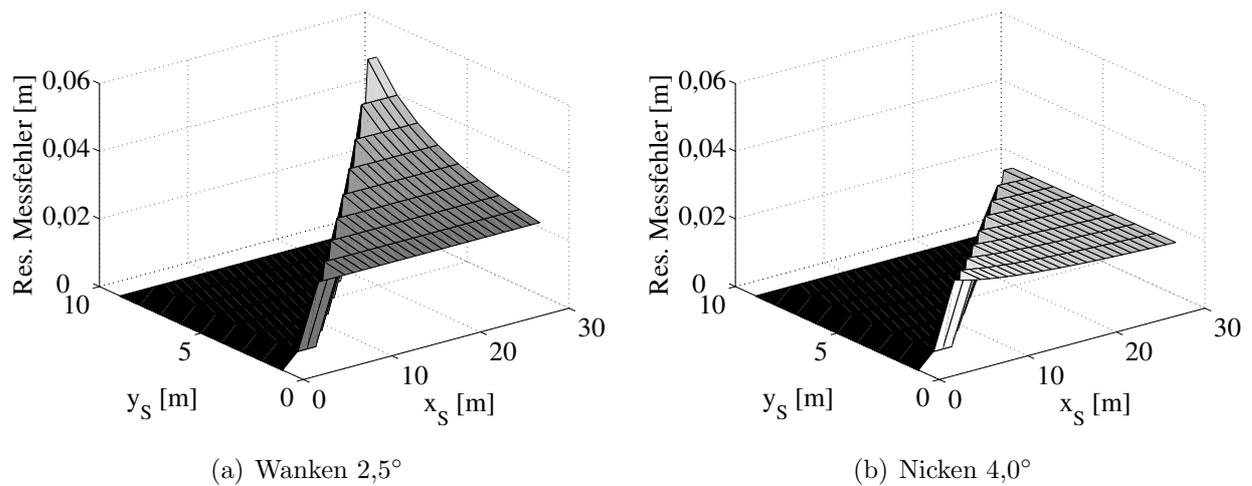


Abbildung 3.11: Resultierender, horizontaler Messfehler aufgrund einer Fahrzeugaufbaubewegung

Die Nickbewegung bewirkt eine Änderung der Sensorhöhe und Ausrichtung. Einflüsse durch eine Hubbewegung werden deswegen nicht zusätzlich betrachtet. Aus Symmetriegründen ist nur der linke Teil des Sensorerfassungsbereichs dargestellt, auf eine Berücksichtigung der Komponente z_S wird verzichtet. Die Abschätzung wird ausschließlich im Hinblick auf die Ermittlung des horizontalen Fahrstreifenverlaufs durchgeführt. Die Einflüsse im Detektionsbereich des Sensors liegen allesamt unterhalb von 0.06 m und lassen somit einen nur geringen Einfluss erwarten.

3.3 Detektion und Interpretation einer Markierung

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Durchführung einer Markierungsdetektion vom Standpunkt eines einzelnen Messstrahls aus betrachtet. Es konnte gezeigt werden, dass die Markierung eine höhere Rückstrahlintensität hat als eine herkömmliche Fahrbahn und dass sie aufgrund dessen bis in einen Bereich von maximal 25 m durch den verwendeten Lidarsensor detektierbar ist. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird nun erläutert, wie die Markierung innerhalb einer gesamten Messebene detektiert und interpretiert werden kann. Übergeordnetes Ziel ist die später darauf aufbauende Schätzung des Fahrstreifenverlaufs.

3.3.1 Gradientenbasierte Kantendetektion

Bei Ausrichtung des Sensors auf die Fahrbahn, haben Markierung und Fahrbahn eine annähernd gleiche Relativposition sowie -ausrichtung zum Sensor. Ein gemessener Intensitätsunterschied kann daher im vorliegenden Fall nur durch unterschiedlich stark reflektierende Materialien hervorgerufen werden. Abbildung 3.12 zeigt den Intensitätsverlauf von Messebene Drei bei schräger Ausrichtung auf Fahrbahn und Markierung. Die dargestellte Kurve entspricht dem Intensitätssignal I_S , das vom Sensor in Abhängigkeit des horizontalen Strahl-

austrittswinkels α_S empfangen wird. Die Position der Markierung tritt deutlich durch ein lokales Maximum²⁹ hervor, das auf unterschiedliche Art und Weise detektiert werden kann.

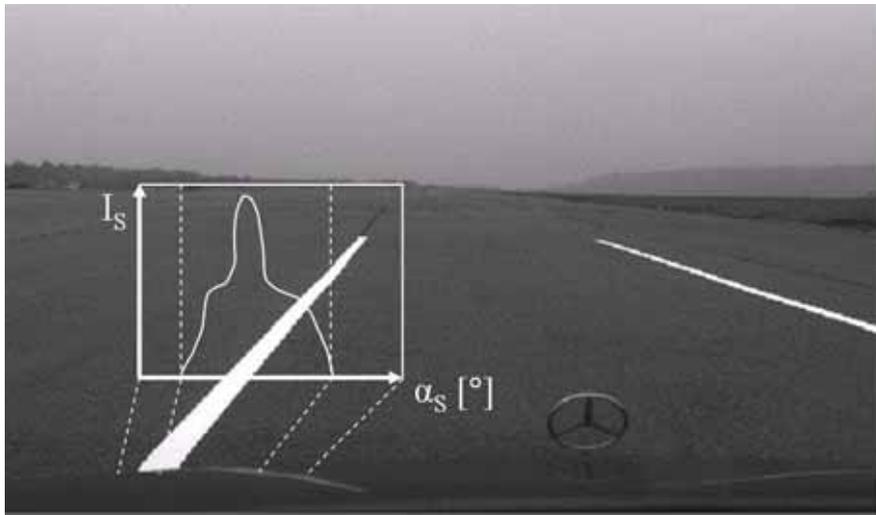


Abbildung 3.12: Intensitätsmessung einer auf die Fahrbahn ausgerichteten Lidar-Messebene

In der Bildverarbeitung kommen zur Detektion lokaler Maxima in der Regel Kantenfilter als einfachste Form der Nachbarschaftsoperatoren zum Einsatz. Abbildung 3.13 zeigt den Verlauf eines lokalen Maximums sowie die dazugehörige erste und zweite Ableitung.

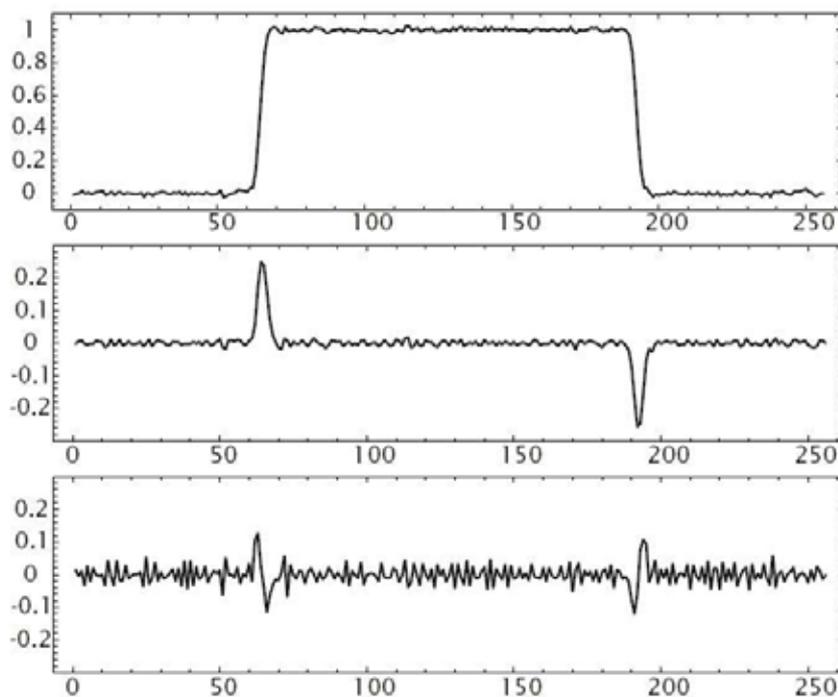


Abbildung 3.13: Lokales Maximum (oben), erste (mitte) und zweite Ableitung (unten)³⁰

²⁹Der Einfachheit halber im Folgenden auch Markierungsmaximum genannt.

³⁰Jähne: Digitale Bildverarbeitung, 2002, S. 334

Eine Kante erscheint in Abhängigkeit ihrer Orientierung in der ersten Ableitung als Maximum bzw. Minimum und in der zweiten Ableitung als gerichteter Nulldurchgang. Sowohl der Extremwert in der ersten, als auch der Nulldurchgang in der zweiten Ableitung beschreiben dabei den Punkt der höchsten Steigung einer Kante im Originalbild. Durch ein direkt auf ein Minimum folgendes Maximum oder zwei gegensätzlich orientierte Nulldurchgänge ist die Position der Markierung innerhalb einer Messebene eindeutig beschrieben. Prinzipiell lassen sich daher sowohl die erste, als auch die zweite Ableitung zur Detektion der Markierung verwenden. Aufgrund der höheren Rauschanfälligkeit in der zweiten Ableitung bietet sich jedoch eine gradientenbasierte Kantendetektion nach Jähne³¹ anhand der ersten Ableitung an. Im gegebenen Anwendungsfall liegt eine Messung zunächst in Polar-Koordinaten vor und wird anschließend in ein kartesisches Koordinaten-System umgerechnet. Wie schon in Kapitel 3.2.3 dargestellt, hat die Unsicherheit in der Distanzmessung d_S bei Umrechnung in ein kartesisches System Einfluss auf alle Koordinaten. Es ist deswegen einfacher und genauer den Gradienten ∇_α über dem horizontalen Austrittswinkel α_S zu bilden, dessen Auflösung $\Delta\alpha_S$ von Messstrahl zu Messstrahl konstant ist. Um die Forderung nach Äquidistanz zu erfüllen, darf die Distanzmessung zweier benachbarter Messpunkte einen durch das Messrauschen festgelegten Wert dabei nicht überschreiten. Es wird ein Schwellwert $S_D = 0,5$ m eingeführt, bei dessen Überschreitung davon ausgegangen wird, dass zwei benachbarte Messpunkte nicht mehr derselben Oberfläche zugeordnet werden können.

Eine Markierung ist bis in höhere Entfernungen detektierbar als eine herkömmliche Fahrbahn. Liefert die Fahrbahn keine Reflexionen mehr, so liegt ein Intensitätsanstieg von Null auf die Rückstrahlintensität der Markierung vor. Der durch die erste Ableitung beschriebene Gradient ∇_α ist dadurch hoch und ohne weiteres detektierbar. Solange jedoch auch die Fahrbahn ein Signal liefert, ist es wichtig, dass ∇_α zwischen Fahrbahn und Markierung signifikant über dem des Rauschens der Intensitätsmessung liegt. Ob eine Markierung mit dem vorgeschlagenen Verfahren detektiert werden kann, hängt demnach in erster Linie vom Signal-Rausch-Verhalten ab. Mit dem Ziel der Unterdrückung einer allein durch das Messrauschen entstandenen Kante bietet sich eine Glättung des Signals an. Dabei darf neben dem Rauschen nicht auch das Nutzsignal und damit die gesuchte Kante geglättet werden. Es wird ein Medianfilter³² verwendet. Die innerhalb der Filtermaske liegenden Intensitätswerte werden dabei nach ihrem Betrag sortiert, anschließend wird der mittlere als Filterausgang selektiert. Im Gegensatz zu einem Mittelwertfilter glättet das Medianfilter binäres Rauschen, ohne dabei die Schärfe der Kanten zu beeinflussen. Für das so geglättete Signal kann der Gradient ∇_α über dem horizontalen Austrittswinkel mit der symmetrischen Filtermaske $\frac{1}{2}[1 \ 0 \ -1]$ berechnet werden. Abbildung 3.14 stellt das Intensitätssignal I_S in rohem Zustand, nach Glättung durch das Median-Filter sowie nach weiterer Applikation der Ableitung dar.

³¹Jähne: Digitale Bildverarbeitung, 2002, S. 338

³²Jähne: Digitale Bildverarbeitung, 2002, S. 323

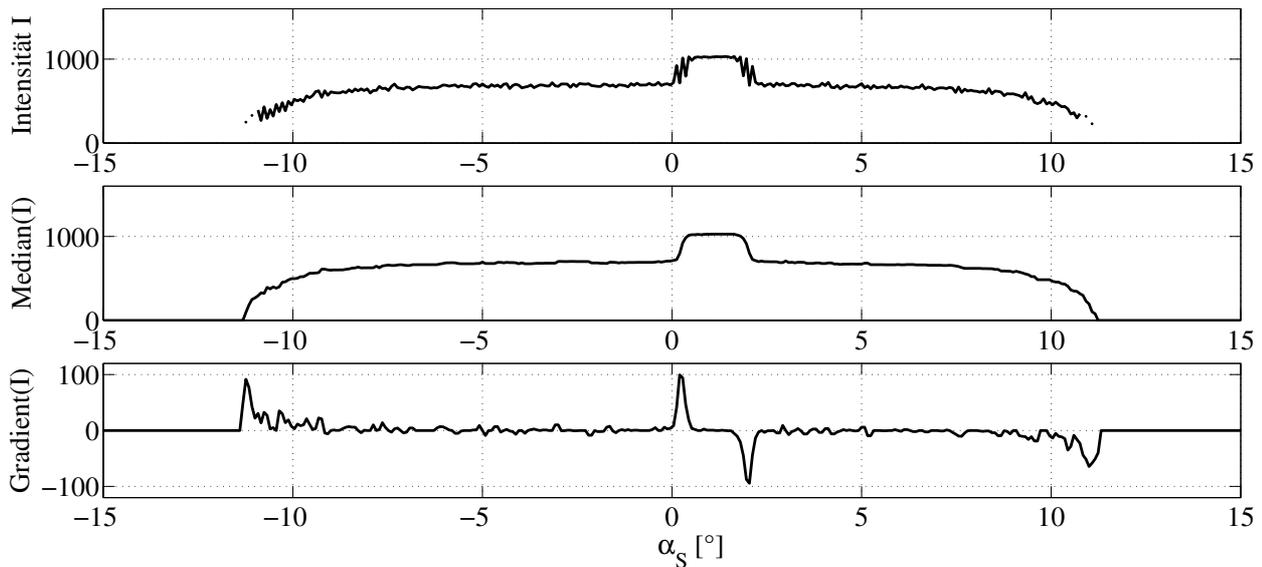


Abbildung 3.14: Intensitätsverlauf I roh (oben), mit Medianfilter (mitte) und erster Ableitung (unten)

Um die Suche nach Markierungsmaxima zu erleichtern, werden in dem resultierenden Gradientenbild (Abbildung 3.14 unten) zunächst alle unterhalb eines Schwellwertes S_{∇} liegenden Gradienten gleich Null gesetzt. Im Anschluss können die verbleibenden Werte auf Vorzeichenwechsel untersucht werden, deren Auftreten auf eine potentielle Fahrbahnmarkierung schließen lässt.

An den Seiten des Erfassungsbereichs des Denso-Sensors sinkt die Amplitude des Intensitätssignals deutlich ab, der Gradient steigt allein aufgrund der Sensorcharakteristik (siehe Abbildung 3.14). Um diesen Einfluss zu mindern, wird eine Verstärkungsfunktion³³ f_V in Form eines Polynoms vierten Grades auf das Intensitätssignal angewendet. Da durch Anwendung der Verstärkungsfunktion starke Signalunterschiede wie z. B. das Sensormessrauschen verstärkt werden, wird diese erst nach Anwendung des Medianfilters appliziert. Abbildung 3.15 fasst die Arbeitsschritte zusammen, die auf das Intensitätssignal einer Messebene angewandt werden, um am Ende die potentiellen Markierungspositionen zu erhalten.

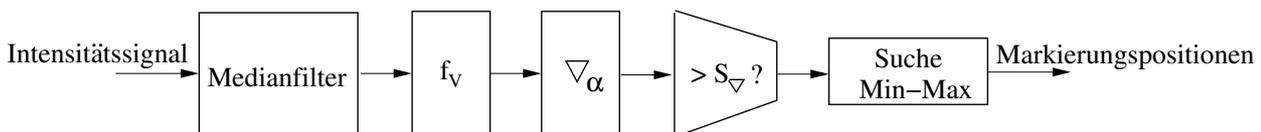


Abbildung 3.15: Ablauf der Markierungsdetektion

Eine robuste Detektion der Markierung bei möglichst effizienter Vermeidung von Fehldetektionen hängt in erster Linie von der Wahl von S_{∇} ab. Wird der Wert für S_{∇} zu hoch gewählt,

³³Die Verstärkungsfunktion wurde auf das durch den Hersteller für den Sensor vorgegebene Verhalten angepasst.

so werden schwach reflektierende Markierungen nicht detektiert. Ein zu niedriger Wert hingegen erhöht die Gefahr von Fehldetektionen z. B. aufgrund von Messrauschen. Für die Wahl von S_{∇} besteht die Forderung, dass eine Markierungsdetektion gerade noch nicht auf das Messrauschen, aber schon auf schwach reflektierende Markierungen reagiert. Das Messrauschen hängt von Sensor und Fahrbahn ab, weswegen Referenzmessungen auf unterschiedlichen, ebenen Fahrbahnbelägen durchgeführt wurden. Dabei wurden jeweils 1000 Einzelscans auf Beton, Pflastersteinbelag sowie zwei unterschiedlichen Asphaltarten im Schritt-Tempo aufgenommen und ausgewertet. Die gemessenen Intensitätsverläufe wurden zunächst durch das Medianfilter geglättet und anschließend anhand von f_{∇} auf den Sensor angepasst. Für jeden vermessenen Fahrbahnbelag wurde der Gradientenverlauf berechnet. In Abhängigkeit von der Distanz d_S und dem horizontalen Austrittswinkel α_S wurden die ermittelten Gradienten auf ein zweidimensionales Gitter verteilt. Lagen mehrere Gradienten für einen Gitterplatz vor, so wurde das Feld mit dem höchsten Gradienten belegt. Für alle drei Fahrbahnbeläge traten ähnliche Ergebnisse auf, weswegen in Abbildung 3.16 eine gemeinsame, grafische Darstellung erfolgt. Der Gradient wächst mit steigendem d_S und mit steigendem Betrag von α_S vor allem im Bereich ab 10° stark an. Trotz der Intensitätsanpassung, in Abhängigkeit vom Winkel, gibt es am Rande des Erfassungsbereichs hohe Gradienten. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass auch mit Verstärkungsfunktion, bei gewissen Winkeln keine Reflexionen mehr von der Fahrbahn gemessen werden. Der entstehende Intensitätsabfall hat mitunter hohe Gradienten zur Folge. Die Darstellung zeigt, dass die Gradienten im negativen Winkelbereich, ein stark verändertes Verhalten zu denen im positiven Winkelbereich aufweisen. Ein Verhalten, das durch den Sensoreinbau, vor allem jedoch auch durch Eigenschaften der Sensorik, hervorgerufen sein kann. Um beides zu berücksichtigen wurden die in den Messungen ermittelten Daten für S_{∇} (Abbildung 3.16) in einer Tabelle hinterlegt, die online im Fahrzeug zur Bewertung eines vorliegenden Gradienten verwendet werden kann. Um diese Tabelle so klein wie möglich zu halten, wurden die Daten auf den Bereich

$$2 \text{ m} \leq d_S \leq 10 \text{ m} \tag{3.2}$$

beschränkt. Die beschriebene Ermittlung von S_{∇} kann nicht als absolut betrachtet werden. Es handelt sich vielmehr um eine realistische Abgrenzung von Nutz- und Rauschsignal. Schlecht reflektierende Markierungen können auch mit diesem Verfahren ab einer gewissen Grenze nicht mehr detektiert werden. Andere, ähnlich einer Markierung stark reflektierende Materialien auf der Fahrbahn, können weiterhin als Fehldetektion auftreten. Für eine effizientere Vermeidung von Fehldetektionen ist eine Klassifikation von Markierungen erforderlich.

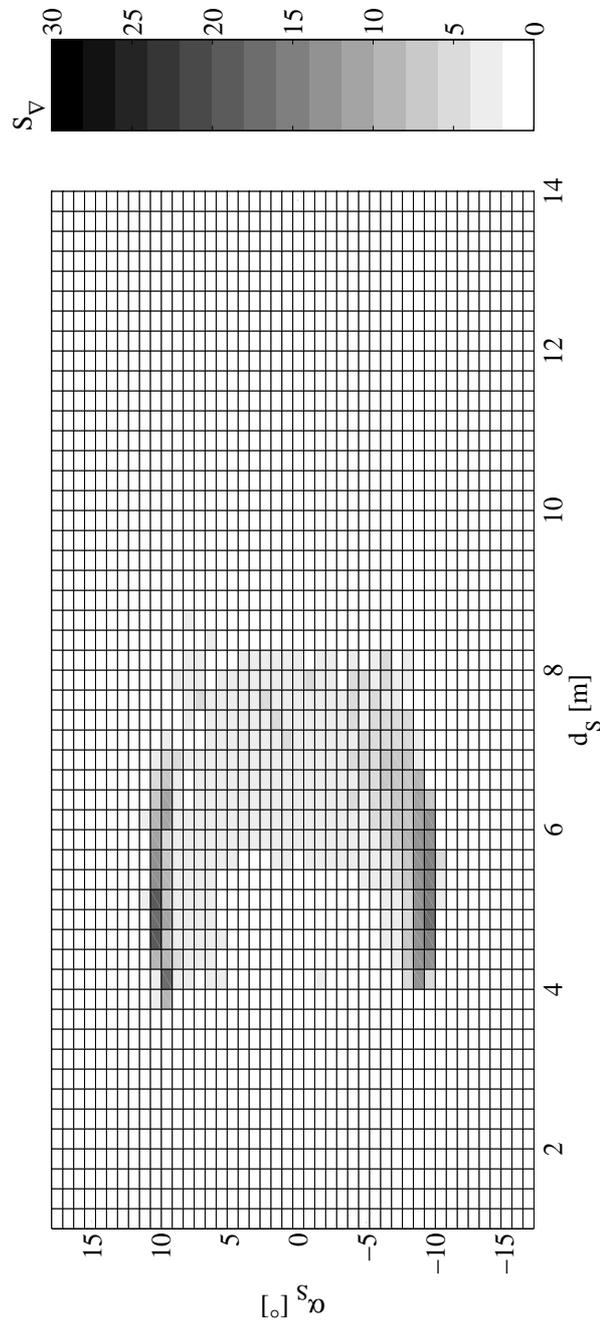


Abbildung 3.16: Gradientenverteilung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrbahnbeläge

3.3.2 Interpretation eines Markierungsmaximums

Die gradientenbasierte Kantendetektion beschreibt eine Möglichkeit zur ebenenselektiven Detektion eines Markierungsmaximums. Das Maximum wird durch die Position der steigenden und der fallenden Flanke sowie der dazwischen liegenden, zentralen Messpunkte charakterisiert. Im Folgenden soll dargelegt werden, welche Messpunkte des detektierten Markierungsmaximums für die Schätzung des Fahrstreifenverlaufs verwendet werden. Für die durchgeführten Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass sich die Markierung vollständig im Erfassungsbereich befindet und keinerlei Störungen durch Randbebauung vorliegen.

Wie schon in Kapitel 3.2.3 dargestellt, entsteht mit der verwendeten Sensorik ein Auftreffbereich des Strahls auf der Fahrbahn bzw. auf der Markierung. Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob die zentralen Messpunkte zur Schätzung des Fahrstreifenverlaufs verwendet werden können, ist zu untersuchen, ob sie einem Bereich der realen Markierung eindeutig zugeordnet werden können. Dies setzt ein Kenntnis darüber voraus, wie der Strahl und die Markierung einander schneiden. Abbildung 3.17 veranschaulicht den Schnittbereich eines Strahls mit einer Markierung auf der Fahrbahn, in Abhängigkeit von Position und Verlauf der Markierung.

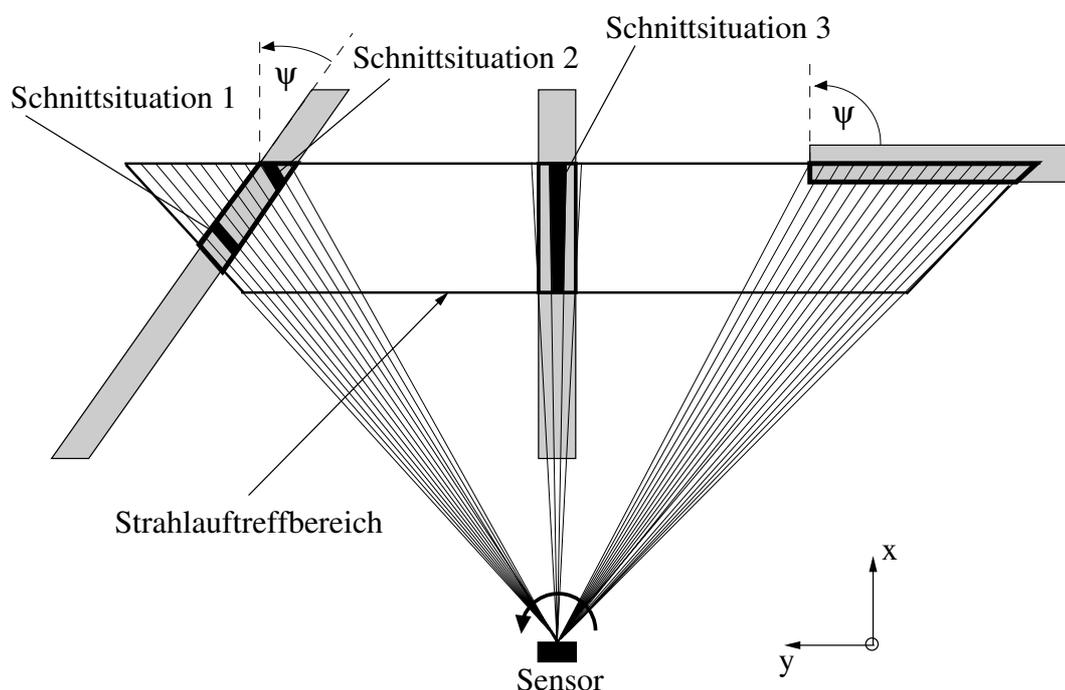


Abbildung 3.17: Schnittbereich für $0^\circ < \psi < 90^\circ$, $\psi = 0^\circ$ und $\psi = 90^\circ$ mit Strahldivergenz

Innerhalb eines Maximums können unterschiedliche Schnittsituationen zwischen Strahl und Markierung vorliegen. Die folgende Aufzählung fasst die drei prinzipiell zu unterscheidenden Schnittsituationen zusammen (siehe auch Abbildung 3.17):

- Schnittsituation 1: Der Auftreffbereich eines Strahls überdeckt die komplette Markierungsbreite.
- Schnittsituation 2: Der Auftreffbereich eines Strahls überdeckt nur einen Teil der Markierungsbreite.
- Schnittsituation 3: Der komplette Auftreffbereich eines Strahls liegt auf der Markierung.

Es ist davon auszugehen, dass die drei genannten Schnittsituationen eine unterschiedliche Interpretation³⁴ der dazugehörigen Messpunkte erforderlich machen. Die einfachste Vorgehensweise, nämlich einfach alle Messpunkte für die Fahrstreifenschätzung zu verwenden, ist damit ausgeschlossen, da keine eindeutige Aussage darüber möglich ist, welcher Teil der Markierung durch die Gesamtheit der Messpunkte beschrieben wird. Dazu müsste zunächst bekannt sein, in welchem Teil des gemeinsamen Schnittbereichs die Reflexion oder die Distanzmessung d_S generiert wird (siehe auch Abbildung 3.17). Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Sensorausgangssignale unbearbeitet vorliegen (siehe auch Kapitel 3.2.1), ist eine Untersuchung dieses Aspekt nicht unabhängig vom Sensorhersteller durchführbar. Eine diesbezügliche Kooperation war im Rahmen der vorgelegten Arbeit nicht möglich weswegen auf weiterführende Untersuchungen verzichtet wurde. Es sei jedoch trotzdem darauf hingewiesen, dass eine detaillierte Auswertung auf Ebene der Signalverarbeitung weiteres Potential im Hinblick auf die Markierungsinterpretation verspricht. So wird z. B. in einem Patent³⁵ der Firma Ibeo eine erweiterte Auswertung der Pulsbreite angesprochen.

Letztendlich bleibt die Möglichkeit einer Fahrstreifenschätzung auf Basis der Randpunkte der Markierung, deren Bestimmung aus der gradientenbasierten Kantendetektion folgt. Die zu Beginn des Kapitels geforderten Voraussetzungen, dass die Markierung vollständig im Erfassungsbereich liegt und keine Störungen durch einen Bürgersteig oder den Straßenrand vorliegen, entsprechen nicht der Realität. Eine Markierung, die nicht vollständig im Erfassungsbereich liegt, ruft entweder kein oder ein reduziertes Markierungsmaximum hervor. Im ersten Fall wird die gesamte Markierung nicht detektiert, woraus eine verminderte Verfügbarkeit resultiert. Im zweiten Fall wird nur die betroffene Kante der Markierung falsch detektiert. Bürgersteige oder Fahrbahnränder liegen stets an der Außenkante der Markierung an. Fehlinterpretationen treten deswegen gehäuft an der Außenkante auf. Für die spätere Schätzung des Fahrstreifenverlaufs wird daher die Innenkante der Markierung gewählt.

³⁴Die Interpretation eines Messpunktes besteht hier und im Folgenden aus seiner Zuordnung zu einer Position auf der realen Markierung.

³⁵Fürstenberg, Kämpchen, Lages, Dietmayer, Willhoef: Markierungserkennung, 2005, S. 1ff

3.4 Verfügbarkeit der Markierungsdetektion

Für einen Serieneinsatz des entwickelten Systems ist die Verfügbarkeit der Markierungsdetektion auf deutschen oder europäischen Straßen ausschlaggebend. Eine Abschätzung der Verfügbarkeit in Deutschland macht es erforderlich, die Markierungsvielfalt hinsichtlich Beschaffenheit und Abnutzung in Deutschland zu berücksichtigen. Abgesehen von einer nicht vorhandenen Markierung wird die minimale Verfügbarkeit durch Markierungen definiert, die unterhalb der geforderten Richtwerte für Retroreflexion liegen (siehe Kapitel 3.2.1). Eine Abschätzung ist durch Auswertung von Messfahrten auf repräsentativen Streckenabschnitten bei unterschiedlichen Wetterbedingungen möglich. Während einer solchen Messfahrt kann es zwei Gründe geben, warum eine Markierung in einer, bzw. mehreren Messebenen der Sensorik nicht detektiert wird, es also zu einem Detektionsausfall kommt.

Detektionsausfall 1: Die Markierung ist nicht vorhanden oder liegt nicht im Erfassungsbereich der Messebene.

Detektionsausfall 2: Die Markierung liegt im Erfassungsbereich der Messebene, wird jedoch nicht detektiert.

Detektionsausfälle gemäß Fall Eins verfälschen eine Aussage über die Verfügbarkeit der Markierungsdetektion und haben ohnehin keine Aussagekraft im Hinblick auf die Systemfunktion. Weiterhin erwartet der Fahrer bei einem Abstandsregelsystem eine Abstandsregelung und keine fahrstreifenbezogene Funktion. Sie werden deswegen vor der Auswertung herausgenommen. Da der Erfassungsbereich der Sensorik so gewählt ist, dass die auf Autobahnen und Bundesstraßen üblichen Radien im Erfassungsbereich liegen, tritt Fall Eins in erster Linie dann ein, wenn keine Markierung vorhanden ist. Solche Situationen können in einer Vorauswertung durch Sichten des gespeicherten Kamerabildes identifiziert werden. Anhand aller verbleibenden Detektionsausfälle gemäß Fall Zwei kann eine Ausfallrate (AR), bezogen auf die Anzahl möglicher Detektionen, berechnet werden.

Die Ausfallrate bei einer unterbrochenen Markierung ist schwerer zu beurteilen als bei einer durchgezogenen Markierung, weil die Kenntnis des Auftreffbereichs der Messebene relativ zur Markierung mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Eine Sichtauswertung zur Beurteilung, ob und wann eine unterbrochene Markierung im Erfassungsbereich der Messebene liegt, ist ungenau und daher wenig aussagekräftig. Allerdings lässt sich bei bekanntem Verhältnis zwischen Strich und Lücke für jede Messebene eine theoretische Aussage darüber treffen, wie viel Prozent einer Stichprobe N an Messungen im Mittel auf die Markierung treffen und wie hoch dadurch die theoretische Ausfallrate ist. Das Verhältnis zwischen Strich und Lücke auf deutschen Autobahnen wird in der Richtlinie RMS-1³⁶ auf 1:2 für den Mittelstreifen und auf 1:1 für Ausfahrten festgelegt. Mit einer vorgeschriebenen Strichlänge von 6 m ergibt sich somit jeweils eine Lücke von 12 m oder 6 m. Die Gesamtlänge l_{LS} einer Kombination von

³⁶Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Markierungszeichen, 1993, S. 7

Lücke und Strich beträgt demnach $l_{LS} = 12$ m oder $l_{LS} = 18$ m (siehe Abbildung 3.18).

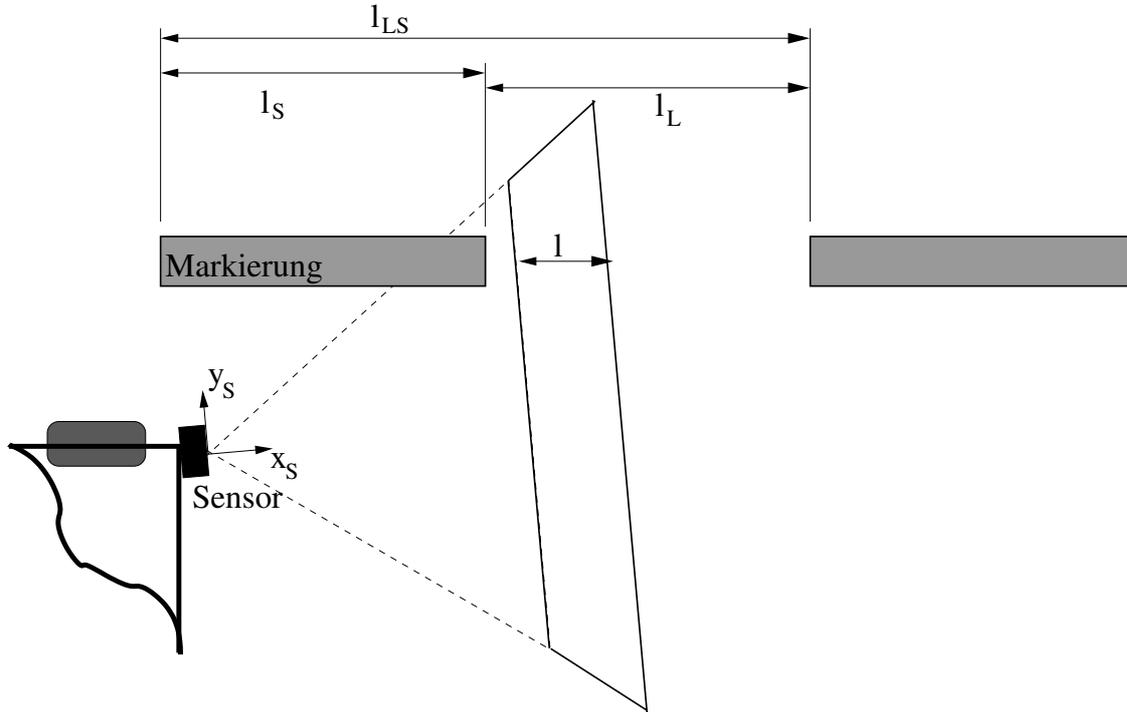


Abbildung 3.18: Verhältnis Strich/Lücke und Ausdehnung des Strahlaufftreffbereichs

Die Länge l des Strahlaufftreffbereichs in Fahrzeug-X-Richtung ist für jede Messebene unterschiedlich und wächst mit der Entfernung an. Ist l größer als die Länge der Lücke l_L , so liegt die Markierung in jedem Messzyklus innerhalb des Erfassungsbereichs. Solange l jedoch kleiner als die Lücke ist, kommt es immer wieder zu Situationen, in denen die Markierung nicht innerhalb des Auftreffbereichs liegt. Im Extremfall können eine oder mehrere Messebenen immer auf die Lücke treffen. Um dies zu vermeiden wird die Geschwindigkeit v_F des Fahrzeugs ungleich einem ganzzahligen Vielfachen K der Geschwindigkeit gewählt, die erforderlich ist, um eine Strecke der Länge l_{LS} , innerhalb eines Sensor-Messzyklus ($t = 100$ ms), abzufahren:

$$v_F \neq K \cdot \frac{l_{LS}}{0,1 \text{ s}} \quad \text{mit} \quad K = 1, 2, 3, \dots \quad (3.3)$$

Ist Gl. (3.3) erfüllt, so ist über einen langen Beobachtungszeitraum gesehen, eine für die Messebene und das vorliegende Verhältnis zwischen Strich und Lücke charakteristische Ausfallrate zu erwarten. Der gesamte Bereich, in dem der Strahl keine Markierung trifft, hat eine Länge von

$$l_{\text{ges}} = l_L - l \quad (3.4)$$

Die zu erwartende Ausfallrate ergibt sich bei unterbrochener Markierung zu

$$AR = \frac{l_{\text{ges}}}{l_{LS}} \quad (3.5)$$

Tabelle 3.3 fasst die Ausfallraten für die in dieser Arbeit verwendete Sensorkonstellation zusammen.

Tabelle 3.3: Theoretische, ebenenbezogene Ausfallrate AR für die Verhältnisse Strich:Lücke 1:1 und 1:2

Ebene	l [m]	AR (1:1) [%]	AR (1:2) [%]	$\psi_{M(1m)}$ [°]
1	1,33	38,92	59,28	8,54
2	2,13	32,25	54,83	5,88
3	3,94	17,17	44,78	3,19
4	9,77	0,0	12,39	0,48
5	67,73	0,0	0,0	-2,24

Unterschieden werden dabei die unterschiedlichen Messebenen Eins bis Fünf sowie die möglichen Verhältnisse zwischen Strich und Lücke. Mit steigender Ebenennummer, respektive Entfernung, sinkt die Ausfallrate. Ab Ebene fünf ist unabhängig von der Strichelung aufgrund der vorhandenen Überdeckung immer³⁷ mit einer Detektion zu rechnen. Im Nahbereich stehen bei einer unterbrochenen Markierung mindestens 40,7 % der Information einer durchgezogenen Markierung zur Verfügung. In der letzten Spalte von Tabelle 3.3 ist der Winkel $\psi_{M(1m)}$ eingetragen, unter dem eine Markierung mit lateralem Abstand von 1 m liegt. Es ist gut zu erkennen, dass Ebene Eins im Grenzbereich der zu den Seiten sinkenden Sensorleistung liegt. Im Gegensatz zu den restlichen Messebenen lässt Messebene Eins daher bei dezentriertem Fahren im Fahrstreifen erhöhte Ausfallraten erwarten. Im Folgenden werden die Ausfallraten der Markierungsdetektion auf deutschen Straßen untersucht. Dabei werden der Fall einer trockenen Fahrbahn und der Fall einer nassen Fahrbahn getrennt betrachtet.

3.4.1 Trockene Fahrbahn

Die Verfügbarkeit auf trockener Fahrbahn wurde im Zuständigkeitsbereich der Autobahndienststelle Kempten bewertet, die durch regelmäßige Prüfungen der Markierungsqualität³⁸ neu zu markierende Streckenabschnitte ermittelt. Auf Basis einer solchen im Mai 2004 durchgeführten Prüfung wurden die zwei Streckenabschnitte nach Tabelle 3.4 ausgewählt.

³⁷Die getroffene Aussage berücksichtigt keine Abhängigkeiten von der sensorabhängigen Detektionsreichweite.

³⁸CEN Europäisches Komitee für Normung: Anforderungen an Markierungen, 1997, S. 3–4

Tabelle 3.4: Teststrecken für Verfügbarkeitsmessungen auf trockener Fahrbahn

Nr.	Streckenabschnitt	Länge [km]	Retroreflektive Markierungseigenschaften
S1	A7 AK Memmingen – AS Dietmannsried	25,0	Zustand sehr gut
S2	A96 AS Jengen/Kaufbeuren (KM 108,5 – KM 114,0)	5,5	Dringend neu zu markieren

Streckenabschnitt S1 befindet sich auf der A7 zwischen dem Autobahnkreuz Memmingen und der Anschlussstelle Dietmannsried. Die Reflexionseigenschaften der Markierung auf diesem Teilstück erfüllten bei Befahrung die Norm. Als zweiter Abschnitt wurde eine Strecke auf der A96 ab der Anschlussstelle Jengen-Kaufbeuren zwischen Kilometer 108,5 und 114 gewählt. Für dieses Teilstück wurde im Rahmen der Überprüfung eine notwendige Neumarkierung festgestellt. Die Qualität der Markierung liegt unterhalb der gesetzlichen Anforderungen³⁹. Neben den schlechten Retroreflexionswerten auf S2 waren an diversen Stellen auch Markierungsteile abgerissen.

Die Retroreflektivität der Markierungen auf den gewählten Streckenabschnitten S1 und S2 bewegt sich jeweils im Bereich der unteren bzw. oberen Grenze der in Deutschland vorgeschriebenen Richtwerte. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf deutsche Straßen ist dadurch gegeben. Eine Ausweitung auf das europäische Ausland hingegen lässt sich nicht sicher belegen. Nach persönlichen Erfahrungen von Mitarbeitern der BASt sind die Reflexionseigenschaften der Markierungen im europäischen Ausland im Vergleich zu Deutschland jedoch als höherwertig einzuschätzen, was eine Übertragbarkeit der folgenden Ergebnisse zumindest vermuten lässt.

Um den sensorseitigen Einfluss der zu den Seiten sinkenden Detektionsleistung auf die Auswertung zu reduzieren, wurden auf den gewählten Strecken je drei Testfahrten durchgeführt. Dabei wurde die Position innerhalb des Fahrstreifens zwischen mittig (M1), stark nach rechts versetzt (M2) und stark nach links versetzt fahrend (M3) variiert. Für alle durchgeführten Messungen und jede Messebene wurde die Häufigkeit einer nicht detektierten Markierung ermittelt. Nicht markierte Streckenanteile sind von der Auswertung ausgeschlossen. Aufgrund der geringen Anzahl an Messungen wurden die Ergebnisse auf der ausschließlich in Ausfahrten auftretenden 1:1-Strichelung ebenfalls nicht ausgewertet.

³⁹Dabei ist zu beachten, dass aufgrund verstärktem Schneepflugeinsatz und einer damit verbundenen, erhöhten Abnutzung der Markierungen, in Bayern geringere Grenzwerte gelten, als für den Rest Deutschlands.

Streckenabschnitt S1

Abbildung 3.19 zeigt die Ausfallraten für Streckenabschnitt S1.

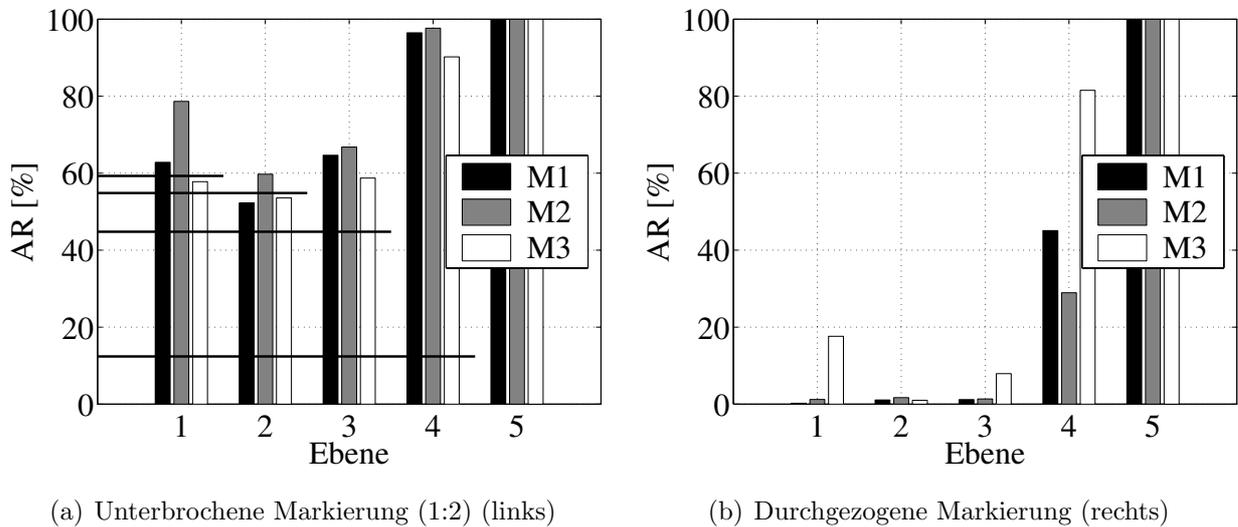
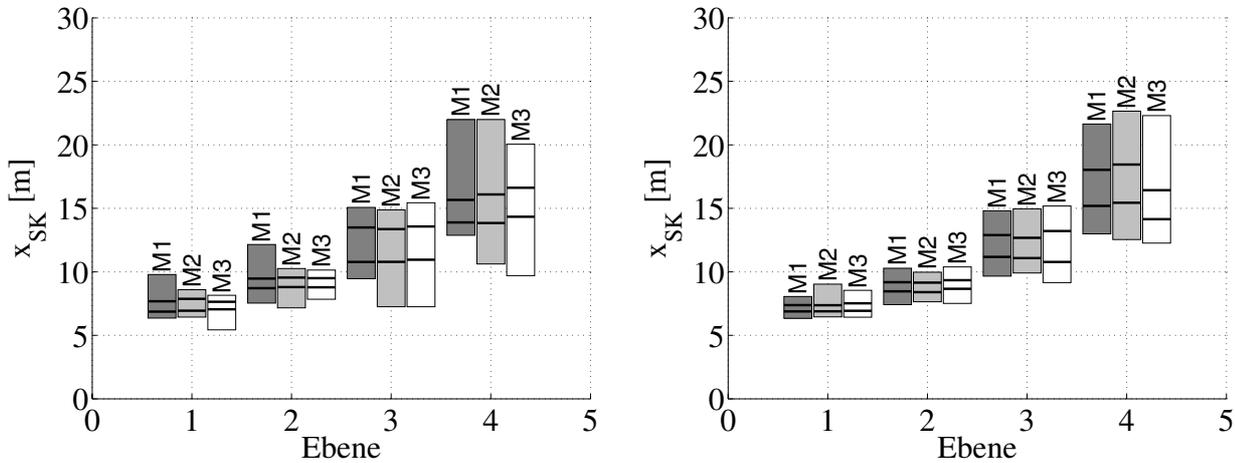


Abbildung 3.19: Ausfallraten auf Streckenabschnitt S1

Die unterbrochene und die durchgezogene Markierung sind getrennt dargestellt, eine weitere Aufschlüsselung wird in Abhängigkeit der Messebene und der Position innerhalb des Fahrstreifens vorgenommen. Die durchgezogene Markierung liefert in den ersten drei Ebenen geringe Ausfallraten. Die zum Teil hohen Ausfallraten bei den Messfahrten M2 und M3 lassen sich auf den großen lateralen Abstand zur Markierung und die sensorbedingten Qualitätsverluste zu den Seiten zurückführen. Diese bewirken vor allem im Nahbereich, dass die Markierung gar nicht oder nur zum Teil im Hauptfassungsbereich der Sensorik liegt (siehe Messung M3). In Ebene Vier steigt die Ausfallrate schon bei mittiger Fahrt auf ca. 42 %, die Verfügbarkeit sinkt also stark ab. Ebene Fünf leistet gar keinen Beitrag mehr zur Markierungsdetektion. Beim Blick auf die Ergebnisse der unterbrochenen Markierung fällt auf, dass die Ausfallraten vor allem für die erste und zweite Ebene nahe bei den nach Tabelle 3.3 prädizierten Werten liegen (siehe Hilfslinien in Abbildung 3.19). Schon die dritte Ebene zeigt höhere Ausfallraten und die vierte Ebene liefert in diesem Fall so gut wie gar keine Informationen mehr. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die unterbrochene Markierung schlechtere Werte liefert als die durchgezogene Markierung. Sensorbedingte Einflüsse lassen sich hier nicht ganz ausschließen. Da die unterbrochene Markierung innerhalb der Gesamtfahrbahn liegt und somit einer deutlich größeren Anzahl an Überrollungen ausgesetzt ist, besteht die Möglichkeit, dass die unterbrochene Markierung stärker abgenutzt ist und dadurch schlechter retroreflektiert. Weiterhin auffällig sind die Ergebnisse in Messebene Zwei. Diese weist für die unterbrochene Markierung teilweise bessere Ausfallraten auf als erwartet. Die Ursache ist in Nickbewegungen des Fahrzeugs sowie Unregelmäßigkeiten in der Markierung zu suchen. Durch diese Einflüsse können Abweichungen zu den prädizierten Ausfallraten auftreten.

Abbildung 3.20 zeigt die Detektionsreichweiten im Koordinatensystem der gesamten Sensor-Konstellation, ermittelt aus den gültigen Messungen M1 bis M3 auf Streckenabschnitt S1.



(a) Unterbrochene Markierung (1:2) (links)

(b) Durchgezogene Markierung (rechts)

Abbildung 3.20: Detektionsreichweiten auf Streckenabschnitt S1

Die Darstellung zeigt ein Rechteck, in dem alle gültigen Messungen liegen. Zwei Striche innerhalb des Rechtecks geben die Position der 10 %- und der 90 %-Grenze an, unter der die jeweilige Prozentzahl der Messungen liegt. Für beide Markierungstypen ergibt sich ein ähnliches Gesamtbild. Auch die maximalen Reichweiten in Ebene Vier liegen mit ca. 23 m nah beieinander. Die Streubereiche liegen für die unterbrochene Markierung ein wenig höher, was damit zusammenhängt, dass die Markierung oft nicht komplett durch die jeweilige Messebene abgedeckt wird. Dadurch kommt es vermehrt zu Reflexionen im oberen und unteren Bereich der Strahlauffreifläche.

Streckenabschnitt S2

Abbildung 3.21 stellt die Ausfallraten der Messungen M1 bis M3 für den Streckenabschnitt S2 dar. Die Gesamtentwicklung der Ausfallrate ist ähnlich der auf Streckenabschnitt S1, jedoch mit höheren Ausfallraten. So kann bei schlechter Markierungsqualität nicht mehr mit Messungen aus Ebene Vier gerechnet werden. Ebene Drei zeigt ähnliche Ausfallraten wie Ebene Vier auf Streckenabschnitt S1. Messebene Eins und Zwei weisen sowohl für die unterbrochene als auch für die durchgezogene Markierung schlechtere Werte als bei Strecke S1 auf, liegen jedoch zumindest für die mittige Fahrt bei maximal 5 %. Die stark versetzten Fahrten M2 und M3 zeigen für die jeweils weiter entfernte Markierung rechts oder links hohe Abweichungen. Der Trend, dass die unterbrochene Markierung in der Fahrbahnmitte schlechter reflektiert, lässt sich auf Streckenabschnitt S2 nicht bestätigen.

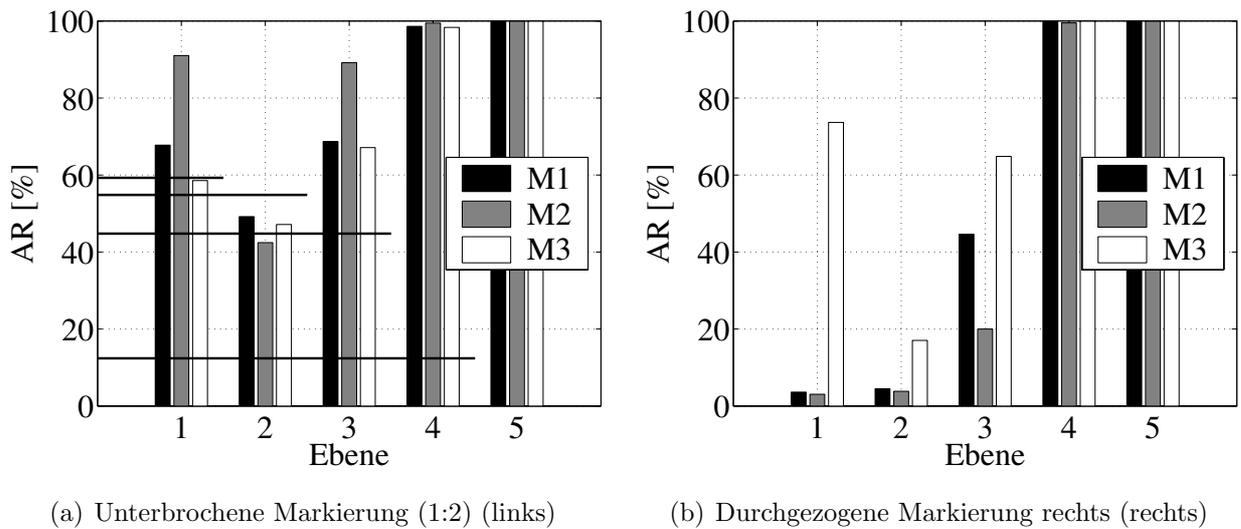


Abbildung 3.21: Ausfallraten auf Streckenabschnitt S2

Die Detektionsreichweiten in Abbildung 3.22 liegen unterhalb der Werte von S1 und bestätigen die geringere Qualität der Markierungsdetektion.

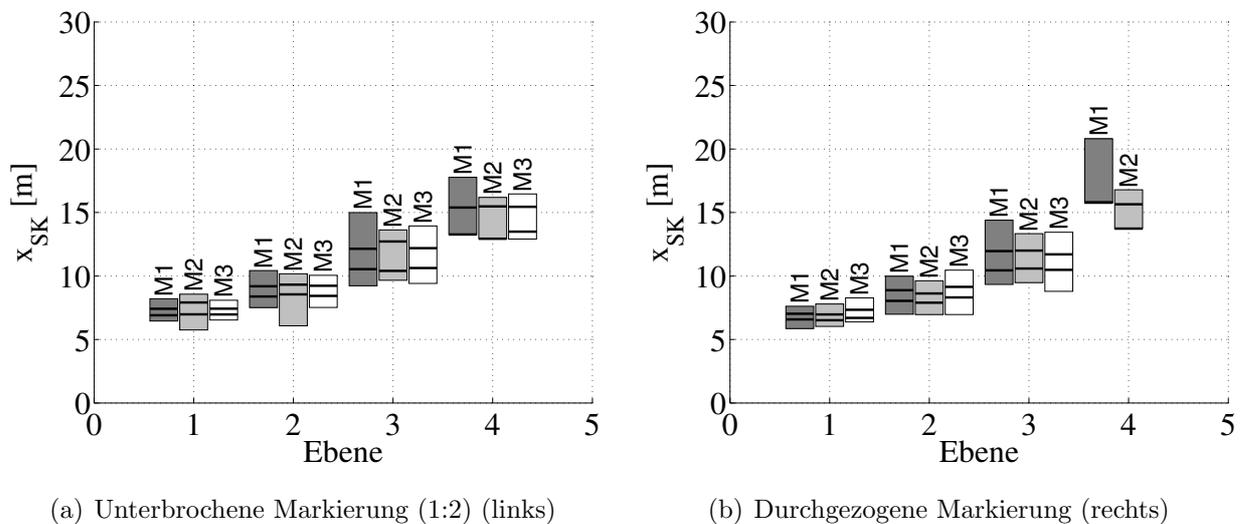


Abbildung 3.22: Detektionsreichweiten auf Streckenabschnitt S2

Das für Ebene Vier gezeigte Rechteck der durchgezogenen Markierung bestätigt diesen Eindruck nicht. Allerdings basiert es auf einer geringen Anzahl von Messwerten. Insgesamt ergibt sich aus den Messungen auf Streckenabschnitt S2 eine Minimalreichweite der Markierungsdetektion bis zur zweiten Messebene, d. h. bis ca. 8 m.

3.4.2 Nasse Fahrbahn

Eine Aussage über die Verfügbarkeit der Markierungsdetektion auf nasser Fahrbahn ist ein wichtiger Aspekt im Hinblick auf einen Serieneinsatz des Systems. In Kapitel 3.1 wurde die

Gestaltung heutiger Markierungen zur Erhöhung ihrer Nachtsichtbarkeit bei nasser Fahrbahn beschrieben. Übertragen auf einen Laserstrahl bedeutet dies, dass die Verfügbarkeit der Markierungsdetektion bei Nässe von der Markierungsbeschaffenheit, ihrem Abnutzungsgrad und der Wasserfilmdicke abhängt. Einen exakten Nachweis dieser Vermutung zu führen ist aufwändig. Da jedoch auch ein Fahrerassistenzsystem in naher Zukunft keine exakten Informationen über Wasserfilm und Markierung zur Verfügung haben wird, wurde ersatzweise der tendenzielle Einfluss einer nassen Fahrbahn untersucht. Als Mindestanforderung für die spätere Fahrstreifenschätzung wurde dazu zunächst die Detektion der Markierung, zumindest in den Ebenen Eins und Zwei, festgelegt, d. h. eine minimale Detektionsreichweite von ungefähr 8 m (ähnlich wie auf Streckenabschnitt S2 in Kapitel 3.4.1) gefordert. Die Mindestanforderung wurde erst dann als erfüllt angesehen, wenn die Ausfallrate einer Messebene maximal 10 % beträgt. Zur Überprüfung dieser Anforderung wurde ein Streckenabschnitt in drei unterschiedlichen Wettersituationen WS (siehe Tabelle 3.5) jeweils dreimal befahren.

Tabelle 3.5: Testsituationen für Verfügbarkeitsmessungen auf nasser Fahrbahn

Situation	Streckenabschnitt	Länge [km]	Straßenzustand
WS1	A81 AS Böblingen-Hulb – AS Herrenberg	8,0	trocken
WS2	A81 AS Böblingen-Hulb – AS Herrenberg	8,0	feucht (Nieselregen)
WS3	A81 AS Böblingen-Hulb – AS Herrenberg	8,0	nass (sehr starker Regen mit Gischtbildung)

Der Versuchsträger wurde bei jeder Messung mittig, innerhalb des Fahrstreifens bewegt. Die Messungen wurden in den unterschiedlichen Wettersituationen trockene Fahrbahn, feuchte Fahrbahn bei Nieselregen sowie nasse Fahrbahn bei starkem Regen mit Gischtbildung durchgeführt. Als sichtbares Kriterium für die Definition der feuchten Fahrbahn ist eine durchgehende Einfärbung der Fahrbahn durch Nässe gewählt. War zusätzlich die Aktivierung der Scheibenwischer erforderlich, so wurde die Fahrbahn als nass definiert. Da sich bei der ausgewählten Strecke die Strichelung der linken Markierung im nachhinein als unregelmäßig herausstellte, werden ausschließlich die Messungen der durchgezogenen Markierung ausgewertet. In Abbildung 3.23 sind die Ergebnisse der Messungen auf nasser Fahrbahn zusammengestellt.

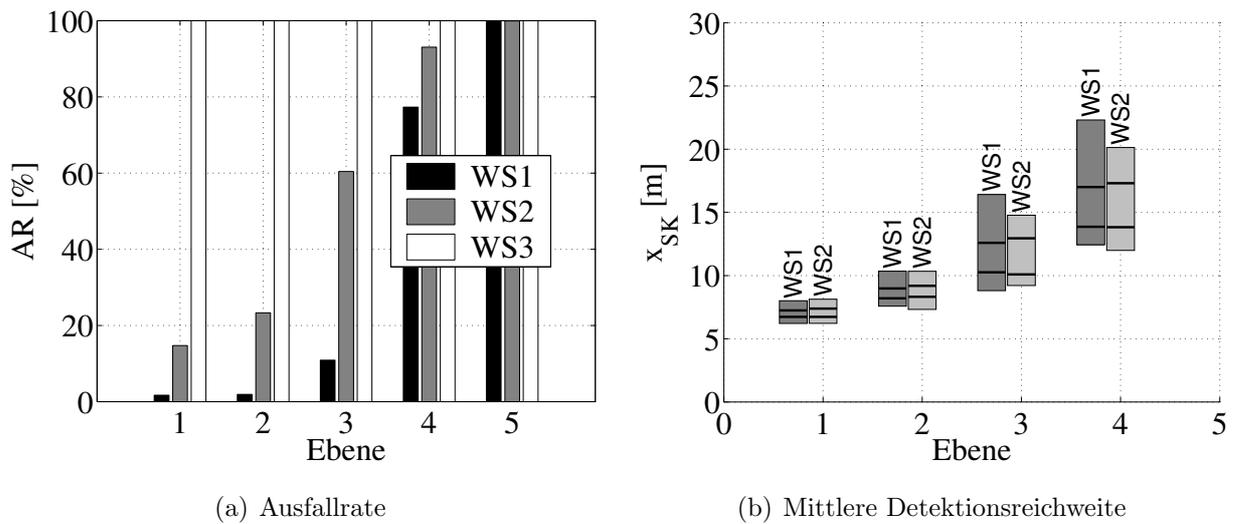


Abbildung 3.23: Verfügbarkeit der Markierungsdetektion auf nasser Fahrbahn

Ein Vergleich der Ausfallraten der Messung WS1 mit den Messungen M1 aus dem vorangehenden Kapitel zeigt, dass der gewählte Streckenabschnitt qualitativ im mittleren Bereich deutscher Autobahnen anzusiedeln ist. Die Ausfallraten bei trockener Fahrbahn sind für die Ebenen Eins und Zwei gering, schon Ebene Drei weist jedoch eine Ausfallrate von ca. 10 % auf. Ebene Vier liefert keine zuverlässigen Messwerte mehr. Mit zunehmender Nässe auf der Fahrbahn steigt die Ausfallrate so stark an, dass auch schon bei feuchter Fahrbahn (WS2) nicht immer davon ausgegangen werden kann, dass eine Schätzung des Fahrstreifenverlaufs durchführbar ist. Die Messung WS3 zeigt auf, dass bei nasser Fahrbahn keine Fahrstreifenschätzung mehr möglich ist. In den mittleren Detektionsreichweiten ergibt sich nur ein geringer Unterschied zwischen den unterschiedlichen Wettersituationen, d. h. die einzelnen Messungen unterscheiden sich stark in ihrer Anzahl, jedoch nur marginal in ihrer Qualität. Dies liegt daran, dass bei feuchter Fahrbahn auf bestimmten Streckenanteilen die Markierungsqualität zur Detektion ausreichte, wohingegen an manchen Stellen keine Detektion möglich war.

Die zuvor aufgestellte Mindestanforderung kann nicht als erfüllt angesehen werden. Die gemessenen Ausfallraten lassen weiterhin vermuten, dass auch schon bei geringer Nässe in bestimmten Situationen eine Fahrstreifenschätzung nicht möglich ist. Unabhängig von der tatsächlich auftretenden Minderung der Verfügbarkeit besteht daher die Forderung nach einer Rückfallebene, auf die bei Nässe zurückgegriffen werden kann. Für die Fahrstreifenzuordnung bietet sich als Rückfallebene die parallele Berechnung eines herkömmlichen Fahrschlauchs an, wie sie auch in Kapitel 1.3.2 vorgestellt wird. Für die Zielauswahl kann dann der jeweils beste Wert gewählt werden. Eine aktive Erkennung der nassen Fahrbahn wäre ebenfalls denkbar. Da bei Nässe die Fahrbahn in der Regel schnell keine Messpunkte mehr liefert, kann eine Umschaltung z. B. durch Auswertung der Anzahl der Messpunkte in den fahrzeugnahen Ebenen Eins bis Drei erfolgen. Auch eine geschwindigkeitsabhängige Bewertung der Anzahl insgesamt detektierter Markierungspositionen über einen bestimmten Zeitraum hinweg, kann als

Auslöser für die Umschaltung verwendet werden. Ein weiteres Kriterium zur Umschaltung ist eine Aktivierung der Scheibenwischer durch den Fahrer.

Ein direkter Vergleich mit einem Kamera-System auf nasser Fahrbahn wurde nicht durchgeführt. Auf Basis vieler Erfahrungen mit dem Spurerkennungssystem OLR⁴⁰ kann jedoch zumindest eine Tendenz festgehalten werden. Obwohl die Kamera genauso wie der Lidar eine schlechtere Performance bei nasser Fahrbahn aufweist, ist der Leistungsabfall der Kamera jedoch vor allem am Tag geringer, weil der Videosensor nicht ausschließlich auf die retroreflektiven Eigenschaften der Markierung angewiesen ist. Bei nasser Fahrbahn in der Nacht sind beide Systeme stark von der Qualität der Markierung abhängig. Auf trockener Fahrbahn können mit einer Kamera jedoch höhere Reichweiten als mit dem Lidar erzielt werden.

3.5 Fazit

Die Höhe der Rückstrahlintensität I_S eines Echos, das in einem Lidarsensor empfangen wird, hängt von der Distanz zur Markierung, der Markierung selbst sowie dem Auftreffwinkel zwischen Strahl und Markierung ab. Je größer der Auftreffwinkel ist, desto geringer ist der Betrag der Rückstrahlintensität. Die retroreflektiven Eigenschaften heutiger Markierungen unterstützen deren Detektion durch den Lidarsensor. Ein absoluter Wert für die Reichweite einer Markierungsdetektion kann jedoch nicht angegeben werden, ohne dabei die Einflüsse durch Sensorposition, Markierung und Sensorik zu berücksichtigen. Mit der Sensorik, die in dieser Arbeit verwendet wurde, wurde eine hochwertige Markierung im Mittel bis in ca. 21 m detektiert. Durch Verwendung eines anderen Sensors gleichen Prinzips, ließ sich diese Detektionsreichweite um etwa 30 % steigern. Die potentiellen Detektionsreichweiten erfüllen damit die Anforderungen der geplanten Anwendung im Stop&Go-Verkehr. Bei der gewählten Sensorik ist die Bestimmung der Position eines Messpunktes in Fahrzeugkoordinaten mit einer Unsicherheit von bis zu 0,5 m in x - und 0,18 m in y -Richtung behaftet. Eine Verbesserung ist dabei in erster Linie durch eine genauere Distanzmessung zu erzielen, negative Einflüsse durch die Strahldivergenz sind im vorliegenden Fall vergleichsweise gering. Für die Ermittlung der Koordinaten eines Messpunkts in der x - y -Ebene spricht daher nichts gegen die generelle Annahme des Reflexionsursprungs im Strahlzentrum. Auch bei einer Fahrzeugaufbaubewegung unterliegt die Genauigkeit der dabei errechneten Koordinaten nur geringen Änderungen.

Auf Basis einer gradientenbasierten Kantendetektion kann im Intensitätssignal einer Messebene das lokale Maximum detektiert werden, das durch eine Markierung hervorgerufen wird. Die Qualität der Kantendetektion ist durch das Grundrauschen der Intensitätsmessung bestimmt, welches wiederum von Sensor und Fahrbahn abhängt. Die Unterdrückung von Fehldetektionen wird in der vorliegenden Arbeit durch Einführung des Schwellwerts S_V vorgenommen, der auf Basis von Referenzmessungen auf unterschiedlichen Fahrbahnen er-

⁴⁰Smuda von Trzebiatowski: Multihypothesenanalyse, 2003, S. 1ff

mittelt wurde. Ein detektiertes Markierungsmaximum beinhaltet Informationen über Form und Verlauf der Markierung. Aufgrund des fehlenden Zugriffs auf die Signalverarbeitung des Sensors ist die Interpretation des Markierungsmaximums eingeschränkt. Die Innenkante der Markierung kann zuverlässig bestimmt und für die spätere Schätzung des Fahrstreifenverlaufs verwendet werden. In Folgearbeiten bevorzugt bei – oder in Kooperation mit – einem Sensorhersteller sollte das Potential der Signalverarbeitung jedoch genauer evaluiert werden.

Es wurden Untersuchungen zur Verfügbarkeit der Markierungsdetektion auf deutschen Straßen durchgeführt. Vor allem in Messebene Eins und Zwei ergab sich eine hohe Verfügbarkeit von mindestens 95 %, selbst bei schlechten, retroreflektiven Eigenschaften der Markierung. Zu den höheren Messebenen wachsen jedoch die Ausfallraten an. Auch bei Markierungen mit hohen Retroreflexionswerten liefert Ebene Fünf überhaupt keine Detektion und Ebene Vier in nur ca. 50 % der Messungen. Es empfiehlt sich eine veränderte Anordnung der einzelnen Messebenen, mit dem Ziel, den möglichen Detektionsbereich besser abzudecken. Die Detektionsleistung ist sensibel auf dezentriertes Fahren im Fahrstreifen, was jedoch in erster Linie auf die sensorbedingt sinkende Detektionsqualität am Rand des Öffnungsbereichs zurückzuführen ist. Nässe auf der Fahrbahn führt schnell zu hohen Ausfallraten bis hin zum Totalausfall der Markierungsdetektion und macht eine Rückfallebene erforderlich. Wenn jedoch eine Markierung innerhalb einer Messebene detektiert wird, so unterscheidet sich die dabei ermittelte Entfernung nicht erkennbar. Allerdings ist der Spielraum durch die feste Ausrichtung der einzelnen Messebenen stark eingeschränkt. Selbst bei schlechter Markierungsqualität ist auf deutschen Straßen eine Markierungsdetektion bis in ca. 8 m vor dem Fahrzeug möglich.

4 Schätzung des Fahrstreifenverlaufs

Die Ergebnisse der Markierungsdetektion werden im vorliegenden Kapitel zur Schätzung des Fahrstreifenverlaufs verwendet. Es wird ein Modell zur Beschreibung des Fahrstreifens hergeleitet und darauf aufbauend die geeignete Wahl eines Filters zur Schätzung des Fahrstreifenverlaufs diskutiert. Das Modell und auch das Filter werden dabei so gewählt, dass sowohl die Anforderungen der Zielanwendung als auch die Erkenntnisse der vorangehenden Kapitel berücksichtigt sind. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Bewertung der Schätzergebnisse.

4.1 Fahrstreifenmodell

Markierungspositionen, die in den einzelnen Messebenen detektiert werden, repräsentieren Teile des Fahrstreifens zum jeweiligen Zeitpunkt der Messung. Mit Hilfe eines mathematischen Modells können die Einzelmessungen gemeinsam zur Beschreibung des Fahrstreifenverlaufs verwendet werden. Der Verlauf einer realen Fahrbahn wird in den einfachsten Fällen durch den Kreis und die Gerade definiert¹. Allerdings sind die Übergänge zwischen beiden Formen problematisch, da Sprünge in der Querbeschleunigung auftreten. Um diese im Sinne eines hohen Fahrkomforts zu vermeiden, werden Kreis und Gerade durch eine Klothoide ineinander überführt², die es ermöglicht, eine konstante Änderung der Krümmung vorzugeben. Da die Klothoide im kartesischen Koordinatensystem nicht geschlossen lösbar ist, werden zur Beschreibung des Fahrstreifenverlaufs in technischen Systemen vereinfachende Modelle verwendet. So wird in einigen Ansätzen eine Gerade^{3,4,5} oder ein Kreismodell^{6,7} angewandt. Andere Arbeiten verwenden Splines⁸, durch Reihenentwicklung angenäherte Klothoide⁹ oder Polynome unterschiedlichen Grades^{10,11,12}. Koshla¹³ setzt zwei Parabeln aneinander

¹Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Linienführung, 1995, S. 14

²Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Linienführung, 1995, S. 15

³Aufrere, Chapuis, Chausse: Locate a Vehicle on a Nonstructured Road, 2000, S. 1ff

⁴Fürstenberg, Kämpchen, Lages, Dietmayer, Willhoeft: Markierungserkennung, 2005, S. 1ff

⁵Rongben, Youchun: Road Edge Detection, 2002, S. 1ff

⁶Fardi, Scheunert, Cramer, Wanielik: Laserbased Lane Detection II, 2003, S. 1ff

⁷Ma, Lakshmanan, Hero: Pavement Boundary Detection, 2000, S. 1ff

⁸Wang, Shen, Teoh: Catmull-Rom Spline, 1998, S. 1ff

⁹Schwarzinger: Optische Spurerkennung, 1998, S. 1ff

¹⁰Kirchner: Sensordatenverarbeitung eines Laserscanners, 2000, S. 43

¹¹Lakshmanan, Kaliyaperumal, Kluge: LEXLUTHER, 1998, S. 1ff

¹²Risack, Klausmann, Krüger, Enkelmann: Robust Lane Recognition, 1998, S. 1ff

¹³Koshla: Two-Clothoid Road Model, 2002, S. 1ff

mit dem Ziel, zwei aufeinander folgende, gegensätzlich orientierte Kurven beschreiben zu können. Behringer¹⁴ schätzt zusätzlich zum ebenen Fahrstreifenverlauf¹⁵ eine vertikale Änderung im Fahrbahnverlauf (Fahrbahnneigung). Die vielen unterschiedlichen Ansätze unterscheiden sich durch ihre Komplexität und ihre Genauigkeit, je nach Anwendung wird versucht das beste Modell zu wählen.

Die Verwendung eines Modells bedeutet zunächst nur die unabhängige Schätzung des Fahrstreifenverlaufs anhand eines Einzelbildes, d. h. anhand einer Momentaufnahme. Durch Erweiterung zu einem dynamischen Modell können sowohl Informationen aus vergangenen Zeitschritten als auch über die Fahrzeugbewegung in diese Schätzung mit einbezogen werden. Für eine fahrzeugtaugliche Anwendung haben sich deswegen vor allem Ansätze unter Verwendung eines dynamischen Modells durchgesetzt. Auch dabei gilt es jedoch zu beachten, dass die Qualität der Schätzung zu einem erheblichen Anteil von der Übereinstimmung der Modellvorstellung mit dem realen Fahrstreifenverlauf abhängt¹⁶.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Fahrstreifenzuordnung, d.h. die Bewertung der Position anderer Verkehrsteilnehmer relativ zum eigenen Fahrstreifen. Dazu reicht eine Kenntnis des horizontalen Fahrstreifenverlaufs aus. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Randbedingungen wird deswegen im folgenden Kapitel zunächst ein mathematisches Modell zur Beschreibung des horizontalen Fahrstreifenverlaufs hergeleitet, das anschließend zu einem dynamischen Modell erweitert wird. In einem weiteren Schritt wird die Frage beantwortet, warum der Einfluss durch fehlende Kenntnis des vertikalen Fahrbahnverlaufs in der vorgelegten Arbeit vernachlässigbar ist.

4.1.1 Kreismodell

Im Vergleich zu einer Kamera liefert das lidarbasierte System nur sehr wenige Messwerte. Wie in Kapitel 3.4.1 gezeigt, kann selbst eine Markierung mit hohen Retroreflexionswerten in maximal vier Messebenen eines Sensors detektiert werden, bei einer gestrichelten Markierung ist in vielen Fällen mit einer noch geringeren Anzahl an Messwerten zu rechnen. Dies erfordert eine geringe Komplexität des mathematischen Modells. Zu Beginn dieses Kapitels wurde die Vielzahl möglicher Modellvorstellungen erwähnt, die eine horizontale Beschreibung des Fahrstreifenverlaufs ermöglichen. Jedes der vereinfachenden Modelle weicht in bestimmten Situationen von der Realität ab, durch eine Gerade z. B. kann weder der Kreis noch die Klothoide exakt beschrieben werden. Cramer¹⁷ untersucht eine quadratische und eine kubische Parabel, sowie ein Kreismodell hinsichtlich ihrer Genauigkeit in den real auftretenden Situationen: Gerade, Kreisbogen und Klothoide. Das Kreismodell weist ausschließlich Abweichungen bei der Beschreibung der Klothoide auf, die quadratische und die kubische Parabel

¹⁴Behringer: Rechnersehen, 1997, S. 54–97

¹⁵Im Folgenden wird vor allem die Bezeichnung horizontaler Fahrstreifenverlauf verwendet.

¹⁶Cramer, Scheunert, Wanielik: Modelle zur Umfelderkennung, 2005, S. 77

¹⁷Cramer, Scheunert, Wanielik: Modelle zur Umfelderkennung, 2005, S. 76–77

hingegen bei der Beschreibung von Kreis und Klothoide. Im Vergleich zum Kreismodell ermöglicht die kubische Parabel eine bessere Beschreibung der Klothoide. In Kauf genommen werden muss dafür ein weiterer Zustand, wohingegen das Kreismodell allein durch seinen Radius bzw. seine Krümmung¹⁸ bestimmt ist. Da der einzige Nachteil des Kreismodells die mangelhafte Beschreibung der Klothoide ist, wurde der vorliegende Einfluss für den Anwendungsfall genauer untersucht. Abbildung 4.1 zeigt vor diesem Hintergrund die maximale, laterale Änderung einer Klothoide für autobahnähnliche Straßen mit der Entwurfsgeschwindigkeit $v_e = 70$ km/h.

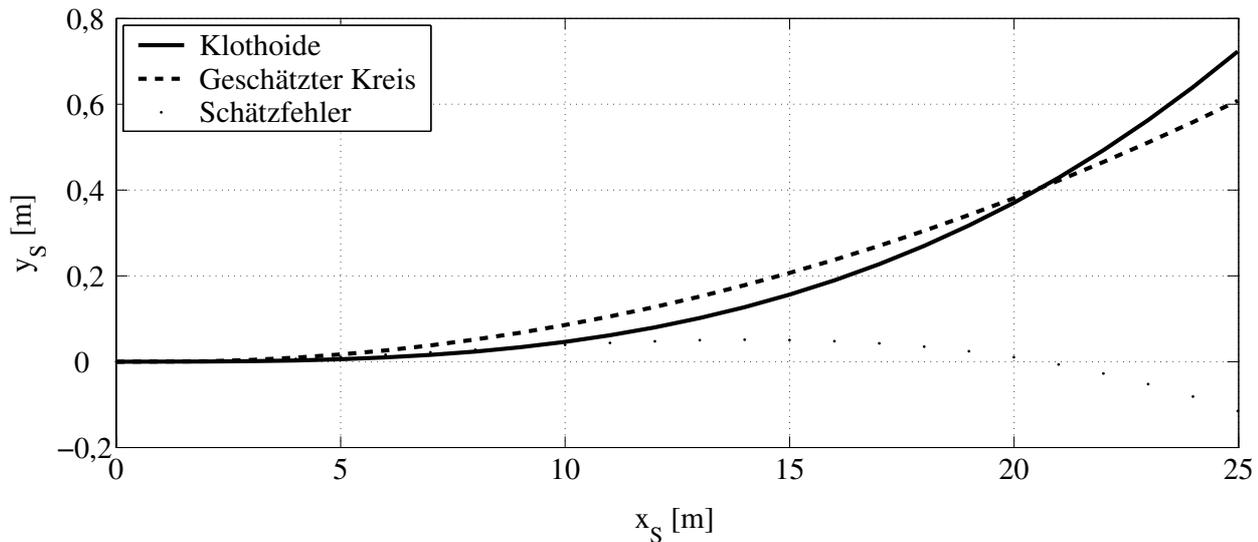


Abbildung 4.1: Maximale, laterale Änderung über der Distanz bei Entwurfsgeschwindigkeit 70 km/h

Gleichzeitig ist ein Kreisbogen eingezeichnet, der mit Hilfe eines Least-Squares¹⁹ und den zur Klothoide gehörenden Koordinaten²⁰ geschätzt wurde. Die resultierende Abweichung zwischen dem geschätzten Kreis und der Klothoide liegt in einer Distanz von ungefähr 25 m bei ca. 0,11 m. Im Hauptdetektionsbereich der Sensorik unterhalb von 23 m liegen die Abweichungen sogar nur bei maximal 0,06 m. Da dieser Unterschied im Vergleich zur Messunsicherheit der gewählten Sensorik nach Kapitel 3.2.3 gering ist, wird für die vorliegende Arbeit ein Kreismodell verwendet.

Neben der Krümmung c sind die Breite b des Fahrstreifens sowie die relative Position des Fahrstreifens zum Ego-Fahrzeug wichtige Parameter für die spätere Fahrstreifenzuordnung (siehe Abbildung 4.2).

¹⁸Die Krümmung $c = 1/R$ wird eingeführt um eine Unstetigkeitsstelle bei $R = \infty$ zu vermeiden

¹⁹Gelb: Applied Optimal Estimation, 1974, S. 23–24

²⁰Es wird der in Kapitel 3.4 ermittelte Detektionsbereich der verwendeten Sensorkonstellation zwischen 6 m und 21 m mit einer Diskretisierung von $\Delta x_s = 5$ m verwendet.

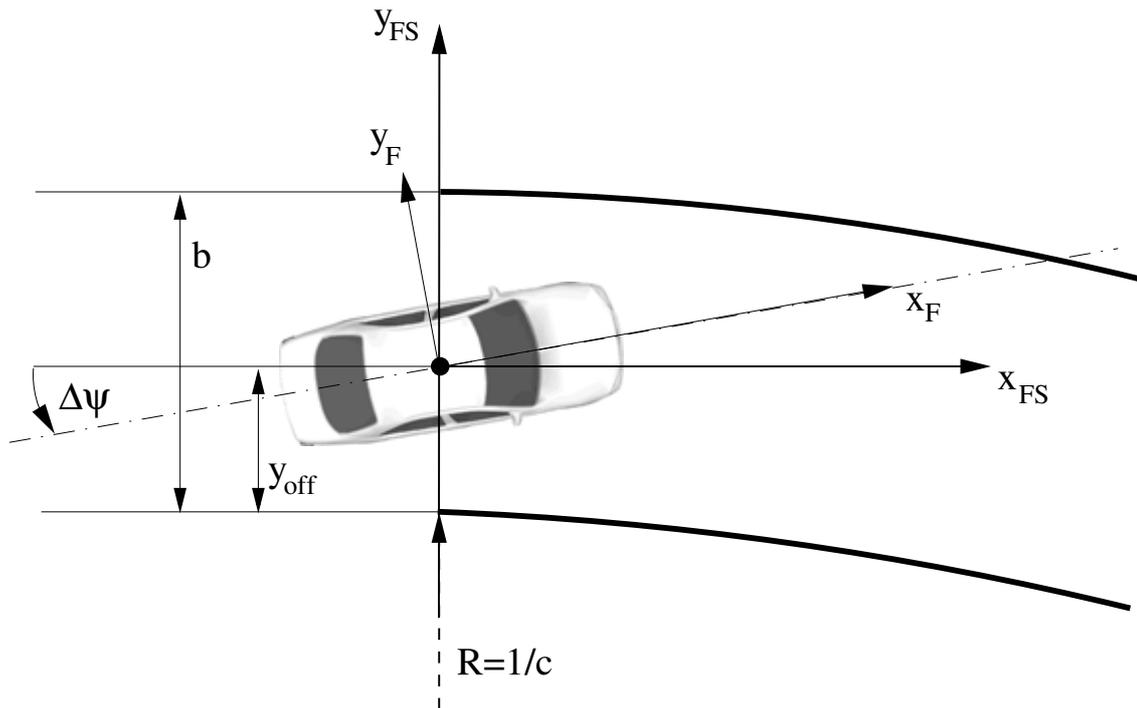


Abbildung 4.2: Zustände des Kreismodells

Die relative Position wird zum einen durch die laterale Ablage des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens y_{off} , zum anderen durch den Winkel $\Delta\psi$ beschrieben, unter dem das Fahrzeug zum Fahrstreifen ausgerichtet ist. Das verwendete Kreismodell ist vollständig gegeben durch den Zustandsvektor:

$$\vec{x} = [c \ b \ y_{\text{off}} \ \Delta\psi]^T \quad (4.1)$$

Die Position einer Markierung wird im Fahrzeugkoordinatensystem gemessen, der Kreis jedoch innerhalb des Fahrstreifenkoordinatensystems durch die Kreisgleichung beschrieben (Abbildung 4.2):

$$R^2 = x_{\text{FS}}^2 + y^2 \quad \text{mit} \quad R = \frac{1}{c} \quad (4.2)$$

Für beide Koordinatensysteme wird der Ursprung im Fahrzeugschwerpunkt angenommen. Unter Berücksichtigung des lateralen Offsets und der Fahrstreifenbreite ergibt sich:

$$\left(\frac{1}{c} - ab\right)^2 = x_{\text{FS}}^2 + \left(y_{\text{FS}} - y_{\text{off}} - \frac{1}{c}\right)^2 \quad \text{mit} \quad a \in [0, 1] \quad (4.3)$$

Mit Hilfe des Faktors a kann in Gl. (4.3) wahlweise die linke ($a = 1$) oder die rechte ($a = 0$) Markierung beschrieben werden. Die Rotation

$$\begin{pmatrix} x_{\text{FS}} \\ y_{\text{FS}} \\ z_{\text{FS}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\psi) & -\sin(\Delta\psi) & 0 \\ \sin(\Delta\psi) & \cos(\Delta\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{\text{F}} \\ y_{\text{F}} \\ z_{\text{F}} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

verbindet die in Fahrzeugkoordinaten gemessenen Markierungspositionen mit dem Fahrstreifenkoordinatensystem. Anhand von Gl. (4.3) und Gl. (4.4) ergibt sich:

$$y_F = \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right) \cos(\Delta\psi) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 \cos^2(\Delta\psi) - \left[x_F^2 + \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 - 2x_F\left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right) \sin(\Delta\psi) - \left(\frac{1}{c} - ab\right)^2\right]} \quad (4.5)$$

Da Gl. (4.5) für $c = 0$ (gerader Fahrstreifenverlauf) nicht definiert ist, ist eine weitere Umformung erforderlich. Gemäß Kapitel A.2 verändert sich Gl. (4.5) zu:

$$y_F = \frac{2 y_{\text{off}} + c y_{\text{off}}^2 + 2 a b - c a^2 b^2 + c x_F^2 - 2 x_F (1 + c y_{\text{off}}) \sin(\Delta\psi)}{(1 + c y_{\text{off}}) \cos(\Delta\psi) + \sqrt{(1 - a b c)^2 - [c x_F - (1 + c y_{\text{off}}) \sin(\Delta\psi)]^2}} \quad (4.6)$$

Gl. (4.6) verbindet die Beschreibung des Fahrstreifenverlaufs mit den in Fahrzeugkoordinaten vorliegenden Markierungspositionen, wobei schon zu diesem Zeitpunkt auf den nicht-linearen Charakter der Gleichung hingewiesen sei, der bei der späteren Schätzung des Fahrstreifenverlaufs eine wichtige Rolle spielt.

4.1.2 Dynamisches Kreismodell

Die in \vec{x} zusammengefassten Zustände unterliegen dynamischen Veränderungen, die durch ein physikalisches Modell beschrieben werden können. Dabei sind die Krümmung c und die Breite b unabhängig von der eigenen Fahrzeugbewegung. Ihre Veränderung hängt ausschließlich von der Fahrbahn ab. Da weder eine Änderung der Breite noch eine Krümmungsänderung ermittelt werden, wird für das Modell davon ausgegangen, dass diese konstant sind. Anders verhält es sich für y_{off} und $\Delta\psi$, die bei konstantem Fahrstreifenverlauf ausschließlich von der Bewegung des Fahrzeugs abhängen. Ändert das Fahrzeug die Bewegungsrichtung, so ändert sich in gleichem Maße seine Ausrichtung zum Fahrstreifen. Die Bewegung des Fahrzeugs kann vereinfacht durch seine Gierrate $\dot{\psi}_F$ und seine Geschwindigkeit v_F beschrieben werden, die Dynamik des Zustandsvektors \vec{x} ist dadurch wie folgt gegeben:

$$\dot{c} = 0 \quad (4.7)$$

$$\dot{b} = 0 \quad (4.8)$$

$$\dot{y}_{\text{off}} = v_F \cdot \Delta\psi \quad (4.9)$$

$$\dot{\Delta\psi} = \dot{\psi}_F - c \cdot v_F \quad (4.10)$$

Die Genauigkeit der gierraten-basierten Beschreibung der Fahrzeugbewegung sinkt bei kleinen Geschwindigkeiten²¹. Unterhalb von 10 km/h wird deswegen eine Beschreibung verwen-

²¹Robert Bosch GmbH: ACC, 2002, S. 37

det, die auf dem Lenkwinkel aufbaut. Um dafür die bestehenden Gleichungen nicht zu ändern wird der Lenkwinkel in eine „Pseudo“-Gierrate $\dot{\psi}_\delta$ umgerechnet, die wieder in die obigen Gleichungen eingesetzt werden kann. Die gefahrene Krümmung berechnet sich bei kleinem Lenkwinkel δ_F unter Verwendung des Radstandes d_{ax} nach:

$$c_\delta = \frac{\delta_F}{d_{ax}} \quad (4.11)$$

Aus Gl. (1.1) und Gl. (4.11) ergibt sich die „Pseudo“-Gierrate:

$$\dot{\psi}_\delta = \frac{\delta_F v_F}{d_{ax}} \quad (4.12)$$

Um einen steten Übergang zwischen $\dot{\psi}_\delta$ und $\dot{\psi}_F$ zu gewährleisten, werden beide Werte auf Basis der Gewichtungsfunktion gemäß Abbildung 4.3 addiert.

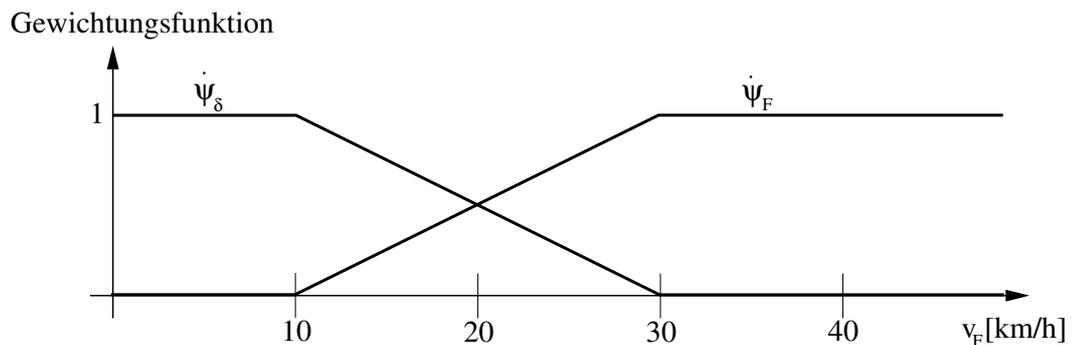


Abbildung 4.3: Gewichtung der Gierrate im Niedergeschwindigkeitsbereich

4.1.3 Einflüsse durch die Fahrbahnneigung

Behringer²² schätzt auf Basis von Videodaten den horizontalen Verlauf des Fahrstreifens und den vertikalen Verlauf der Fahrbahn. Um eine Fahrstreifenzuordnung durchführen zu können, reicht die Schätzung des horizontalen Fahrstreifenverlaufs zwar aus, die zusätzliche Berücksichtigung einer Längs- oder Querneigung der Fahrbahn wird jedoch erforderlich, wenn deren Vernachlässigung deutliche Fehler in die horizontale Fahrstreifenschätzung induziert. Die Notwendigkeit einer zusätzlichen Berücksichtigung der Fahrzeugnickbewegung, wie sie bei Kamera-Systemen oft verwendet wird, konnte für diese Arbeit schon in Kapitel 3.2.3 ausgeschlossen werden. Eine Untersuchung der Einflüsse durch die Fahrbahnneigung wird nun nachgeholt.

Bei der Umrechnung der durch den Lidar gemessenen Distanz d_S in das Fahrzeugkoordinatensystem wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Ausrichtung zwischen Sensor und Fahrbahn stets gleich ist (siehe Kapitel A.1). Sobald die Fahrbahn sich neigt, trifft diese

²²Behringer: Rechnersehen, 1997, S. 54–97

Annahme nicht mehr zu und es entsteht ein Fehler $\vec{e} = [e_x \ e_y \ e_z]^T$ in der Bestimmung der Koordinaten des Messpunktes im Vergleich zu seiner realen Position. Im Hinblick auf die Schätzung des horizontalen Verlaufs des Fahrstreifens kann die Fehlerbetrachtung auf e_x und e_y reduziert werden. Sowohl Längs- als auch Querneigung werden bezogen auf die abgefahrene Wegstrecke in Form einer prozentualen Steigung angegeben²³. Der Übergang zwischen unterschiedlichen Steigungen wird durch Kreisprofile bzw. Verwindungen gewährleistet. In der Regel ist ein Einfluss vor allem bei einer großen Änderung der Fahrbahneigung zu erwarten, also z. B. wenn das Fahrzeug sich auf einer nicht geneigten Fahrbahn bewegt, direkt vor dem Fahrzeug jedoch eine Fahrbahneigung beginnt (siehe Abbildung 4.4). Für die Fehlerbetrachtung werden deswegen die „weichen“ Übergänge durch Kreisprofile o. ä. vernachlässigt, in der Theorie entsteht ein kantiges Profil mit un stetigen Steigungsänderungen. Abbildung 4.4 zeigt die beiden Fälle einer längs unter der Steigung δ und einer quer unter der Steigung ϵ geneigten Fahrbahn.

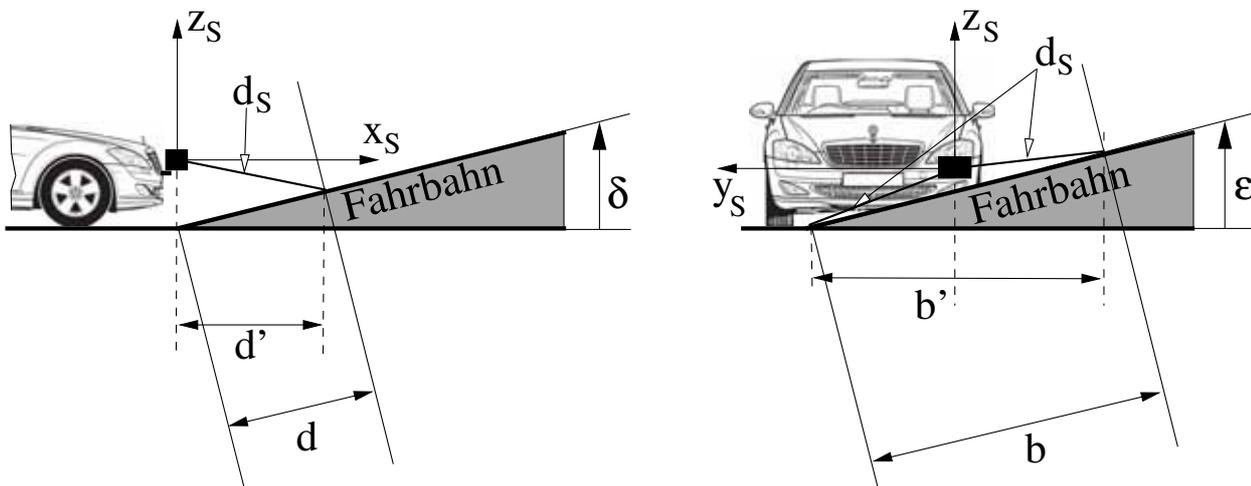


Abbildung 4.4: Einflüsse von Fahrbahnlängs- und querneigung

Im Fall der längs geneigten Fahrbahn ergibt sich die Situation, dass der reale Abstand d in Fahrzeug-X-Richtung auf der Fahrbahn größer ist, als der anhand der Messung d_S errechnete d' . Ist die Fahrbahn gekrümmt, so hat der resultierende Fehler $e_x = (d - d')$ Einfluss auf die Krümmungsbestimmung. Grenzwerte für die Neigung einer Fahrbahn können für unterschiedliche Straßenkategorien aus der Norm RAS-L²⁴ entnommen werden. Unter der Annahme eines Maximalwertes für die Längsneigung von $\delta = 8 \%$ liegt so in einer Distanz von 20 m ein Fehler von $e_x = 0,06$ m vor. Ähnliches gilt für eine Querneigung, bei der zusätzlich zu e_x jedoch ein Fehler e_y mit direktem Einfluss auf die Bestimmung der Fahrbahnbreite aber auch Krümmung entsteht. Selbst unter Annahme der Höchstquerneigung von $\epsilon = 8 \%$ ergibt sich bei einer realen Fahrbahnbreite von $b = 3,50$ m jedoch lediglich ein Fehler von $e_y = 0,01$ m. Die ermittelten Fehlerwerte zeigen auf, dass weder eine Berücksichtigung der

²³Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Linienführung, 1995, S. 18

²⁴Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Linienführung, 1995, S. 18

Längs- noch der Querneigung zur Bestimmung des horizontalen Fahrstreifenverlaufs erforderlich ist. Trotzdem ist für andere Anwendungen eine lidarbasierte Schätzung des vertikalen Fahrbahnverlaufs durchaus denkbar und daher erneut zu prüfen.

4.2 Fahrstreifenschätzung

Auf Basis der detektierten Markierungspositionen und des dynamischen Modells wird im folgenden Kapitel die Schätzung des Fahrstreifenverlaufs durchgeführt. Der Einfachheit halber werden dabei Vektoren ausschließlich durch Klein- und Matrizen durch Großbuchstaben gekennzeichnet.

4.2.1 Modellbasierte Zustandsschätzung

Gesucht ist die optimale Schätzung des Zustandsvektors $x = [c \ b \ y_{\text{off}} \ \Delta\psi]^T$ auf Basis einer neuen Messung z . Der optimale Schätzer ist ein „*computational algorithm that processes measurements to deduce a minimum error estimate of the state of a system by utilizing: knowledge of system and measurement dynamics, assumed statistics of system noise and measurement errors, and initial condition information*²⁵.“ Das zeitdiskrete Zustandsraummodell eines linearen, dynamischen Systems (siehe Abbildung 4.5) ist gegeben durch die Gleichungen:

$$\text{Systemgleichung: } x_k = Fx_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.13)$$

$$\text{Messgleichung: } z_k = Hx_k + v_k \quad (4.14)$$

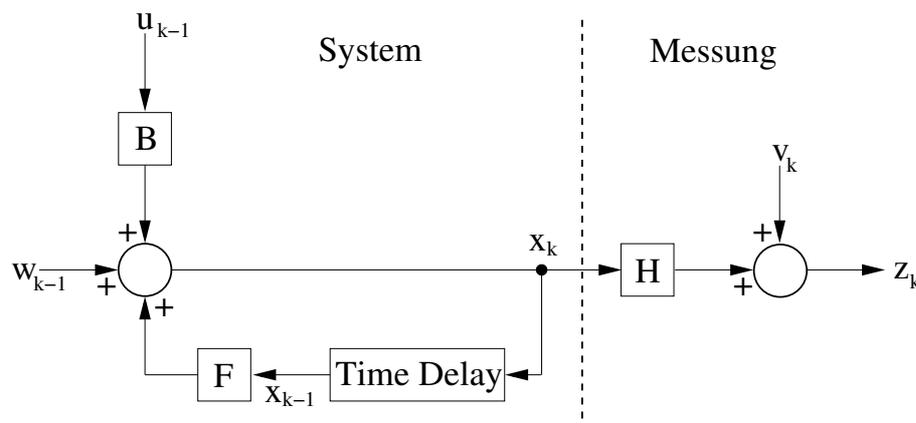


Abbildung 4.5: Das zeitdiskrete, lineare, dynamische Zustandsraummodell

Der Zustandsvektor $x \in R^{n_x}$ wird unter Berücksichtigung des in F enthaltenen Systemmodells, einem Steueranteil B sowie einem Term w für das Systemrauschen aus dem Zustand

²⁵Gelb: Applied Optimal Estimation, 1974, S. 2

x_{k-1} in den Zustand x_k überführt (siehe Gl. (4.13)). Gl. (4.14) verbindet die Messung z mit dem Zustandsvektor und einem weiteren Term v für das Messrauschen. Sowohl für w als auch für v wird die Annahme getroffen, dass es sich um weiße Rauschprozesse handelt, d.h. aufeinander folgende Terme unkorreliert sind ($E[v_k w_k] = 0$). Diese Annahme ermöglicht eine Interpretation der Gleichungen als Markov-Modell erster Ordnung. Der Zustand x_k hängt dadurch ausschließlich vom vorausgehenden Zustand x_{k-1} ab. Die Schätzung \hat{x} ist mit einer Unsicherheit behaftet, die aus den Termen w und v herrührt. Da es sich bei beiden Rauschprozessen um stochastische Größen handelt, liegt als Konsequenz auch \hat{x} als stochastische Größe vor.

Das Kalman-Filter (KF) nutzt die zuvor getroffenen Annahmen, dass sowohl w als auch v durch mittelwertfreie, Gauß'sche Rauschprozesse beschrieben werden können. Unter diesen Bedingungen lässt sich zeigen, dass $p(x_k|z_{1:k}) = N [x(k|k), P(k|k)]$ normalverteilt ist. Der Zustandsvektor x ist somit durch seinen Mittelwert \bar{x} und seine Fehlerkovarianz P eindeutig beschrieben. Die vollständige Herleitung des Kalman-Filters beschreibt Gelb²⁶, Tabelle 4.1 fasst die wichtigsten Gleichungen zusammen.

Tabelle 4.1: Gleichungen des diskreten Kalman-Filters

Systemgleichung	$x_k = Fx_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}, \quad w_k \sim N(0, Q_k)$
Messgleichung	$z_k = Hx_k + v_k, \quad v_k \sim N(0, R_k)$
Anfangsbedingungen	$E[x(0)] = \hat{x}_0, E[(x(0) - \hat{x}_0)(x(0) - \hat{x}_0)^T] = P_0$
Voraussetzungen	$E[w_k v_j^T] = 0$ für alle j,k
Prädiktion der Zustände	$\hat{x}_k(-) = F_{k-1} \hat{x}_{k-1}(+) + B_{k-1} u_{k-1}(+)$
Prädiktion der Fehlerkovarianz	$P_k(-) = F_{k-1} P_{k-1}(+) F_{k-1}^T + Q_{k-1}$
Innovation der Zustände	$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [z_k - H_k \hat{x}_k(-)]$
Innovation der Fehlerkovarianz	$P_k(+) = [I - K_k H_k] P_k(-)$
Kalmanverstärkung	$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1}$

Es wird zwischen dem Prädiktions- und dem Innovationsschritt unterschieden. Die Prädiktion nutzt das Systemmodell, um den Zustandsvektor x zeitlich zu präzisieren. Im Innovationsschritt wird der prädisierte Zustandsvektor $\hat{x}(-)$ durch den Fehler zwischen der tatsächlichen Messung und der prädisierten Messung korrigiert. Die Wahl der Kalmanverstärkung K_k minimiert den quadratischen Schätzfehler $e_k = E[(x_k(+) - \hat{x}_k(+)) (x_k(+) - \hat{x}_k(+))^T]$. Für die Auslegung des Filters ist die Wahl der Startwerte x_0 und P_0 , vor allem jedoch die Belegung

²⁶Gelb: Applied Optimal Estimation, 1974, S. 102–142

der Rauschmatrizen R und Q ausschlaggebend. Ist R sehr klein gewählt, wird die Messung stark gewichtet. Bei kleiner Wahl von Q wird ein stärkeres Gewicht auf die Prädiktion des Modells gelegt.

Aufgrund der Nicht-Linearität in Gl. (4.6) ist eine Anwendung des herkömmlichen Kalman-Filters im vorliegenden Fall nicht mehr möglich. Die Messgleichung verallgemeinert sich zu:

$$\text{NL-Messgleichung: } z_k = h_k(x_k) + v_k \quad (4.15)$$

Zur Schätzung des Fahrstreifenverlaufs^{27,28} wird deswegen auf das Erweiterte Kalman-Filter (EKF)²⁹ ausgewichen. Auch das EKF geht von einem normalverteilten und mittelwertfreien Rauschen aus. Vorherrschende Idee ist allerdings, die nicht-lineare Messgleichung um die Schätzungen der Mittelwerte zu linearisieren. Die Linearisierung erfolgt mittels einer nach dem zweiten Term abgebrochenen Taylor-Entwicklung über $\hat{x}_k(-)$

$$h_k(x_k) = h_k(\hat{x}_k(-)) + H_k(\hat{x}_k(-)) (x_k - \hat{x}_k(-)) + \dots \quad (4.16)$$

mit der Jacobi-Matrix

$$H_k(\hat{x}_k(-)) = \left. \frac{\delta h_k(x)}{\delta x} \right|_{x=\hat{x}_k(-)}. \quad (4.17)$$

Alle Herleitungen des EKF gehen von der gleichzeitigen Nicht-Linearität der System- und der Messgleichung aus. Da dies im vorliegenden Fall nur für die Messgleichung zutrifft, ändert sich lediglich der Innovationsschritt gemäß Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2: Gleichungen des diskreten Erweiterten Kalman-Filters

Innovation der Zustände	$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [z_k - h_k(\hat{x}_k(-))]$
Innovation der Fehlerkovarianz	$P_k(+) = [I - K_k H_k(\hat{x}_k(-))] P_k(-)$
Kalmanverstärkung	$K_k = P_k(-) H_k^T(\hat{x}_k(-)) [H_k(\hat{x}_k(-)) P_k(-) H_k^T(\hat{x}_k(-)) + R_k]^{-1}$

Im Gegensatz zum herkömmlichen Kalman-Filter führt das EKF den Innovationsschritt auf Basis der Funktion $h_k(x_k)$ durch. Bei der Berechnung der Kalman-Verstärkung wird die Approximation durch die Jacobi-Matrix verwendet. Aufgrund der ausschließlichen Verwendung der ersten Taylor-Glieder ist die Schätzung des EKF nicht optimal wie die des KF für den linearen Fall. Bei starken Nicht-Linearitäten können dadurch signifikante Abweichungen zwischen Schätzung und Realität entstehen. Eine Verbesserung wäre z. B. durch Verwendung

²⁷Dickmanns, Zapp: Recursive 3-D Road Recognition, 1992, S. 1ff

²⁸Franke: Real time 3-D Road Recognition, 1992, S. 1ff

²⁹Gelb: Applied Optimal Estimation, 1974, S. 182–190

weiterer Glieder der Taylor-Entwicklung erzielbar, wodurch jedoch gleichzeitig die Komplexität stark ansteigt³⁰. Weiterführende Methoden stellt Ristic³¹ vor, wobei das Unscented Kalman-Filter (UKF) und das Particle Filter (PF) als die für die Zukunft wohl interessantesten Verfahren zu nennen sind. Das UKF approximiert statt der nicht-linearen Funktion die weiterhin als normalverteilt angenommene Wahrscheinlichkeitsdichte $p(x_k|z_k)$ durch eine bestimmte Menge an Punkten, deren Gesamtheit den Mittelwert und die Fehlerkovarianz repräsentiert. Werden diese durch eine nicht-lineare Funktion propagiert, bleibt die Genauigkeit von Mittelwert und Fehlerkovarianz bis zur zweiten Dimension der Nicht-Linearität erhalten³². Das PF approximiert die a posteriori-Dichte des Zustandsvektors x durch Ziehen einer ausreichend großen Stichprobe, aus der alle interessierenden Momente berechnet werden können. Sie unterliegt somit keinerlei Beschränkungen mehr in Hinblick auf Nicht-Linearitäten oder auf die Form der Dichten. Da die genannten Methoden im Vergleich zum EKF jedoch oft den Nachteil eines deutlich höheren Rechenaufwands haben³³, wird in der vorliegenden Arbeit der für die Schätzung des Fahrstreifenverlaufs schon bewährte Ansatz des EKF verwendet.

4.2.2 Auswahl relevanter Markierungspositionen

Um die Schätzung des Zustandsvektors x auf Basis der EKF-Gleichungen durchführen zu können, werden zunächst die Markierungspositionen ausgewählt, die für die Schätzung relevant sind. Die in Kapitel 3 beschriebene Vorgehensweise erlaubt die Detektion potentieller Markierungspositionen. Liegen mehrere vor, ist die Auswahl der richtigen Positionen erforderlich. Ebenso dürfen Fehldetektionen nicht bis in das Filter gelangen, um die Schätzung nicht zu verfälschen. Abbildung 4.6 fasst den realisierten Aufbau der Auswahl relevanter Markierungspositionen schematisch zusammen. Erfahrungen während der Inbetriebnahme der Algorithmen auf öffentlichen Straßen haben gezeigt, dass Objekte in unmittelbarer Fahrzeugumgebung Reflexionen in den Messebenen Eins bis Fünf hervorrufen können, die ebenfalls ein lokales Maximum in der Rückstrahlintensität bewirken. Es wird deswegen eine Vorfilterung mit Daten aus dem Objekt-Tracking durchgeführt, mit deren Hilfe alle detektierten Markierungspositionen entfernt werden, deren Ursprung möglicherweise auf einem Objekt liegt. Um seitlich in den Erfassungsbereich eindringende Fahrzeuge sofort berücksichtigen zu können, ist es wichtig, direkt auf die Ergebnisse der Segmentierung zurückzugreifen. Bis zum festen Tracking des Objekts kann sonst wertvolle Zeit vergehen. Sobald ein Objektsegment detektiert wird, werden in einem definierten Bereich um dieses Segment herum keine Markierungspositionen mehr zur Fahrstreifenschätzung zugelassen. Die Wahl der Größe dieses Bereichs ist ein Optimierungsproblem. Je nachdem wie groß dieser gewählt wird, können entweder die Fehldetektionen minimiert oder die Möglichkeit, auch eine sehr nahe an einem

³⁰Grewal, Andrews: Kalman Filtering, 2001, S. 182

³¹Ristic, Arulampalam, Gordon: Particle Filters, 2004, S. 19–62

³²Ristic, Arulampalam, Gordon: Particle Filters, 2004, S. 28

³³Grewal, Andrews: Kalman Filtering, 2001, S. 182

Objekt verlaufende Markierung noch zu detektieren, maximiert werden.

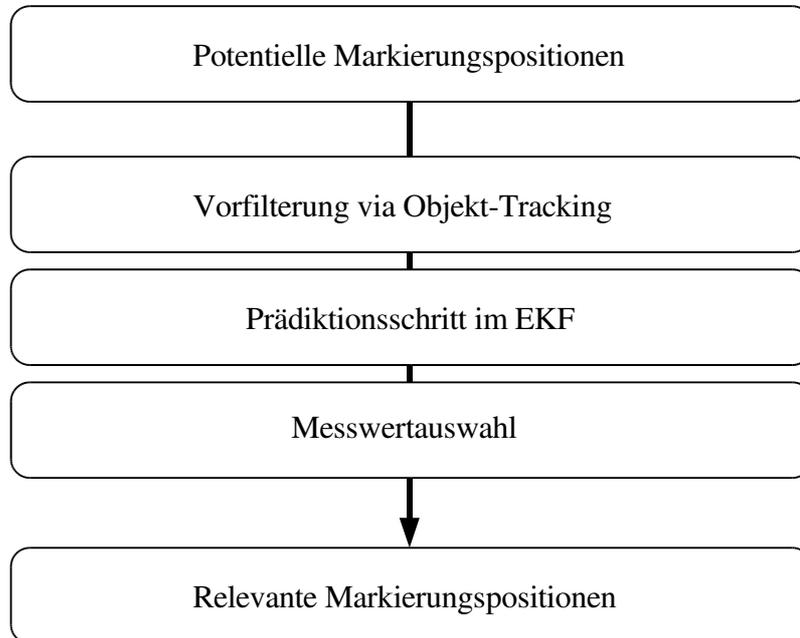


Abbildung 4.6: Auswahl der relevanten Markierungspositionen

Auch nach der Vorfilterung kann aufgrund von Beschriftungen oder Pfeilen auf der Fahrbahn bzw. anderweitig hervorgerufenen Störungen noch eine hohe Anzahl an potentiellen Markierungspositionen vorliegen. Die sicherste Methode Fehldetektionen auszuschließen, wäre eine Klassifikation der Messungen auf Rohdatenebene des Sensors. Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten, auf den Sensor zuzugreifen, würde dieser Weg einen sehr hohen Aufwand bedeuten, einen Erfolg jedoch keineswegs garantieren (siehe Kapitel 3). Aus diesem Grund wird ein so genanntes Gating³⁴ verwendet. Dazu wird zunächst der Prädiktionsschritt des EKF nach Tabelle 4.1 durchgeführt. Anschließend wird jede real vorliegende Messung dahingehend bewertet, wie gut sie zu dem prädizierten Modell des Fahrstreifens passt. Als Grundlage dieser Bewertung wird die Mahalanobis-Distanz berechnet:

$$\sqrt{r_k^T S_k^{-1} r_k} \leq g^2 \quad (4.18)$$

Der Residuenvektor r_k gibt die Differenz zwischen dem prädizierten Modell und der real vorliegenden Messung an und ist gegeben durch:

$$r_k = z_k - h_k(\hat{x}_k(-)). \quad (4.19)$$

Die Residuenkovarianzmatrix S_k ist definiert durch:

$$S(k) = H_k P_k(-) H_k^T + R_k \quad . \quad (4.20)$$

³⁴Bar-Shalom: Tracking and Data Association, 1988, S. 150–153

Gl. (4.18) kann entweder zur relativen Bewertung einzelner Markierungspositionen, oder durch Wahl eines Grenzwertes g auch zur absoluten Beurteilung einer Messung verwendet werden. Statistisch gesehen liegen für $g = 3$ über 99,8 % aller gültigen Messungen innerhalb des dadurch gewählten Gates³⁵. Für die vorliegende Arbeit wird jede Messung verworfen, die für $g = 3$ die Bedingung nach Gl. (4.18) nicht erfüllt. Bei mehreren potenziellen Markierungspositionen wird diejenige, mit der kleinsten Distanz zur aktuellen Schätzung ausgewählt. Auf Basis der so gewählten, relevanten Messpunkte kann der Innovationsschritt gemäß Tabelle 4.2 durchgeführt werden.

4.2.3 Verwendung paralleler Filter

Übertragen auf die vorliegende Anwendung lassen sich für die Filtergleichungen aus Tabelle 4.1 und 4.2 auf Basis von Gl. (4.7) bis Gl. (4.10) die Systemmatrix F und die Eingangsmatrix B zunächst in zeitkontinuierlicher Form aufstellen. Die zeitliche Diskretisierung der Matrizen F , B , R und Q kann den Ausführungen von Schwarzinger³⁶ entnommen werden. Die Jacobi-Matrix ergibt sich durch Anwendung von Gl. (4.17) auf Gl. (4.6). Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert, hängt die Performance des Filters in hohem Maße vom Tuning, d.h. von der Wahl der Startwerte für x_0 und P_0 sowie der Modellierung der Rauschmatrizen R und Q ab. So führt z. B. ein sehr klein gewähltes Systemrauschen Q dazu, dass die Prädiktion und damit die Systemeigenschaften sehr stark für die Schätzung gewichtet werden. Im vorliegenden Fall hat dies positive Auswirkungen auf die Schätzung, wenn sich das Fahrzeug z. B. innerhalb einer konstant gekrümmten Kurve oder einer Geraden befindet. Negative Einflüsse des Messrauschens werden so geglättet. Bewegt sich jedoch das Fahrzeug in eine Kurve hinein, tritt eine Krümmungsänderung auf, die nicht im dynamischen Kreismodell nach Kapitel 4.1.2 berücksichtigt ist. Bei klein gewähltem Q reagiert die Schätzung deswegen nur träge auf die Krümmungsänderung. Vorteilhafter ist in diesem Fall eine stärkere Gewichtung der Messung durch ein vergleichsweise klein gewähltes Messrauschen R . Die feste Wahl von R und Q kann lediglich in dem einen oder dem anderen Fall eine optimale Lösung bieten. Eine einfache Möglichkeit diesem Problem zu begegnen, ist die Verwendung paralleler Mehrmodellfilter, wie sie z. B. durch Moebus³⁷ und Gern³⁸ vorgeschlagen wird (siehe Abbildung 4.7).

³⁵Bar-Shalom: Tracking and Data Association, 1988, S. 152

³⁶Schwarzinger: Optische Spurerkennung, 1998, S. 12

³⁷Möbus, Kolbe: Radartracking, 2005, S. 25

³⁸Gern: Multisensorielle Spurerkennung, 2005, S. 60

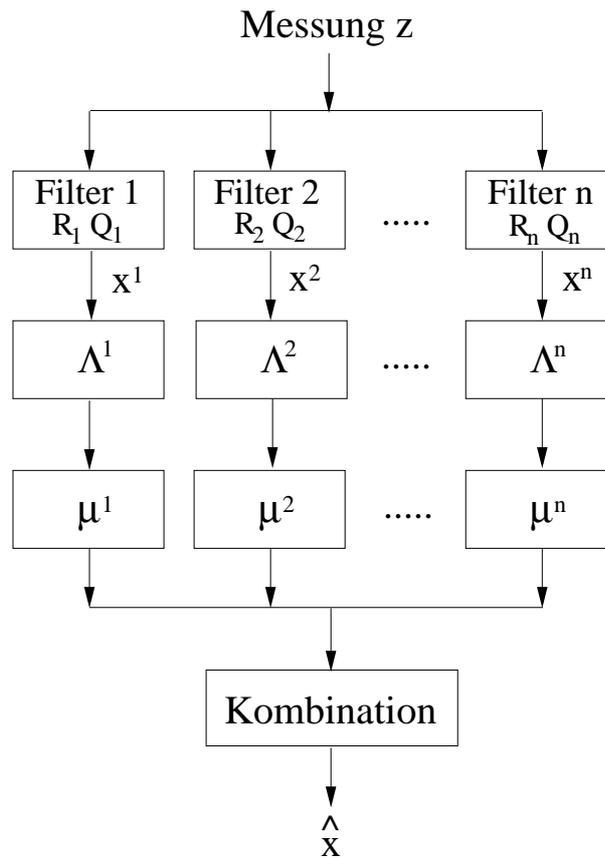


Abbildung 4.7: Paralleles Mehrmodellfilter

Insgesamt werden n Filter mit unterschiedlichen Systemmodellen bzw. unterschiedlicher Dynamik parallel, jedoch weiterhin unabhängig voneinander, betrieben. Nach jedem Filterzyklus wird mit Hilfe der Likelihood-Funktion (Gl. (4.21)) für jedes Filter ein Gütemaß Λ^j berechnet. Dieses ermöglicht eine Aussage, wie gut die Schätzung zu einer Messung z passt.

$$\Lambda_k^j = \frac{1}{\sqrt{\det[2\pi S_k^j]}} \exp\left[-\frac{1}{2} ([r_k^j]^T [S_k^j]^{-1} r_k^j) \right] \quad (4.21)$$

r_k^j und S_k^j stehen für den Residuenvektor (siehe Gl. (4.19)) respektive die Residuenkovarianzmatrix (siehe Gl. (4.20)) des EKF. Auf Basis der Likelihood Λ_k^j ergibt sich die Filterwahrscheinlichkeit:

$$\mu_k^j(+) = \frac{1}{C} \mu_k^j(-) \Lambda_k^j \quad (4.22)$$

Dabei sind der Normierungsfaktor

$$C = \sum_{i=1}^r \mu_k^i(-) \Lambda_k^i \quad (4.23)$$

sowie die a priori-Wahrscheinlichkeit eines Filters

$$\mu_k^j(-) = \sum_{i=1}^r p_{ij} \mu_{k-1}^i(+) \quad (4.24)$$

zu berücksichtigen. Die Variable p_{ij} beinhaltet die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen zwei Filtern. Mit den einzelnen Filterwahrscheinlichkeiten $\mu_k^j(+)$ liegt eine Kenntnis darüber vor, wie gut jedes einzelne Filter die Gesamtheit der neuen Messungen z_k repräsentiert. Auf dieser Basis kann z. B. in jedem Zeitschritt k das Filter mit der höchsten Wahrscheinlichkeit als das relevante Filter ausgewählt werden. Mögliche Folge wären Unstetigkeiten im resultierenden Zustandsvektor bei der Umschaltung zwischen zwei Filtern. Ein weiteres Verfahren sieht deswegen die Ermittlung des resultierenden Zustandsvektor und der dazugehörigen Fehlerkovarianz durch Kombination der einzelnen Filter vor:

$$\hat{x}_k(+) = \sum_{i=1}^r \mu_k^i(+) x_k^i(+) \quad (4.25)$$

$$P_k(+) = \sum_{i=1}^r \mu_k^i(+) P_k^i(k) + [\hat{x}_k^i(+) - \hat{x}_k(+)] [\hat{x}_k^i(+) - \hat{x}_k(+)]^T \quad (4.26)$$

Ziel der Nutzung paralleler Filter in der vorgelegten Arbeit ist eine Verbesserung der Schätzung in Situationen, in denen sich die Fahrbahnkrümmung ändert, ohne die Schätzung auf geraden Streckenabschnitten zu verschlechtern. Es werden deswegen zwei Filter verwendet, die sich ausschließlich durch die Wahl der Rauschmatrizen R und Q unterscheiden. Filter 1 gewichtet stärker die Messung und Filter 2 stärker das Modell. Die Kombination der Zustandsschätzungen aus beiden Filtern wird anhand Gl. (4.25) durchgeführt. Hat ein Filter über einen längeren Zeitraum eine Filterwahrscheinlichkeit nahe Null, so wird eine Reinitialisierung durchgeführt, bei der die Filterzustände auf die des Filters mit der höheren Wahrscheinlichkeit umgesetzt werden. Gleichzeitig werden die Filterwahrscheinlichkeiten wieder gleich gesetzt. Abbildung 4.8 zeigt das Verhalten der gewählten Filter bei Einfahrt in eine Kurve (ab Zeitschritt 280).

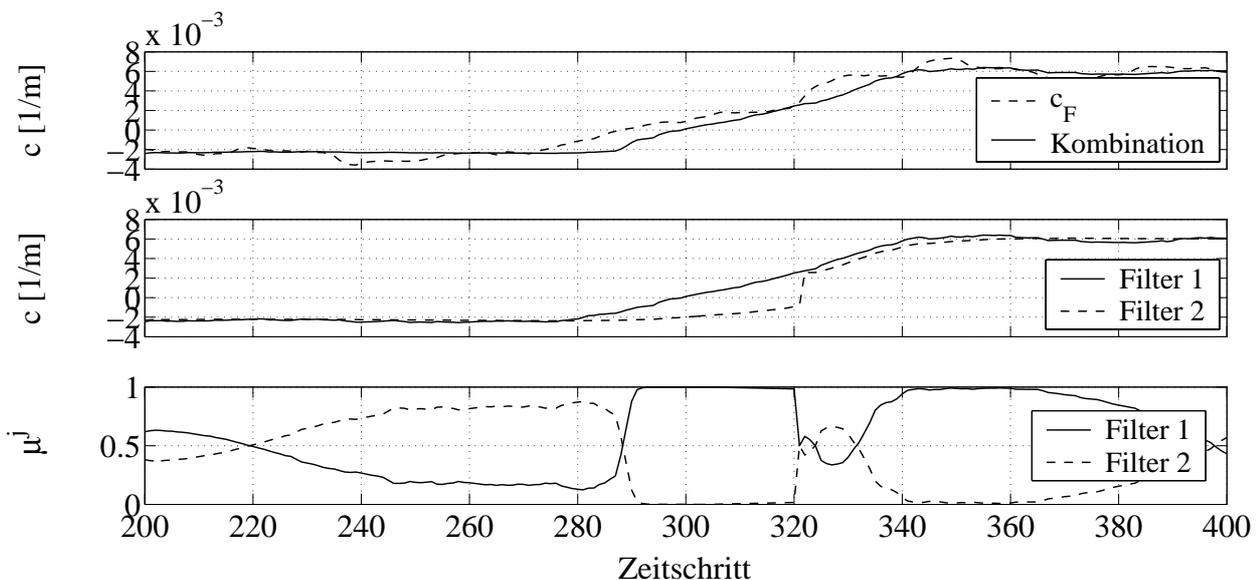


Abbildung 4.8: Beispielmessung mit parallelen Filtern bei $v_F = 30$ km/h

Dabei ist im oberen Teil die aus der Fahrzeugbewegung bestimmte Krümmung c_F sowie die kombinierte Zustandsschätzung aus Filter 1 und 2 dargestellt. Die Ausgänge beider Filter sind einzeln in der mittleren Grafik dargestellt, die jeweils dazu berechnete Filterwahrscheinlichkeit in der unteren Grafik. Die träge Reaktion von Filter 2 auf die Änderung der Fahrbahnkrümmung sowie die gleichzeitig sinkende Filterwahrscheinlichkeit sind deutlich zu erkennen. Auf der Geraden (vor Zeitschritt 280) liegt eine stärkere Gewichtung von Filter 2 vor, die sich in einer wenig verrauschten, kombinierten Zustandsschätzung bemerkbar macht. In Zeitschritt 320 kommt es zu einer Reinitialisierung von Filter 2, die Ausgänge der Filter werden wieder als gleich wahrscheinlich betrachtet.

4.3 Bewertung

Ein wichtiger Aspekt für die spätere Fahrstreifenzuordnung ist die Genauigkeit, mit der eine Fahrstreifeninformation zur Verfügung steht. Im Vergleich mit einem kamerabasierten System konnte für das entwickelte System bei Geschwindigkeiten bis 80 km/h eine hohe Übereinstimmung nachgewiesen werden³⁹. Im Folgenden wird eine weitere Bewertung auf einer realen Fahrbahn für Stop&Go-typische Fahrsituationen beschrieben. Zunächst wird auf die Methodik der Bewertung eingegangen, bevor im Anschluss ihre Ergebnisse diskutiert werden.

4.3.1 Methodik

Obwohl es mittlerweile eine Vielzahl an zumeist kamerabasierten Ansätzen zur Fahrstreifenerkennung gibt, fehlt es bisher noch an leistungsfähigen und durchgängigen Verfahren zur Bewertung der geschätzten Fahrstreifeninformation im Fahrzeug. Gern⁴⁰ schlägt hierfür mehrere Verfahren vor, unter anderem die Beurteilung anhand künstlich erzeugter Bilder, den Vergleich der geschätzten Krümmung mit einer aus der Inertialsensorik berechneten Krümmung oder auch eine Beurteilung des Verhaltens innerhalb eines geschlossenen Regelkreises bei automatisierter Querführung. Behringer⁴¹ bewertet die kamerabasierte Krümmungsschätzung durch Abfahren eines baulich bekannten Streckenabschnitts. Obwohl in beiden Fällen keine exakte Selbst-Lokalisierung auf der Strecke vorliegt, reicht die erzielte Genauigkeit für die Beurteilung der geschätzten Krümmung zumindest auf autobahnähnlichen Straßen aus. Weder Gern noch Behringer können jedoch die geschätzte Ausrichtung zum Fahrstreifen genau bewerten, da die laterale Position innerhalb des Fahrstreifens nicht bekannt ist. Schätzfehler in der Krümmung gewinnen mit der Entfernung zum Fahrzeug an Bedeutung. Im Nahbereich und damit im Stop&Go-Verkehr hat jedoch vor allem auch die Genauigkeit der Schätzung der eigenen Position und Ausrichtung innerhalb des Fahrstreifens einen deutlichen Einfluss.

³⁹von Reyher, Joos, Winner: Lidar-Based Lane Detection, 2005, S. 1ff

⁴⁰Gern: Multisensorielle Spurerkennung, 2005, S. 74–77

⁴¹Behringer: Rechnersehen, 1997, S. 126

Für die Bewertung erfordert dies, dass sowohl der Zustand des Fahrstreifens als auch die Position und die Ausrichtung des Versuchsträgers auf dem Fahrstreifen genau bekannt sind. Eine Kenntnis des realen Fahrstreifenverlaufs vorausgesetzt, bietet sich eine Selbstlokalisierung anhand vorhandener Landmarken an, deren Position wiederum relativ zur Markierung bekannt ist. Da Leitpfosten nur vereinzelte Stützstellen bieten, wird in der vorgelegten Arbeit die Leitplanke als relevante Landmarke verwendet. Ist ihre Position relativ zum Fahrzeug und der Abstand zwischen Markierung und Leitplanke bekannt, so kann der laterale Offset zwischen Fahrzeug und Markierung ermittelt werden. Neben der Existenz einer Leitplanke ist dazu eine durchgehend verlegte Fahrstreifenmarkierung erforderlich. Diese Voraussetzungen sind z. B. auf dem Testgelände in Papenburg gegeben. Dort wurde der als Dauerlaufkurs (DLK) Bremen bezeichnete Teil des DLK Nord als Prüfstrecke ausgewählt (siehe Kapitel A.3). Auf dem DLK Nord sind Landstraßenprofile aus ganz Deutschland abgebildet, die vorliegenden Krümmungsverläufe sind bekannt. Da die auf Landstraßen verwendeten Krümmungsänderungen höher sind, als z. B. auf Autobahnen und Bundesstraßen üblich, stellt die Bewertung höhere Ansprüche an das System als die vorgesehene Zielanwendung. Die Markierung ist auf der Außenseite durchgezogen und in der Mitte gestrichelt. Eine wichtige Voraussetzung für eine hohe Aussagekraft der durchgeführten Bewertung ist, dass die Entfernung zwischen Leitplanke und Markierung auf der Strecke sehr geringen Schwankungen unterworfen ist. Diese Entfernung wurde mit einem Laser-Messgerät in einem regelmäßigen Abstand von 10 m auf einer Streckengesamtlänge von 550 m überprüft (siehe Kapitel A.3). Die Standardabweichung lag bei 3,3 cm, Der Abstand zwischen Leitplanke und Markierung kann mithin als nahezu konstant angenommen werden. Auch die Fahrstreifenbreite wurde an mehreren Stellen zwischen den Innenkanten der Markierung nachgemessen. Es ergab sich eine gemittelte Breite von 3,44 m bei einer Standardabweichung von 2,6 cm. Dieser Mittelwert wurde später als Referenzwert für die geschätzte Fahrstreifenbreite herangezogen.

Zur Detektion der Leitplanke wurde der schon in Kapitel 3.2.2 verwendete Sick-Laserscanner an der rechten⁴² Seite des Versuchsträgers angebracht (siehe Abbildung 4.9).

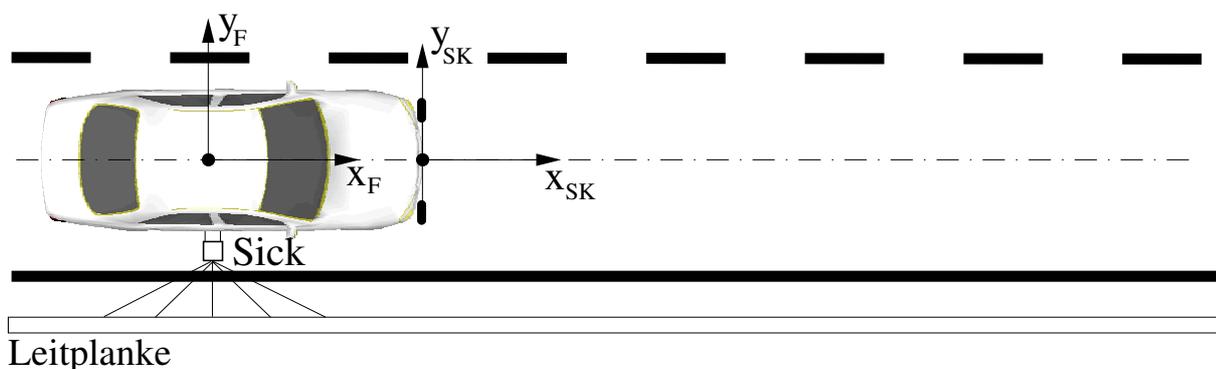


Abbildung 4.9: Messaufbau Bewertung

⁴²In Richtung der Fahrzeuglängsachse.

Seine Position in x_F -Richtung wurde auf Höhe des Fahrzeugschwerpunktes gewählt, der zuvor auf einer Fahrzeugwaage ermittelt wurde. Die vertikale Montagehöhe des Sensors wurde auf die Höhe der Leitplanke eingestellt. Der Sick-Sensor deckt mit einer Frequenz von 75 Hz einen Detektionsbereich von 180° bei einer Messgenauigkeit von 1 mm ab. Der laterale Abstand zur Markierung y_{off} sowie der Winkel $\Delta\psi$ wurden offline unter Nutzung des Gauss-Newton-Verfahrens⁴³ ermittelt. c und b wurden als bekannt vorausgesetzt. Als Grundlage des Verfahrens kann die Jacobi-Matrix nach Gl. (4.17) verwendet werden. Aufgrund des nicht-linearen Charakters der Messgleichung wird ein iteratives Verfahren benötigt, dessen Konvergenz von der Wahl der Startwerte abhängt. Als Basis für die Startwerte wurde der aktuell geschätzte Zustandsvektor \vec{x} verwendet. Um eine zu große Beeinflussung durch das eigentlich zu bewertende System zu vermeiden, wurde ein zufällig erzeugter Offset in der Größenordnung des jeweils dreifachen Systemrauschens addiert. Gl. (4.17) basiert auf der Annahme einer konstanten Krümmung. Um Einflüsse auf die Ermittlung von y_{off} und $\Delta\psi$ zu reduzieren, die durch diese Vernachlässigung entstehen, wurden ausschließlich Messpunkte mit einem Abstand $|x_F|$ unterhalb einer halben Fahrzeuglänge verwendet.

Das verwendete Verfahren setzt die aktuelle Krümmung c und die Fahrbahnbreite b als bekannt voraus. Die Breite wurde gemessen und als konstant angenommen. Die Krümmungsverläufe der Fahrbahn stehen in Form einer Karte zur Verfügung. Um während der Messung auf eine Information über die reale Krümmung zurückgreifen zu können, wurden Start und Ende der Messung über bekannte Landmarken getriggert, die ebenfalls aus den Daten des Sick-Sensors extrahiert wurden. Bei einer Geschwindigkeit des Versuchsträgers von 50 km/h und der gegebenen Scanfrequenz ergibt sich eine Genauigkeit von ca. 15 cm für die Bestimmung von Messstart und -ende. Die Bewegung des Fahrzeugs und damit die Positionierung auf der Karte zur Ermittlung der aktuellen Krümmung wurde während der Messung ausschließlich auf Basis der Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt. Der zu erwartende Drift in der Positionsbestimmung wurde bei der Auswertung der Daten berücksichtigt, indem die gesamte Messung in einem ersten Durchlauf auf die Streckenlänge von 550 m skaliert wurde.

Der beschriebene Versuch wurde mit den konstanten Geschwindigkeiten 10, 20, 30, 40 und 50 km/h gefahren. Gerade bei einer Anwendung im Stop&Go-Verkehr ist mit vergleichsweise hohen Längs- und Querschleunigungen⁴⁴ zu rechnen. Um auch die Robustheit des Systems zu prüfen, wurden deswegen zusätzlich Messungen mit starker, lateraler Bewegung innerhalb des Fahrstreifens bei 30 km/h sowie mit stark nickendem Fahrzeug (hervorgerufen durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge) durchgeführt.

4.3.2 Ergebnisse

Tabelle 4.3 fasst die durchgeführten Messungen mit dem dabei angewandten Fahrverhalten in Quer- und Längsrichtung zusammen.

⁴³Bronstein, Semendjajew, Musiol, Mühlig: Taschenbuch der Mathematik, 2001, S. 920

⁴⁴Adiprasito: Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich, 2004, S. 106–113

Tabelle 4.3: Messungen zur Beurteilung der Fahrstreifendetektion

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Geschwindigkeit [km/h]	10	20	30	40	50	30	0 – 50
Fahrverhalten quer	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.	dyn.	konst.
Fahrverhalten längs	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.	dyn.

In Kapitel A.3 sind zusätzlich Mittelwert und Standardabweichung der Detektionsreichweite x_{SK} und der Anzahl der Ebenen eb aufgeführt, in der die Markierung in den Einzelmessungen detektiert wurde (getrennt nach linker (unterbrochene) und rechter (durchgezogene) Markierung). Die durchgezogene Markierung ist in jeder Messung deutlich weiter detektierbar als die gestrichelte, was auf eine höhere Abnutzung der Mittelmarkierung schließen lässt. Im Großen und Ganzen wurden die schon aus Kapitel 3.2.2 bekannten Reichweiten erzielt. Auch die Anzahl der detektierenden Ebenen eb ist aufgrund der Strichelung auf der linken Seite geringer. Gemittelt über die ersten fünf Messungen stehen im Schnitt jeweils 4,2 detektierte Markierungspunkte zur Verfügung. Bei den dynamischen Messungen sinkt dieser Wert nur leicht ab. In der Simulation konnte gezeigt werden⁴⁵, dass zwei Messebenen ausreichen, um den Fahrstreifenverlauf zu schätzen. Eine Reduktion der Messebenen scheint allerdings vor allem im Hinblick auf Situationen beidseitig unterbrochen markierter Fahrstreifen wenig ratsam.

Abbildung 4.10 zeigt exemplarisch den Verlauf der geschätzten Einzelzustände und der vorliegenden Ground Truth Daten für Messung Sechs, die durch hohe Querbeschleunigungen besondere Ansprüche an die Fahrstreifenschätzung stellt. Alle vier geschätzten Zustände zeigen über den Gesamtverlauf eine hohe Übereinstimmung mit den vorliegenden Ground Truth Werten. Im Bereich der Krümmungsänderungen bei 200 m und ab 500 m treten leicht erhöhte Abweichungen auf die sowohl auf die geringen Detektionsreichweiten als auch die Vernachlässigung der Krümmungsänderung im Modell zurückzuführen sind. Es ist ersichtlich, dass das Filter in der Lage ist, auch bei sehr dynamischem Fahrverhalten den Fahrstreifenverlauf sauber zu schätzen.

⁴⁵von Reyher, Raab, Winner: Advanced Environment Detection, 2004, S. 1ff

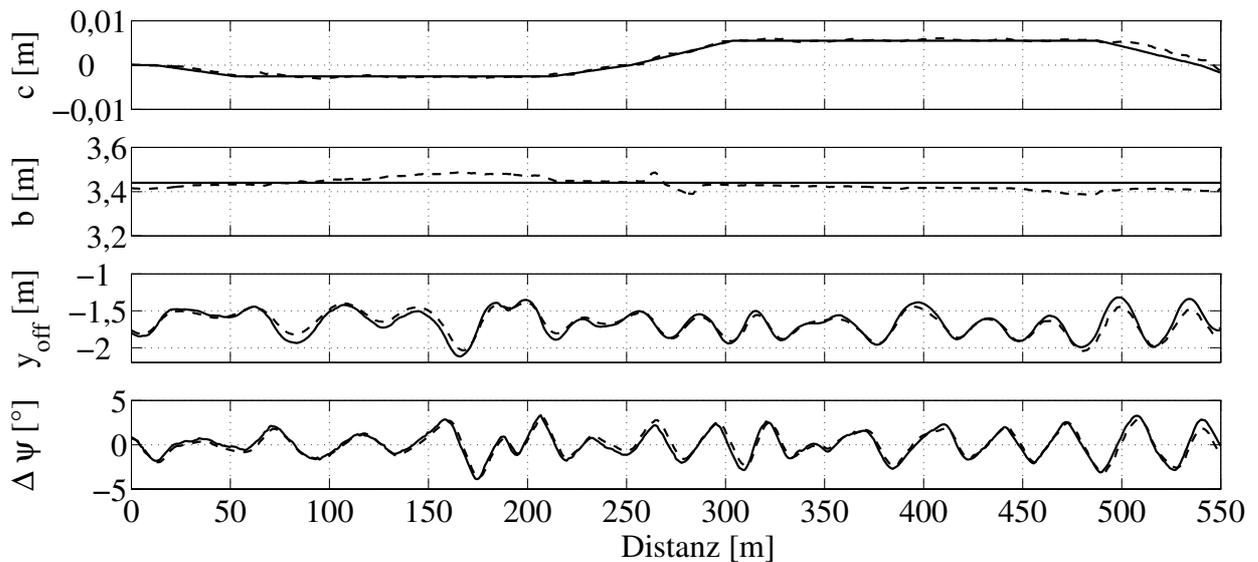


Abbildung 4.10: Messung 6 (- - Schätzung — Ground Truth)

Neben dem dynamischen Verhalten der Schätzung spielt vor allem ihre Genauigkeit eine wichtige Rolle. Deren Beurteilung ist durch weitere Zusammenfassung der Daten möglich. Abbildung 4.11 stellt im Einzelvergleich die betragliche Abweichung für jeden der vier geschätzten Zustände dar.

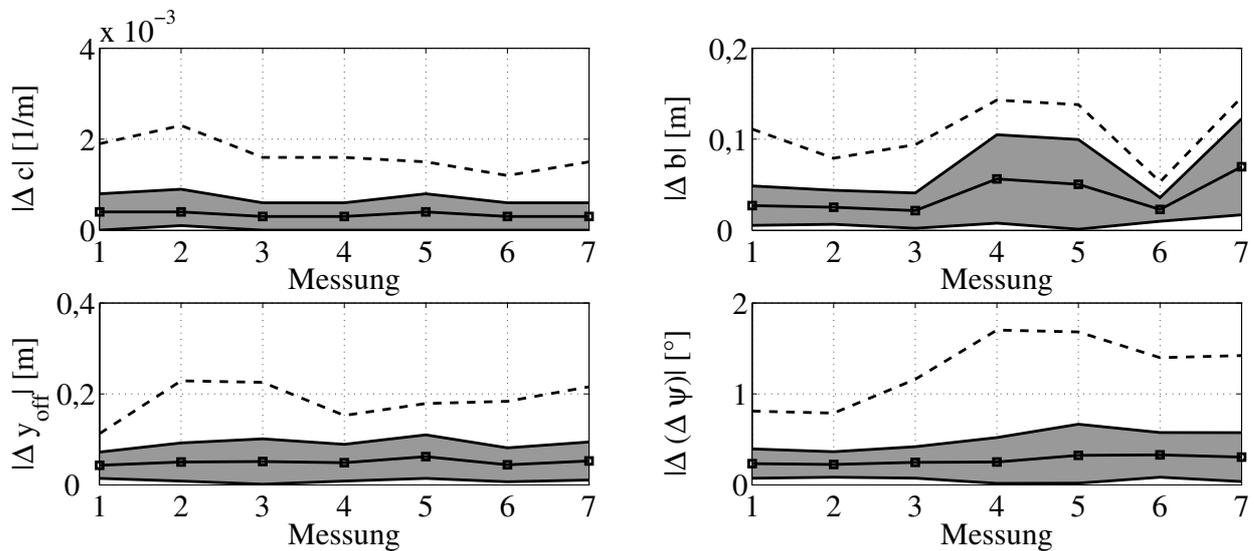


Abbildung 4.11: Absolute Fehlerbereiche der Einzelzustände (—■— Mittelwert – Std - - Max)

Aufgetragen ist der Mittelwert für alle sieben Messungen sowie grau schattiert, der durch die Standardabweichung definierte Bereich. Die gestrichelte Linie repräsentiert die maximal gemessene Abweichung, die in der jeweiligen Messung aufgetreten ist. Der mittlere Fehler der Krümmung Δc liegt im Schnitt bei $0,0004 \text{ m}^{-1}$. In einer Entfernung von 14 m, die ungefähr

der mittleren Detektionsreichweite (siehe Tabelle 4.3) entspricht, hat dies einen Fehler in der lateralen Positionsschätzung von ca. 0,04 m zur Folge. Auch die Breite und der laterale Offset liegen mit im Mittel 0,04 oder 0,05 m noch im Bereich der durch die Ground Truth gegebenen Bewertungsgenauigkeit. Der Winkel $\Delta\psi$ weist eine mittlere Abweichung von ca. $0,25^\circ$ auf und erzeugt damit in 14 m Entfernung einen lateralen Fehler von ungefähr 0,06 m. Weder starkes Nicken noch Wanken haben einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Schätzwerte. Obwohl die einzelnen Abweichungen im Mittel gering sind, können hohe Maximalabweichungen auftreten (siehe Abbildung 4.11). Der Betrag der Standardabweichung sowie eine genaue Analyse der Daten zeigen allerdings, dass diese Maximalabweichungen nur sehr vereinzelt, vor allem im Bereich der Krümmungsänderungen auftreten.

Auch die Beurteilung der Schätzgenauigkeit für jeden einzelnen Zustand lässt noch keinen direkten Rückschluss auf mögliche Ungenauigkeiten in der Fahrstreifenzuordnung zu. Je nachdem ob sich die Fehler der Einzelzustände aufsummieren oder sich gegenseitig ausgleichen kann eine genaue oder auch ungenaue Schätzung des Fahrstreifens resultieren. Interessant ist vor diesem Hintergrund die betragliche, laterale Abweichung $|\Delta y_{SK}|$ der gesamten Fahrstreifenschätzung im Vergleich zur Realität. Abbildung 4.12 stellt diese im Mittel in Abhängigkeit von der Entfernung zum Fahrzeug für die rechte Markierung unter der Annahme einer konstanten Krümmung dar.

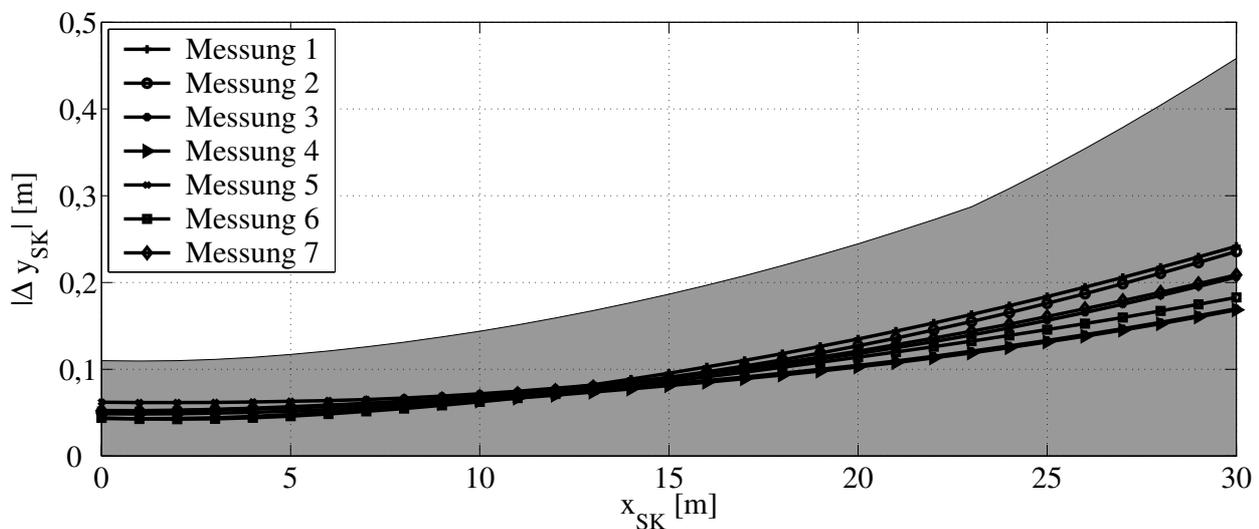


Abbildung 4.12: Betrag des lateralen Fehlers der geschätzten Markierungsposition

Der grau schattierte Bereich zeigt den Streubereich, in dem 98 % der Messungen liegen. Sowohl der berechnete Mittelwert als auch der Streubereich steigen über der Distanz. Dieser Einfluss entsteht vor allem durch die Abweichungen der Schätzung von c und $\Delta\psi$. Gemittelt über alle Messungen liegt die Detektionsreichweite bei etwa 14 m. In einer Entfernung von 20 m liegt eine mittlere Abweichung von lediglich 0,14 m vor. Im Vergleich dazu entsteht allein durch Vernachlässigung der Krümmungsänderung nach Abbildung 4.1 ein Fehler von ca. 0,06 m.

4.4 Fazit

Der horizontale Verlauf des Fahrstreifens kann mit Hilfe eines dynamischen Modells beschrieben werden, die zusätzliche Ermittlung der Fahrbahnneigung ist für die angestrebte Fahrstreifenzuordnung nicht notwendig. Aufgrund der geringen Reichweite der Markierungsdetektion wird für die mathematische Beschreibung des Fahrstreifenverlaufs ein Kreismodell verwendet. Neben der Krümmung des Kreises beinhaltet das Modell als weitere Zustände die Fahrstreifenbreite sowie die Position des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens. Die Modellzustände werden auf Basis eines Erweiterten Kalman-Filters geschätzt. Das verwendete Filter kann entweder auf eine dynamische Reaktion bei Veränderung der Fahrbahnkrümmung oder auf eine rauscharme Schätzung bei konstanter Krümmung optimiert werden. Zur Auflösung dieses Zielkonflikts wird ein paralleles Mehrmodellfilter eingesetzt, bei dem zwei Filter unterschiedlicher Dynamik parallel und unabhängig voneinander betrieben werden. Ihre Zustandsschätzungen werden in jedem Zyklus gegeneinander gewichtet. Der resultierende Zustandsvektor zur Beschreibung des Fahrstreifenverlaufs wird durch Kombination der Filterausgänge gebildet.

Die Fahrstreifenschätzung wurde im Geschwindigkeitsbereich einer Stop&Go-Anwendung, auch in anspruchsvollen Situationen hoher Längs- und Querdynamik, bewertet. Trotz einer mittleren Detektionsreichweite von nur 14 m betrug der mittlere, laterale Fehler des geschätzten Fahrstreifens in einer Entfernung von 20 m in keiner Messung mehr als 0,14 m. Im Bereich bis 30 m, der in Kapitel 2.1 für eine Anwendung im Stop&Go ermittelt wird, können die Abweichungen aufgrund der in höheren Entfernungen fehlenden Messungen ansteigen. Für die spätere Fahrstreifenzuordnung ist daher eine Berücksichtigung der mit der Distanz anwachsenden Ungenauigkeit der Fahrstreifenschätzung erforderlich.

5 Fahrstreifenzuordnung im Stop&Go-Verkehr

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Entwicklung eines lidarbasierten Systems beschrieben, das neben der Detektion anderer Fahrzeuge, die Erkennung von Markierungen vor dem Fahrzeug ermöglicht und darauf aufbauend, eine Schätzung des Fahrstreifenverlaufs vornimmt. Die dadurch umfassenden Informationen über die Fahrzeugumgebung können für ein Abstandsregelsystem zur Auswahl des relevanten Objekts verwendet werden. Der entstehende Vorteil im realen Verkehr wird in diesem Kapitel erläutert. Es wird zunächst auf die durchgeführte Datenerhebung im Stop&Go-Verkehr eingegangen. Anschließend werden unterschiedliche Algorithmen zur Fahrstreifenzuordnung vorgestellt und gegeneinander abgewogen sowie dem Verhalten einer herkömmlichen Zielauswahl gegenübergestellt.

5.1 Datenerhebung im Stop&Go-Verkehr

In diesem Kapitel werden die Anteile der Datenerhebung näher beschrieben, deren Kenntnis für die spätere Interpretation der Ergebnisse wichtig ist. Nach einer Beschreibung der Durchführung werden die Vorverarbeitung der Daten sowie erste Zwischenergebnisse diskutiert.

5.1.1 Durchführung

Die Datenerhebung wurde mit nur einem Fahrer durchgeführt. Da der Fokus der durchgeführten Untersuchung auf der Bewertung des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer liegt, sind die Ergebnisse durch diese Einschränkung wenig betroffen. Potentielle Einflüsse auf die Messergebnisse durch das Fahrverhalten unterschiedlicher Fahrer entstehen allerdings in den folgenden drei Bereichen:

- Position des Ego-Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens
- Längsverhalten des Ego-Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens
- Wahl des Fahrstreifens

Um den Fahrereinfluss auf die Untersuchungsergebnisse zu reduzieren, wurde das Fahrverhalten in den drei genannten Bereichen gezielt verändert. Die Position innerhalb des Fahrstreifens

wurde in drei Stufen variiert: mittig, nach rechts versetzt und nach links versetzt. Dadurch sind die möglichen Fahrzeugpositionen¹ innerhalb des Fahrstreifens abgedeckt. Um durch das eigene Längsverhalten einen Fahrstreifenwechsel anderer Fahrzeuge im Mittel weder zu ermutigen noch zu verhindern, wurde versucht, die Lücke zum Vordermann zu variieren. Die Wahl des Fahrstreifens war frei, sollte jedoch ab Beginn der Messung, soweit nicht zwingend notwendig, nicht mehr verändert werden. Ziel dieser Vorgehensweise war zum einen die Berücksichtigung aller Fahrstreifen für die Auswertung. Zum anderen sollte vermieden werden, dass der Fahrer gezielt Situationen anfährt, in denen Einscherer und Ausscherer gehäuft vorkommen. Zur Variation des Fahrverhaltens standen dem Fahrer keine Hilfsmittel zur Verfügung. Sie kann deswegen nicht als repräsentative Nachbildung des Fahrverhaltens deutscher Autofahrer angesehen werden sondern ist vielmehr eine möglichst realistische, jedoch willkürliche Näherung.

Die Streckenabschnitte für die Datenerhebung wurden auf Basis von Staumeldungen gewählt. Neben der Forderung nach Stop&Go-Verkehr lag als einzige weitere Einschränkung die schnelle Erreichbarkeit, d.h. eine ausreichende Nähe zum Stuttgarter Raum vor. Es wurden Messfahrten auf den Autobahnen A8 München-Karlsruhe und A81 Heilbronn-Singen sowie auf der Bundesstraße B10 Göppingen-Stuttgart in jeweils beiden Fahrtrichtungen durchgeführt. Um in der späteren Auswertung das real vorliegende Verhalten anderer Fahrzeuge beurteilen zu können, wurden neben Lidar- und Fahrzeugdaten ebenfalls die Daten einer Videokamera aufgezeichnet. Die Auswertung ist auf Stop&Go-relevante Daten im Geschwindigkeitsbereich des Ego-Fahrzeugs zwischen 0 und 50 km/h beschränkt.

5.1.2 Vorverarbeitung der Daten

Die aufgezeichneten Messdaten wurden für die Untersuchung unterschiedlicher Fahrstreifenzuordnungsalgorithmen komprimiert. Es wurde zunächst eine Reduktion der Messdaten durch Einschränkung des Betrachtungsbereiches auf potentiell regelungsrelevante Fahrzeuge durchgeführt. Dazu gehört in erster Linie das Fahrzeug im eigenen Fahrstreifen mit der kürzesten Entfernung d_a zum Ego-Fahrzeug, das im Allgemeinen für die Regelung verwendet wird. Weiterhin relevant für die Auswertung sind der links und rechts benachbarte Fahrstreifen im Bereich zwischen Ego- und Führungsfahrzeug. Andere Bereiche wurden in Bezug auf das Auftreten von regelungsrelevanten Objektwechseln ausgeschlossen. Einzige Ausnahme bildet das bei einem ausscherenden Fahrzeug diesem vorausfahrende Fahrzeug, da es in der Regel nach Beendigung des Ausschermanövers zum relevanten Objekt wird. Dieses vorausfahrende Fahrzeug wurde, sobald es detektiert wurde, ebenfalls zur Auswertung hinzugezogen. Abbildung 5.1 stellt den betrachteten Auswertungsraum in Abhängigkeit des Detektionsbereichs der Sensorik grafisch dar:

¹Die Situation eines fahrstreifenversetzt fahrenden Fahrzeugs wird nicht berücksichtigt.

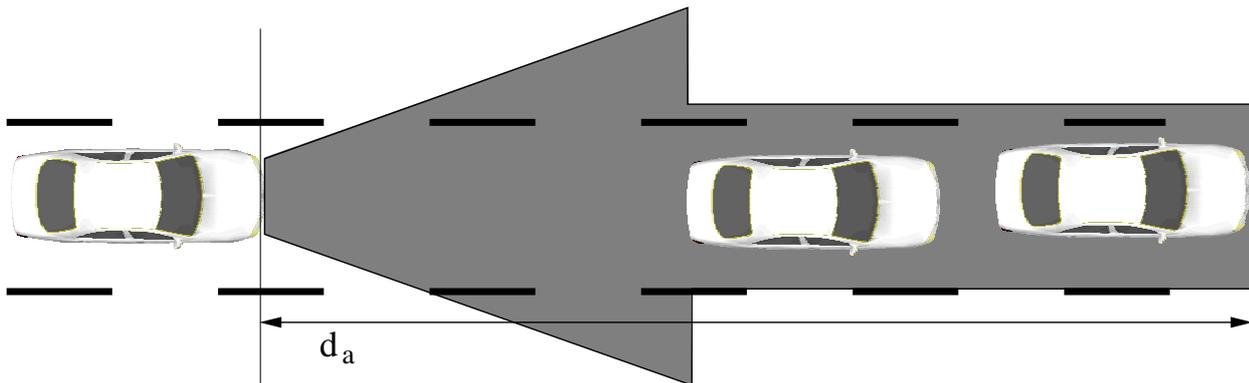


Abbildung 5.1: Für die Auswertung relevanter Bereich vor dem Fahrzeug

Die Ausdehnung des Auswertungsraums in Fahrzeuglängsrichtung wird durch die Distanz d_a definiert. In Abhängigkeit des Detektionsbereiches der Sensorik und der Distanz d_a liegen die direkt benachbarten Fahrstreifen, gegebenenfalls auch noch weitere Fahrstreifen innerhalb des Auswertungsraums.

Neben der Reduktion der zu untersuchenden Daten ist ein weiterer Grund für die Vorverarbeitung, die aufgenommenen Messdaten in eine Form zu überführen, die eine vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Fahrstreifenzuordnungsalgorithmen ermöglicht. Übergeordnetes Ziel ist es, dass die Messdaten nach der Vorverarbeitung keine veränderten Ergebnisse für eine Fahrstreifenzuordnung liefern, jedoch im Hinblick auf die vorliegende Fahr- und Umgebungssituation objektiv bewertbar und dadurch vergleichbar sind. Eine Fahrstreifenzuordnung baut auf den Ergebnissen des Objekt-Trackings und der Fahrstreifenschätzung auf. Für jedes detektierte Objekt 1 bis n wurde daher in der Vorverarbeitung der zu jedem Messzyklus gehörige Zustandsvektor aus Kapitel 2.2.2 gespeichert. Des Weiteren wurden der Zustandsvektor der Fahrstreifenschätzung (siehe Kapitel 4.1.1) sowie die Fahrzeugdaten extrahiert, die für die Berechnung eines Fahrschlauchs relevant sind. Um die Ergebnisse einer Fahrstreifenzuordnung später objektiv bewerten zu können, wurde die real vorliegende Fahrstreifenzugehörigkeit für jedes im Auswertungsraum liegende Objekt durch Sichtauswertung des Videobilds bestimmt und ebenfalls abgespeichert. Der Begriff der Fahrstreifenzugehörigkeit bezieht sich immer auf den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs und kann fünf unterschiedliche Werte annehmen:

1. Objekt im Fahrstreifen
2. Objekt nicht im Fahrstreifen
3. Objekt schert ein
4. Objekt schert aus
5. Objekt fährt fahrstreifenversetzt

Einem Objekt ist der Wert „Objekt im Fahrstreifen“ zuzuordnen, während es sich innerhalb der Außenkanten der linken und der rechten Markierung des Fahrstreifens des Ego-Fahrzeugs befindet oder zu beiden Seiten darüber hinausragt². In der vorgelegten Arbeit wurde die Definition eines Spurwechsels in Anlehnung an Fastenmeier³ gewählt, nach welcher der Spurwechsel bei Überquerung der Markierung beginnt. Dieser Definition folgend wird der Übergang zwischen zwei Werten der Fahrstreifenzugehörigkeit in dem Augenblick vollzogen, in dem das Objekt die Markierungsaußenkante des in der Ausgangssituation relevanten Fahrstreifens kreuzt. Objekte, die nach dieser Definition als Einscherer oder Ausscherer deklariert werden müssten, jedoch keinen Fahrstreifenwechsel durchführen, wurden mit dem Wert „Objekt fährt fahrstreifenversetzt“ belegt. Die so gewählte Definition der Fahrstreifenzugehörigkeit eines Objekts ist einfach gehalten. Sie berücksichtigt nicht, dass ein menschlicher Fahrer viele Situationen antizipieren und so z. B. ein einscherendes Fahrzeug als solches erkennen kann, bevor dieses tatsächlich über die Fahrstreifenmarkierung fährt. Ein Ansatz auf Basis von probabilistischen Netzen, der eine Früherkennung von Einscherern ermöglicht, wird von Dagli⁴ beschrieben. Keines der in dieser Arbeit verwendeten Systeme ist jedoch in der Lage, eine solche Antizipation nachzubilden. Durch die getroffenen Vereinfachungen sind aus diesem Grund keine Auswirkungen auf die Ergebnisse zu erwarten.

Neben den auswertungsrelevanten Informationen über Objekt-Tracking, Fahrstreifenschätzung und reale Fahrstreifenzugehörigkeit aller Objekte ist es wichtig, Informationen über die aktuelle Fahr- und Umgebungssituation zu haben, die eine spätere Einordnung von Fehldetektionen ermöglicht. Ein Fehler im Tracking kann z. B. zu einer falschen Interpretation der Fahrstreifenzugehörigkeit führen. Die Ergebnisse der Untersuchung würden dadurch verfälscht, weswegen in der Vorverarbeitung offensichtliche Fehler⁵ im Tracking-Algorithmus markiert und von der Bewertung ausgeschlossen wurden. Mit dem Ziel die Ergebnisse der Fahrstreifenschätzung besser einordnen zu können wurden in der Vorverarbeitung Informationen darüber gespeichert, ob eine durchgezogene, unterbrochene oder gar keine Markierung vorliegt. Weiterhin wurden Situationen explizit markiert, in denen die Fahrstreifenschätzung auf einer falschen Markierung aufsetzt, was z. B. innerhalb von Baustellen auftreten kann. Vor diesem Hintergrund wurde auch eine Information darüber gespeichert, ob sich das Fahrzeug innerhalb einer Baustelle bewegt oder nicht. Bei Fahrstreifenwechseln des Ego-Fahrzeugs verändert sich die Interpretation der Szene und die zuvor getroffene Definition der Fahrstreifenzugehörigkeit ist nicht mehr gültig. Diese Situationen wurden daher von der Untersuchung ausgeschlossen. Trotzdem sei darauf hingewiesen, dass eine zusätzliche Fahrstreifeninformation auch bei einem Fahrstreifenwechsel Vorteile bietet, da dieser detektiert und entsprechend in der Abstandsregelung berücksichtigt werden kann⁶.

²Dieser Fall kann z. B. für einen breiten Lkw vorliegen.

³Fastenmeier, Gstalter, Lehnig: Spurwechselvorgänge, 2001, S. 1ff

⁴Dagli: Erkennung von Einscherer-Situationen, 2005, S. 61–76

⁵Bei diesen Fehlern handelt es sich in erster Linie um Situationen, in denen das Tracking zwei Objekte zu einem Objekt zusammenfasst.

⁶Behringer: Rechnersehen, 1997, S. 111

5.1.3 Zwischenergebnisse

Im Rahmen der durchgeführten Erhebung wurden Daten von insgesamt 14,3 h (235 km) Stop&Go-Verkehr aufgenommen. Die zurückgelegte Strecke kann im Stop&Go-Verkehr stark variieren und ist daher in Bezug auf die Berechnung einer Situationshäufigkeit nicht besonders aussagekräftig. Im Folgenden werden deswegen alle relevanten Messwerte auf die Zeit bezogen. Abbildung 5.2 zeigt den zeitlichen Anteil einer bestimmten Reisegeschwindigkeit an der Gesamtheit der Messungen (Diskretisierung 5 km/h). Mit ca. 80 % Zeitanteil wurde ein Großteil der Messungen im Niedergeschwindigkeitsbereich unterhalb 30 km/h durchgeführt.

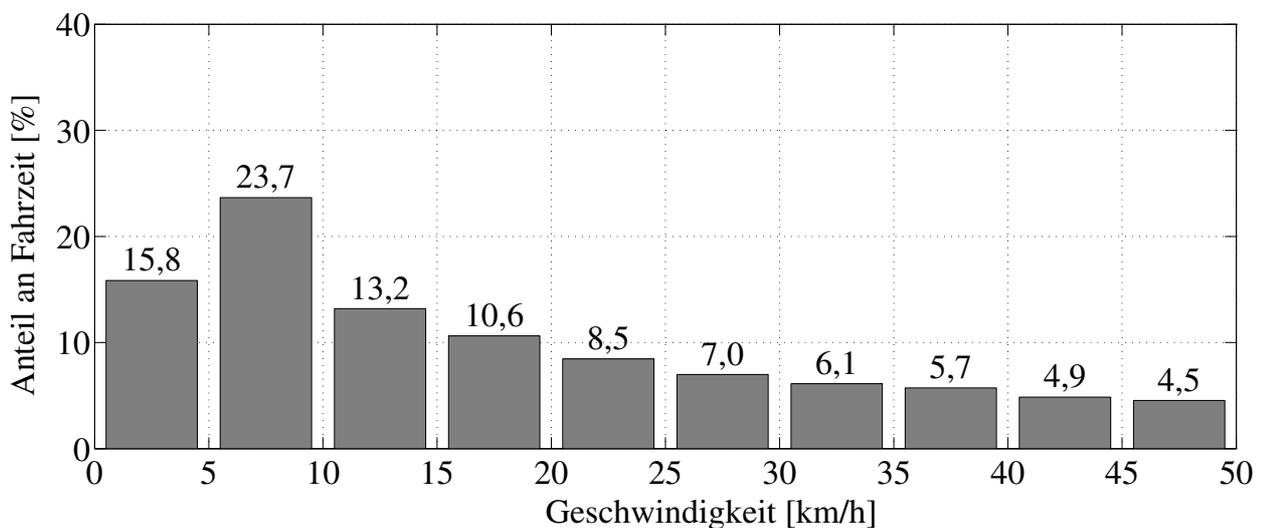


Abbildung 5.2: Geschwindigkeitsprofil der Messfahrten

15,1 % aller Messungen wurden in Baustellen durchgeführt und 41,2 % auf einem Fahrstreifen mit beidseitig gestrichelten Markierungen. Potentielle Problemsituationen durch Mehrfachmarkierungen im Baustellenbereich oder reduzierte Informationen aufgrund von unterbrochener Markierung sind dadurch berücksichtigt. In insgesamt 1,3 % der Messungen wurde eine falsche Markierung als relevant detektiert und getrackt. Allein 65 % dieser Fälle traten innerhalb von Baustellen auf, in denen die besser retroreflektierende, jedoch nicht relevante Markierung getrackt wurde. Durch Verfolgen mehrerer Konturen mit anschließender Gewichtung⁷ kann diese Art der Fehldetektion minimiert werden. Mit Hilfe der Vorverarbeitung wurde eine Konzentration auf die auswertungsrelevanten Informationen erreicht. Insgesamt konnte dabei eine Situationshäufigkeit von $12,96 \text{ h}^{-1}$ bzw. $5,28 \text{ h}^{-1}$ für ein- bzw. ausscherende Fahrzeuge mit einer jeweiligen Zeitlücke von maximal 2,2 s ermittelt werden⁸.

⁷Smuda von Trzebiatowski: Multihypothesenanalyse, 2003, S. 40–53

⁸Die Wahl der Zeitlücke orientiert sich an der ISO-Norm für ACC-Systeme und könnte für eine Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr höher gewählt werden (siehe Kapitel 2.1.1). Die Anzahl der relevanten Situationen liegt dadurch tendenziell höher.

5.2 Fahrstreifenzuordnung

Im Folgenden werden unterschiedliche Systemausprägungen zur Fahrstreifenzuordnung vorgestellt und auf Basis der erhobenen und vorverarbeiteten Messdaten analysiert.

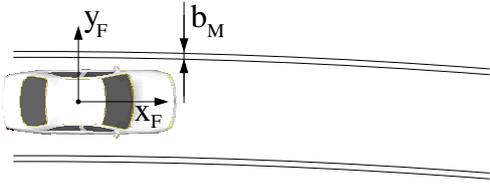
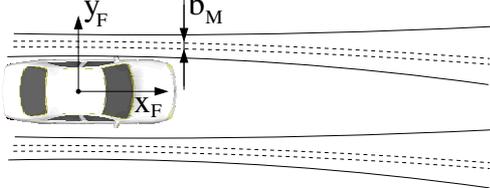
5.2.1 Systemausprägungen

In der Fahrstreifenzuordnung wird ein Objekt im Hinblick auf den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs beurteilt. Sie baut auf dem geschätzten Fahrstreifenverlauf (Kapitel 4) sowie der Definition der Fahrstreifenzugehörigkeit nach Kapitel 5.1.2 auf, in der als Übergangspunkte zwischen den einzelnen Objektzuständen die Markierungsaußenkante des Ausgangsfahrstreifens verwendet wird. Da im vorliegenden Fall ausschließlich der Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs bekannt ist, wird für Fahrzeuge außerhalb des Fahrstreifens die Markierungsinnenkante und für Fahrzeuge innerhalb des Fahrstreifens die Markierungsaußenkante als Referenz für die Fahrstreifenzuordnung verwendet. Es wird die Variable a_M eingeführt, die respektive die Innenkante ($a_M = 0$) oder die Außenkante ($a_M = 1$) der Markierung referenziert. In Kapitel 3 wurde dargestellt, dass die Ermittlung der Außenkante nicht immer zuverlässig möglich ist, weswegen in Anlehnung an die Norm RMS-1⁹ eine konstante Markierungsbreite von $b_M = 15$ cm angenommen wird. Auf Basis der bekannten Position der Markierungsinnenkante lässt sich so eine theoretische Außenkante ermitteln. Markierungen, die von der Breite b_M stark abweichen, finden sich auf Autobahnen und Bundesstraßen in der Regel nur an den Seiten des jeweils äußeren Fahrstreifens. Da an diesen Stellen nur vereinzelt mit Objektwechseln zu rechnen ist, spricht nichts gegen die gewählte Vereinfachung. Die Fahrstreifenzugehörigkeit eines Objekts wird auf Basis der Eckpunkte seines Hecks ermittelt, die wiederum anhand der Objektposition und -breite aus dem Zustandsvektor des Objekt-Trackings bestimmt werden.

Untersuchungen der Fahrstreifenschätzung auf dem Testgelände in Papenburg (siehe Kapitel 4) haben gezeigt, dass Abweichungen in der geschätzten Fahrstreifenposition im Vergleich zur Realität auftreten. Diese wachsen mit der Entfernung an. Aufgrund der limitierten Detektionsreichweite ist ab einer Entfernung oberhalb von 20 m davon auszugehen, dass der geschätzte Fahrstreifen spürbare Abweichungen gegenüber der Realität aufweist. Eine Berücksichtigung dieser Abweichungen in der Fahrstreifenzuordnung verringert die Dynamik bei Objektwechseln, kann jedoch vor dem Hintergrund einer möglichst geringen Anzahl von Nebenspürstörungen und Objektverlusten notwendig sein. Um dies zu überprüfen wurden unterschiedliche Algorithmen zur Fahrstreifenzuordnung FSZ untersucht. Diese sind in Tabelle 5.1 auf der linken Seite grafisch veranschaulicht, auf der rechten Seite ist die mathematische Beschreibung der verwendeten Markierungskanten in Abhängigkeit von der Seite (rechts und links) gegeben.

⁹Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Markierungszeichen, 1993, S. 6

Tabelle 5.1: Vergleichssysteme zur Fahrstreifenzuordnung

	$c = \hat{c}$ $b = \hat{b} + 2a_M b_M$ $y_{\text{off}} = \hat{y}_{\text{off}} - a_M b_M$ $\Delta\psi = \hat{\Delta}\psi$
	$c_{r,l} = \hat{c} \mp \Delta c [2a_M - 1]$ $b = \hat{b} + 2a_M b_M + 2\Delta y [2a_M - 1]$ $y_{\text{off}} = \hat{y}_{\text{off}} - a_M b_M - 2\Delta y [2a_M - 1]$ $\Delta\psi = \hat{\Delta}\psi$

Im Algorithmus FSZ1 (siehe Tabelle 5.1 oben) wurde die Schätzung aus Kapitel 4 als direkter Eingang in die Fahrstreifenzuordnung verwendet. Ein zweiter Algorithmus FSZ2 (siehe Tabelle 5.1 unten) verwendet, ähnlich einem Doppelfahrschlauchmodell, eine zusätzliche Hysterese. Auf Basis der in Kapitel 4 ermittelten Messfehler Δy und Δc wurden die Markierungskanten „auseinandergezogen“. In Anlehnung an die in Abbildung 4.11 dargestellten Ergebnisse bietet sich eine Wahl von $\Delta y = 5 \text{ cm}$ und $\Delta c = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ an. Zwei weitere Systeme FSZ3 und FSZ4 wurden untersucht, deren Aufbau dem von System FSZ1 entspricht. FSZ3 nutzt jedoch statt der geschätzten Krümmung \hat{c} die aus Fahrzeugdaten ermittelte Krümmung¹⁰ c_F . System FSZ4 arbeitet ohne Kenntnis des geschätzten Winkelversatzes $\hat{\Delta}\psi$ ($\Delta\psi = 0$). Gerade vor dem Hintergrund aktueller Seriensysteme¹¹ kann so der Frage nachgegangen werden, wie groß der Einfluss der zusätzlich geschätzten Werte für Krümmung und Winkelversatz ist. Tabelle 5.2 fasst die Vergleichssysteme und ihre dominierenden Eigenschaften zusammen:

Tabelle 5.2: Eigenschaften der Vergleichssysteme FSZx

System	Eigenschaften
FSZ1	Direkte Umsetzung der Fahrstreifenschätzung.
FSZ2	Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Fahrstreifenschätzung.
FSZ3	Direkte Umsetzung der Fahrstreifenschätzung mit $c = c_F$.
FSZ4	Direkte Umsetzung der Fahrstreifenschätzung mit $\Delta\psi = 0$.

¹⁰Der Wert für c_F wird an dieser Stelle postuliert, seine Ermittlung wird in Kapitel 5.3.1 präzisiert.

¹¹Citroen: AFIL, 2005, S. 1

5.2.2 Ergebnisse

Die Qualität einer Fahrstreifenzuordnung definiert sich zunächst über ihre Fehldetektionen. Diese können von unterschiedlicher Dauer sein. Die Dauer einer Fehldetektion ist relevant, da durch Verwendung einer zeitlichen Hysterese eine Reduktion der Fehldetektionen erreicht werden kann. Da jedoch ebenfalls Nachteile in der Detektion ein- und ausscherender Fahrzeuge entstehen, muss der Vorteil einer zeitlichen Hysterese genau bewertet werden. Es werden im Folgenden die Anzahl der Nebenspurstörungen N_{NS} und Objektverluste N_{OV} (pro Stunde) in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Detektionsdauer t_D dargestellt (siehe Abbildung 5.3).

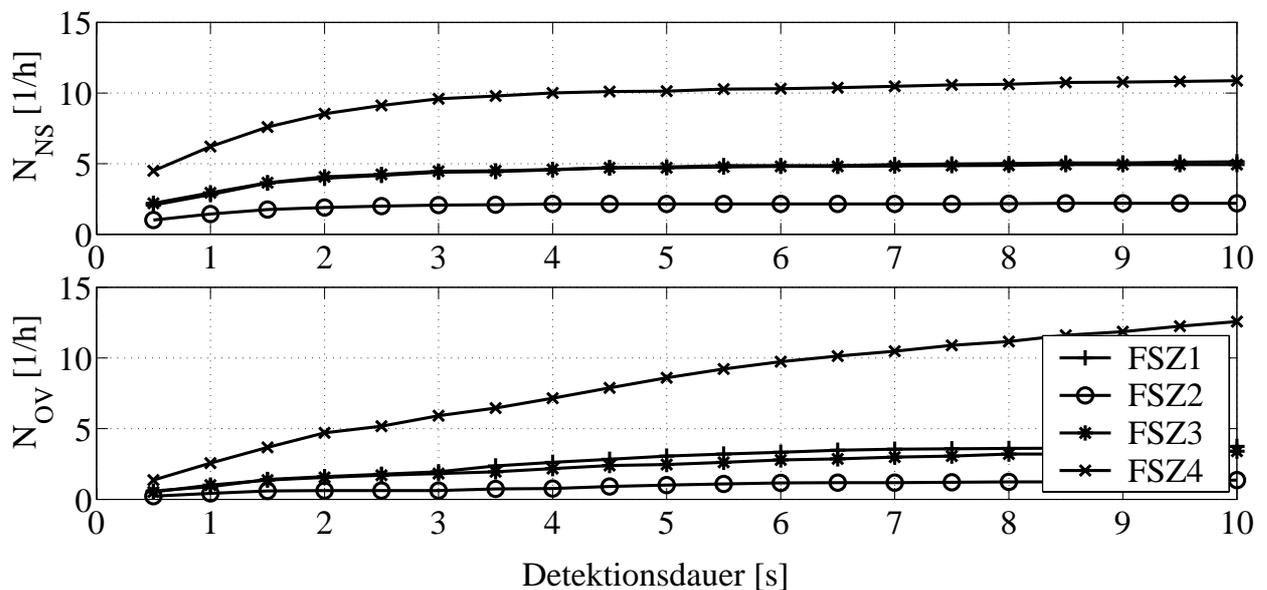


Abbildung 5.3: Absolute Anzahl der Fehldetektionen $\leq t_D$

Im direkten Vergleich aller Systeme zeigt sich, dass vor allem die Information des Winkelversatzes $\hat{\Delta}\psi$ einen deutlichen Einfluss auf die Qualität der Fahrstreifenzuordnung hat. Die geschätzte Krümmung \hat{c} (FSZ1) hingegen weist keine deutlichen Vorteile gegenüber c_F (FSZ3) auf. Erwartungsgemäß liefert FSZ2 mit den Maximalwerten $N_{NS} \approx 2,3 \text{ h}^{-1}$ und $N_{OV} \approx 1,9 \text{ h}^{-1}$ die wenigsten Fehldetektionen, die Werte für FSZ4 liegen ca. fünf mal so hoch. Diese Ergebnisse zeigen, dass zur Verbesserung der Zielauswahl eine Information über den Winkelversatz des eigenen Fahrzeugs ausreichen kann. Bei einem System mit nur einer Messebene wäre z. B. unter Berücksichtigung von Messpunkten aus vorangegangenen Messzyklen eine Ermittlung des Winkelversatzes denkbar. Die Entwicklung und Validierung eines solchen Systems war in der vorgelegten Arbeit nicht vorgesehen, verspricht jedoch Potential¹² zur einfachen Verbesserung der Zielauswahl.

Abbildung 5.4 stellt die prozentualen Häufigkeiten der Fehldetektionen in Abhängigkeit der Detektionsdauer t_D dar.

¹²Der Einfluss unterbrochen gestrichelter Makierungen gewinnt bei einem solchen System an Bedeutung.

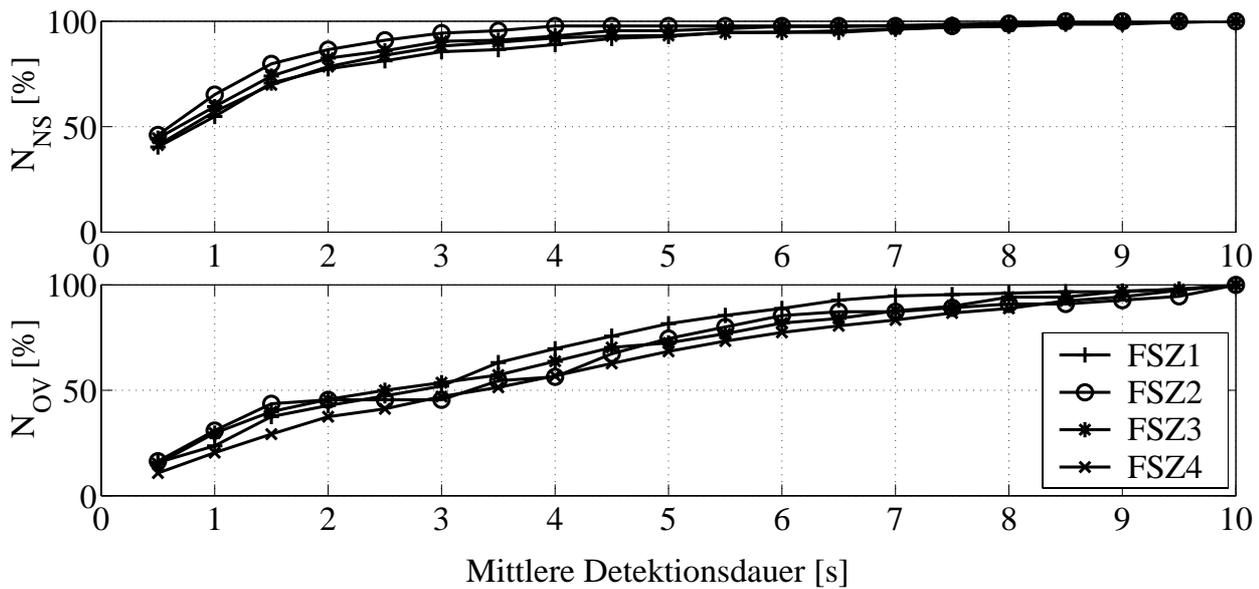


Abbildung 5.4: Prozentuale Häufigkeit der Fehldetektionen $\leq \tau_D$

90 % aller Nebenspurstörungen von FSZ2 liegen unterhalb einer mittleren Detektionsdauer von 2,2 s. Für die Objektverluste liegt dieser Wert unterhalb von 5,9 s. Durch Verwendung einer zeitlichen Hysterese von 2,2 s wäre demnach eine Reduktion der Nebenspurstörungen um 90 % möglich. Die Nachteile für die Detektion von einscherenden Fahrzeugen wären mit einer Verzögerung von 2,2 s allerdings signifikant. Abbildung 5.5 zeigt die ermittelten Detektionszeiten für ein- und ausscherende Fahrzeuge über der Distanz zum eigenen Fahrzeug.

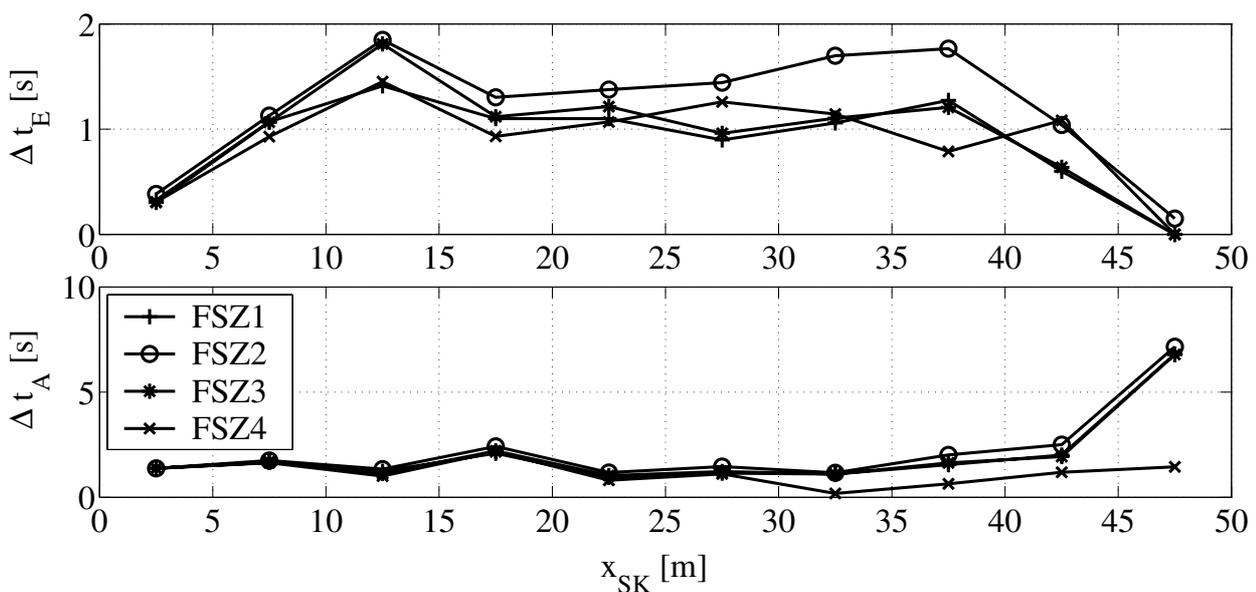


Abbildung 5.5: Detektionszeiten ein- und ausscherender Fahrzeuge

Die Situationen sind in Distanzsritten von jeweils 5 m zusammengefasst. Im gesamten Mittel wird ein Einscherer z. B. durch FSZ2 um $\Delta t_E \approx 1,1$ s nach dem realen Überqueren der Markierung detektiert. Die Detektionszeiten ausscherender Fahrzeuge durch die Fahrstreifenzuordnung verhalten sich mit im Mittel $\Delta t_A \approx 2$ s ähnlich, wie die der einscherenden Fahrzeuge. Lediglich im Bereich zwischen 45 m und 50 m liegt ein extrem hoher Wert von 8 s vor. Bei genauerer Untersuchung dieses Phänomens handelt es sich um eine einzige Situation, deren späte Detektion den Mittelwert aus insgesamt zwei Messungen stark beeinflusst.

Eine Bewertung der Ergebnisse wird erst relativ zu einem Referenzsystem möglich, da die Objekterkennung und die Vorverarbeitung der Daten erheblichen Einfluss auf eine absolute Beurteilung haben können. Gründe hierfür sind zum einen, dass ein getracktes Objekt die Abmessungen des realen Fahrzeugs in der Regel nicht exakt wiedergibt, da Einflüsse durch die Strahlaufösung und Reflexionspunkte auf dem Objekt vorliegen. Zum anderen wurde in der Vorverarbeitung ein Objekt als Einscherer deklariert, sobald es die Kante der Markierung überquert. Dies geschieht zunächst mit der Front, die in vielen Fällen schlecht oder gar nicht durch die Lidarsensorik erfasst wird. Der Algorithmus zur Fahrstreifenzuordnung kann ein Einschermanöver jedoch erst dann detektieren, wenn sich das Heck über die Markierung bewegt. Aufgrund der vergleichsweise hohen Fehldetektionsraten von FSZ3 und FSZ4 wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Schwerpunkt auf FSZ1 und FSZ2 gelegt.

5.3 Fahrstreifenzuordnung versus herkömmliche Zielauswahl

Die Beurteilung der Fahrstreifenzuordnung orientiert sich an der Leistungsfähigkeit von Serialalgorithmen zur Zielauswahl. Dabei kann eine Zielauswahl nicht unabhängig von der Anwendung und der verwendeten Sensorik betrachtet werden. Das im Sinne der vorgelegten Arbeit optimale Vergleichssystem wäre eine Zielauswahl aus einem lidarbasierten Serienlängsregelsystem für den Stop&Go-Verkehr. Ein derartiges System steht dieser Arbeit jedoch nicht zur Verfügung. Seine Neuentwicklung ist ein langer, iterativer Prozess an dem bei Automobilhersteller und Zulieferer viele Entwickler beteiligt sind. Da ein vergleichbares Vorgehen im Rahmen einer Dissertation nicht durchführbar ist, wird auf Basis herkömmlicher Methoden zur Zielauswahl ein Referenzsystem entwickelt, das anschließend auf die erhobenen Daten optimiert wird. Gemäß Kapitel 1.3.2 sind für diese Vorgehensweise die folgenden zwei Optimierungsziele zu nennen:

A-1 Minimale Nebenspurstörungen und Objektverluste [$\min(N_{NS})$ und $\min(N_{OV})$]

A-2 Minimale Detektionszeiten von Ein- und Ausscherern [$\min(t_E)$ und $\min(t_A)$]

Die direkte Umsetzung der genannten Optimierungsziele in eine Kostenfunktion ist nicht ohne weiteres möglich. Ziel der vorgelegten Arbeit ist es, den Nachweis zu führen, dass die

zusätzliche Fahrstreifenkenntnis Vorteile in der Erkennung ein- und ausscherender Fahrzeuge bietet ohne dabei die Fehldetektionsraten zu erhöhen. Aus diesem Grund wird eine Optimierung des Referenzsystems auf Basis der Werte N_{NS}^x und N_{OV}^x durchgeführt, die in Kapitel 5.2 für einen der Algorithmen FSZx ermittelt wurden. Findet sich eine Parametrierung des Referenzsystems, bei dem unter Einhaltung der vorgegebenen Fehldetektionsraten die Detektionszeiten kleiner sind als für FSZx, so konnte der geforderte Nachweis nicht erbracht werden. Findet sich diese Parametrierung nicht, so ist unabhängig von einem in der Praxis möglicherweise gewählten Kompromiss gezeigt, dass die entwickelte Fahrstreifenzuordnung eine Verbesserung der herkömmlichen Zielauswahl darstellt. Diese Vorgehensweise gewährleistet zwar keine Alltagstauglichkeit des Referenzsystems, erlaubt es jedoch zumindest für die durchgeführten Messungen von einer „seriennahen“¹³ Zielauswahl zu sprechen.

Im Folgenden wird zunächst der Aufbau des Referenzsystems beschrieben, bevor in einem zweiten Schritt dessen Parametrierung im Sinne einer für die erhobenen Daten optimalen Zielauswahl dargelegt wird. Im letzten Abschnitt wird dann ein Vergleich zwischen den Algorithmen zur Fahrstreifenzuordnung und der Zielauswahl gezogen sowie eine abschließende Diskussion durchgeführt.

5.3.1 Aufbau des Referenzsystems

Die Gesamtheit der Unsicherheiten bei einer Zielauswahl setzt sich aus der sensor-spezifischen Messgenauigkeit, dem Messrauschen der ESP-Sensorik sowie der nicht bekannten Lage des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens zusammen. Aktuelle Systeme verwenden unterschiedliche Methoden, um diese Unsicherheiten zu berücksichtigen (siehe Kapitel 1.3.2). Es besteht die Forderung ein Referenzsystem (Index: ref) zu schaffen, das eine hohe Vergleichbarkeit zu tatsächlichen Seriensystemen aufweist. Die Umsetzung eines Doppelfahrschlauchs und eine wahlweise entfernungsabhängige Optimierung der jeweiligen Fahrschlauchbreiten entspricht den Ansätzen, die auch bei herkömmlichen Systemen angewandt werden. Daher wird ein Doppelfahrschlauchmodell gemäß Abbildung 5.6 eingeführt.

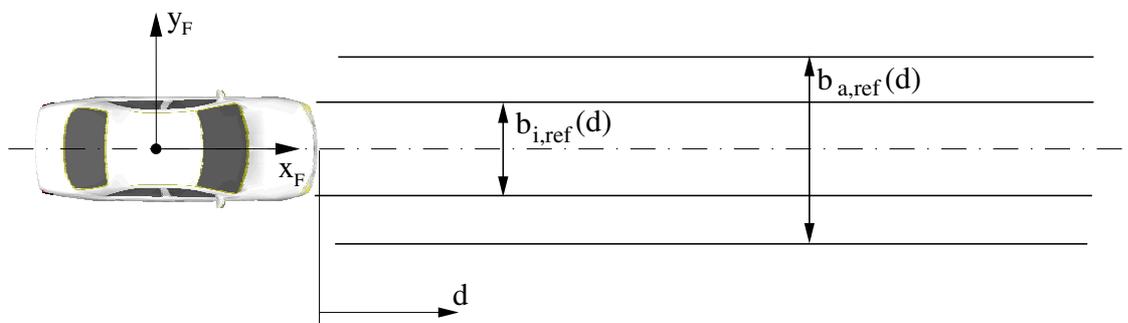


Abbildung 5.6: Doppelfahrschlauchmodell

¹³Aufgrund des begrenzten Untersuchungsgebiets kann die Zielauswahl unter Umständen sogar besser als ein Serienalgorithmus sein.

Die Breite des inneren $b_{i,\text{ref}}(d)$ und die des äußeren Fahrschlauchs $b_{a,\text{ref}}(d)$ werden abhängig von der Distanz d zum Fahrzeug gewählt. Im Gegensatz zum Doppelfahrschlauch lässt sich ein Nachweis der Seriennähe für eine zusätzlich integrierte Fuzzy-Logic ohne genauere Kenntnisse über Serien-Algorithmen nicht führen. Aufgrund zwangsläufiger Annahmen über die verwendeten Wahrscheinlichkeitsverteilungen wäre die resultierende Seriennähe in erster Linie von der Güte der getroffenen Annahmen abhängig. Hinzu kommt, dass die Auswertung in dieser Arbeit ihren Schwerpunkt auf die Dynamik bei der Detektion von Ein- bzw. Ausscherern legt. Ein in dieser Hinsicht optimal arbeitender Doppelfahrschlauch wird durch zusätzliche Fuzzy-Logic träger, sprich schlechter. Um Einflüsse durch Messausreißer trotzdem minimieren zu können, wurde eine Hysterese in Form des zeitlichen Schwellwerts t_{ref} in das System eingeführt. Ein Objekt wird dabei dem Fahrschlauch erst zugeordnet, wenn es sich mindestens die Zeitdauer t_{ref} innerhalb des Fahrschlauchs aufgehalten hat. Da ein Verlust des relevanten Objekts im Tracking durch die Methode des zeitlichen Schwellwerts schlechter kompensiert wird als durch Fuzzy-Logic, wurden diese Situationen von der Auswertung ausgeschlossen. Das verwendete Referenzsystem spiegelt mithin die Vorgehensweise bei herkömmlichen Systemen wider.

Die für das Referenzsystem verwendeten Methoden sind für radarbasierte Systeme dokumentiert. Einflüsse, die durch Verwendung eines Lidarsensors auftreten, werden im Folgenden diskutiert. Im Unterschied zu einem Radarsensor liegen für das Referenzsystem ein veränderter Anwendungsbereich sowie sich unterscheidende Objektinformationen vor. Die Fahrschlauchkrümmung in einem ACC-System wird in der Regel aus der Gierrate bestimmt. Da die Messempfindlichkeit der Gierraten-Sensorik bei niedrigen Geschwindigkeiten abnimmt¹⁴, bietet sich im Niedergeschwindigkeitsbereich eine Krümmungsbestimmung anhand des Lenkwinkels an. Aufgrund der geplanten Anwendung im Bereich von 0 bis 50 km/h wurde die lenkwinkelbasierte Krümmung oberhalb von 10 km/h in eine gierratenbasierte Krümmung überführt (siehe Kapitel 4.1).

Die Objektinformationen eines Lidarsensors unterscheiden sich von denen einer Radarsensorik vor allem durch die zusätzliche Kenntnis der Objektbreite. Es ergibt sich die Frage nach der Interpretation der Objektdaten. Ein Punktziel des Radarsensors kann sich entweder innerhalb, außerhalb oder direkt auf dem Rand des Fahrschlauchs befinden. Die Zuordnung ist somit eindeutig. Bei Kenntnis der Breite eines Objekts wird eine Interpretation nach Kapitel 5.1.2 möglich, mit dem einzigen Unterschied, dass als Grenze für den Zustandsübergang nicht die Kante der Markierung, sondern die Grenze des Fahrschlauchs gewählt wird. Da die Systemreaktion auf ein einscherendes oder ausscherendes Objekt für diese Arbeit nicht genauer spezifiziert wird, spricht auch im Fall einer nicht bekannten Fahrstreifenposition nichts gegen diese Interpretation, zumal dadurch die Vergleichbarkeit zwischen Zielauswahl und Fahrstreifenzuordnung erleichtert wird.

¹⁴Robert Bosch GmbH: ACC, 2002, S. 37

5.3.2 Parametrierung des Referenzsystems

Im Folgenden wird zunächst die Vorgehensweise bei der Parametrierung des Referenzsystems beschrieben. Anschließend wird detailliert auf die Wahl des Parameterraums eingegangen, bevor dann die Ergebnisse der Parametrierung diskutiert werden.

Vorgehensweise

In Abbildung 5.7 ist der Ablauf der Parametrierung grafisch dargestellt.

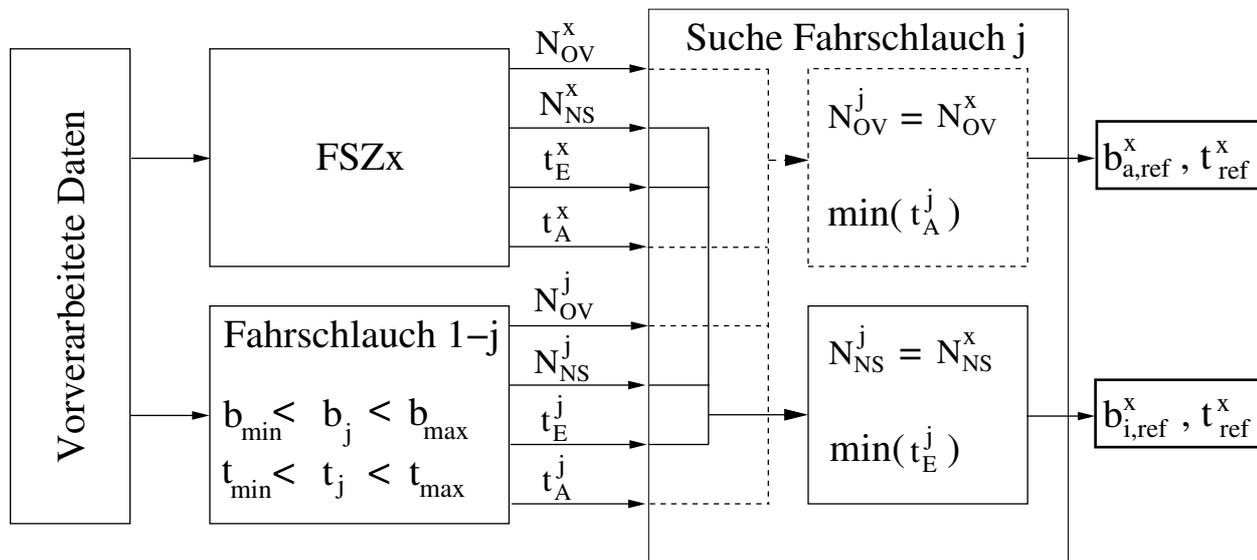


Abbildung 5.7: Ablauf der Parametrierung

Auf Basis der vorverarbeiteten Daten wurden unterschiedliche Variationen j eines Einzelfahrschlauchs untersucht, der sich über seine Breite b_j und den zeitlichen Schwellwert t_j definiert. Die Einzelfahrschläuche wurden innerhalb eines vordefinierten Parameterraums mit den Schrittweiten Δb_j und Δt_j variiert. Jede so untersuchte Variation j ist durch ihre Werte für N_{NS}^j , N_{OV}^j , t_E^j und t_A^j charakterisiert. Zur Bestimmung des optimalen, inneren Fahrschlauchs wurde aus den berechneten Variationen der Fahrschlauch j ausgewählt, dessen Anzahl an Nebenspurstörungen N_{NS}^j gleich¹⁵ N_{NS}^x ist. Kamen mehrere Fahrschlauchbreiten in Frage, wurde derjenige mit den kürzesten Detektionszeiten t_E^j ausgewählt. Zur Ermittlung des optimalen, äußeren Fahrschlauchs wurde das gleiche Vorgehen analog auf N_{OV}^j und t_A^j angewandt. So konnte der im Sinne einer bestmöglichen Detektion von Ein- bzw. Ausscherern optimale Referenzfahrschlauch j ausgewählt werden. Um die Abhängigkeit der Fahrschlauchbreite von der Distanz zu berücksichtigen, wurde der Distanzbereich zwischen 0 und 50 m in gleich große Bereiche eingeteilt, die Schrittweite wurde dabei zu $\Delta d = 5$ m gewählt. Für jeden so entste-

¹⁵Ist kein Fahrschlauch mit gleicher Anzahl an Fehldetektionen vorhanden, so wird der Fahrschlauch mit den nächst höheren Fehldetektionsraten gewählt.

henden Distanzbereich d_{Δ} wurde die in Abbildung 5.7 beschriebene Parametrierung einzeln durchgeführt.

Wahl des Parameterraums

Die Ermittlung des Referenzsystems wird durch den für b_j und t_j gewählten Parameterraum eingegrenzt, seine Wahl darf das Ergebnis nicht beeinflussen. Ein Fahrschlauchmodell beschreibt im Idealfall den vom Fahrzeug zukünftig befahrenen Weg. Das Ziel, diesen kollisionsfrei befahren zu können, wird mit einer Wahl von b_j oberhalb der Fahrzeugbreite b_F erreicht. Um sich jedoch nicht schon zu Beginn stark einzuschränken, wurde ein Wert von $b_{\min} = 1$ m gewählt. Der Maximalwert b_{\max} ergibt sich für den inneren bzw. äußeren Fahrschlauch, aus den Positionen aller Objekte, deren Fahrstreifenzugehörigkeit während den Messungen als „im Fahrstreifen“ bzw. „nicht im Fahrstreifen“ deklariert wurde. In Abbildung 5.8 ist der minimale, laterale Versatz dieser Objekte zum prädierten Kurs gegeben.

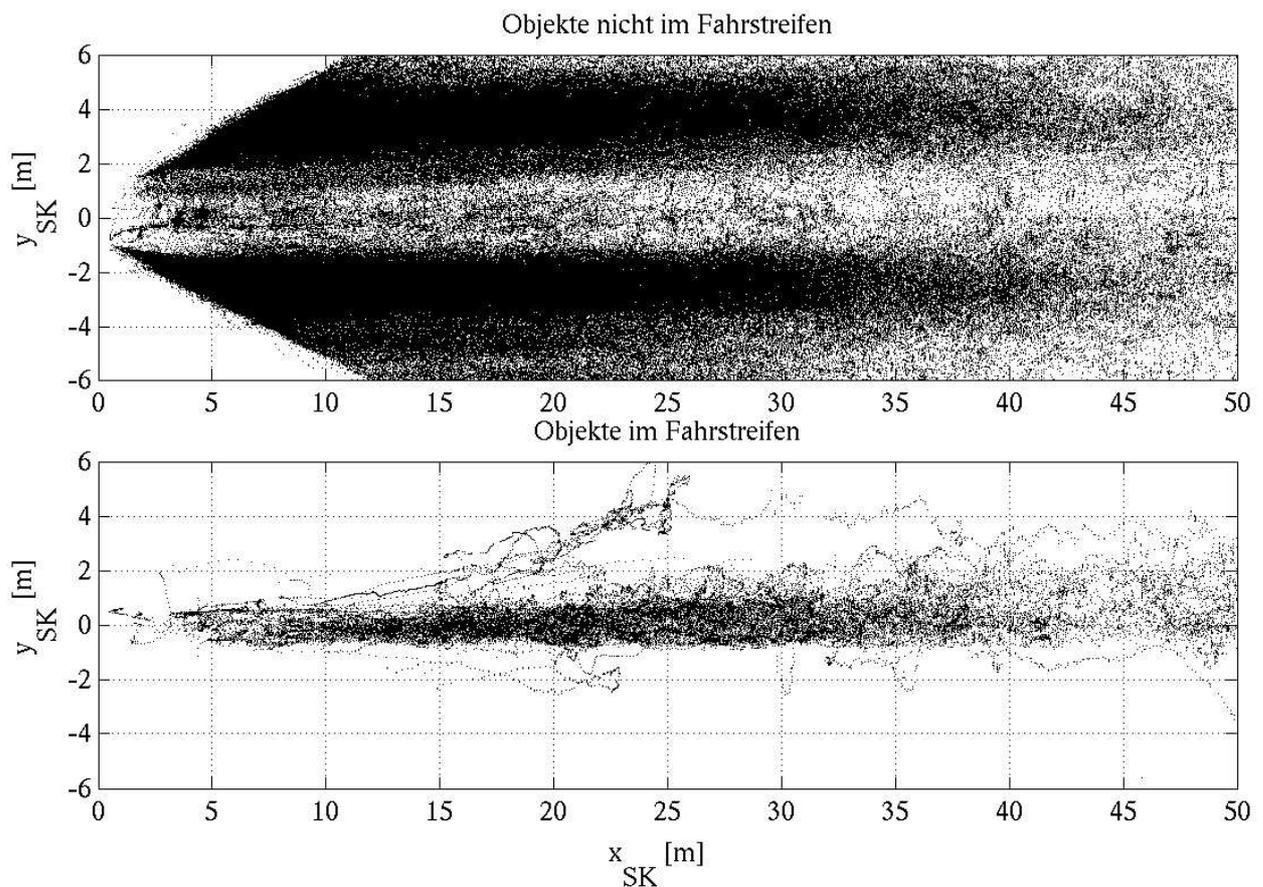


Abbildung 5.8: Definition des Parameterraums für b_j

Objekte, die sich nicht im Fahrstreifen befinden (siehe Abbildung 5.8 oben) haben in der Regel einen seitlichen Versatz zum prädierten Kurs. Es wird jedoch ebenso deutlich, dass eine optimale Wahl von $b_{i,\text{ref}}$ nicht jede Nebenspurstörung verhindern kann. Der Bereich für

den inneren Fahrschlauch weitet sich mit der Distanz aus. Die Messpunkte der Objekte, die sich im Fahrstreifen befinden (siehe Abbildung 5.8 unten), sind, abgesehen von einigen wenigen Ausnahmen, deutlich homogener, weiten sich jedoch ebenfalls über der Distanz aus. Auf Basis von Abbildung 5.8 wurden für den inneren und den äußeren Fahrschlauch des Referenzsystems die folgenden Randbedingungen für den Parameterraum gewählt:

$$1,0 \text{ m} \leq b_j \leq 10,0 \text{ m} \quad \text{mit} \quad \Delta b_j = 0,02 \text{ m} \quad (5.1)$$

$$0,0 \text{ s} \leq t_j \leq 5,0 \text{ s} \quad \text{mit} \quad \Delta t_j = 0,1 \text{ s} \quad (5.2)$$

Ergebnisse

Die vorgestellte Parametrierung des Referenzsystems wurde für die Fahrstreifenzuordnungen FSZ1 und FSZ2 durchgeführt. Abbildung 5.9 zeigt den jeweils resultierenden inneren und äußeren Fahrschlauch.

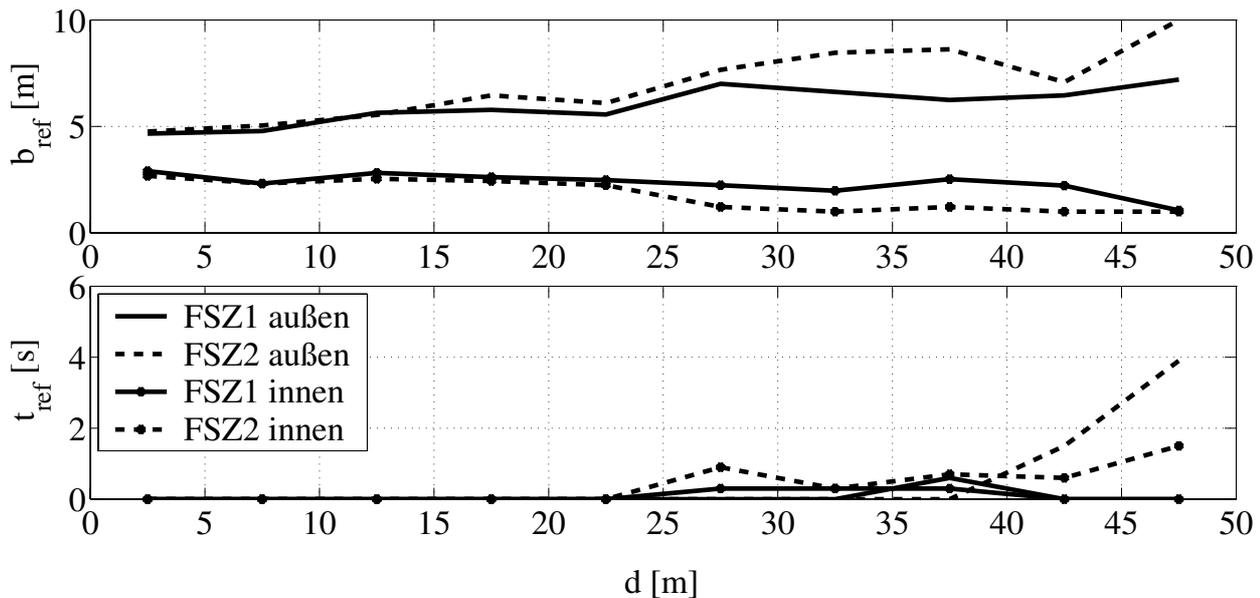


Abbildung 5.9: Parametrierung der Referenzsysteme

Die Ergebnisse aus den einzelnen Entfernungsschritten d_{Δ} sind auf dem jeweiligen Mittelwert des Intervalls zusammengefasst. Die Breite des inneren Fahrschlauchs sinkt mit der Entfernung, die des äußeren wächst. Dieses Verhalten lässt sich durch die Ungenauigkeit der Kursprädiktion erklären, deren Einfluss mit der Entfernung zunimmt. Ab- und Zunahme der Breite lassen sich vor diesem Hintergrund auf die primäre Aufgabe des jeweiligen Fahrschlauchs zurückführen, nur relevante bzw. nur nicht relevante Objekte aufzunehmen. Im Nahbereich bietet sich eine Verwendung des Parameters t_{ref} in keinem der beiden Fahrschläuche an. Erst mit wachsender Entfernung gewinnt der zeitliche Schwellwert an Einfluss. Auch dies lässt sich durch den mit der Entfernung steigenden Einfluss der Unsicherheiten

erklären. Für den inneren Fahrschlauch bleibt t_{ref} jedoch deutlich unterhalb von 2 s, für den äußeren Fahrschlauch steigt sie für FSZ2 oberhalb von 40 m auf maximal 4 s an.

5.3.3 Systemvergleich

Es wurden unterschiedliche Algorithmen zur Fahrstreifenzuordnung FSZx entwickelt. Für zwei davon (FSZ1 und FSZ2) wurden Referenzsysteme geschaffen, die für die erhobenen Messdaten die optimale Realisierung einer herkömmlichen Zielauswahl darstellen. Im vorliegenden Kapitel wird der Systemvergleich zwischen FSZ1 bzw. FSZ2 und dem jeweiligen Referenzsystem diskutiert. Als Basis des Vergleichs werden die Detektionszeiten bei ein- und ausscherenden Fahrzeugen verwendet. Abbildung 5.10 zeigt den zeitlichen Vorteil Δt einer Fahrstreifenzuordnung FSZx im Vergleich zum Referenzsystem.

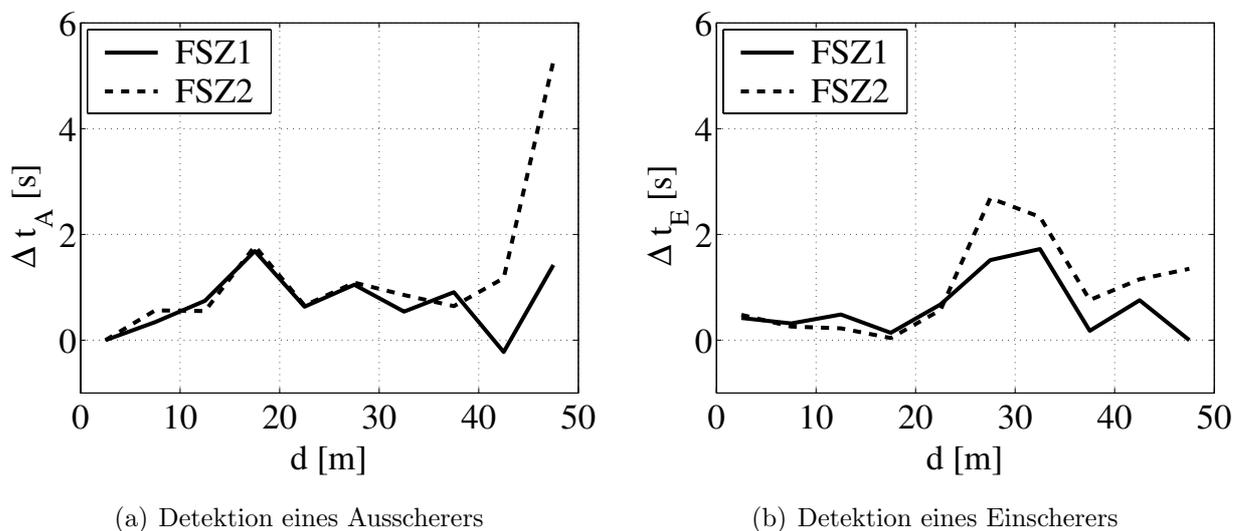


Abbildung 5.10: Zeitgewinn durch FSZx bei der Detektion von Aus- bzw. Einscherern

Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der Entfernung dargestellt. Im Mittel ergibt sich bei einscherenden Fahrzeugen ein zeitlicher Vorteil von 0,62 s bzw. 0,98 s für FSZ1 bzw. FSZ2 und bei ausscherenden Fahrzeugen ein Vorteil von 0,71 s bzw. 1,26 s. Im direkten Vergleich fällt auf, dass das formal trägere System FSZ2 eine im Mittel höhere, zeitliche Verbesserung herkömmlicher Systeme ermöglicht als FSZ1. Dies hängt damit zusammen, dass die Vergleichssysteme jeweils nur in Bezug auf den zur Optimierung verwendeten Algorithmus FSZ1 bzw. FSZ2 als optimal betrachtet werden können. Weiterhin unterstreicht dies die Problematik in unterschiedlichen Situationen ohne Fahrstreifeninformation die jeweils richtige Zielauswahl zu treffen. Die weitere Beurteilung konzentriert sich auf FSZ2. Die in Abbildung 5.10 gemittelten Detektionsvorteile geben keinen Aufschluss über deren Verteilung in einzelnen Situationen. Aus diesem Grund wurde FSZ2 durch ein weiteres Durchlaufen der erhobenen Daten direkt mit dem gesamten, optimierten Doppelfahrschlauchmodell nach Kapitel 5.3.2 verglichen (siehe Abbildung 5.11).

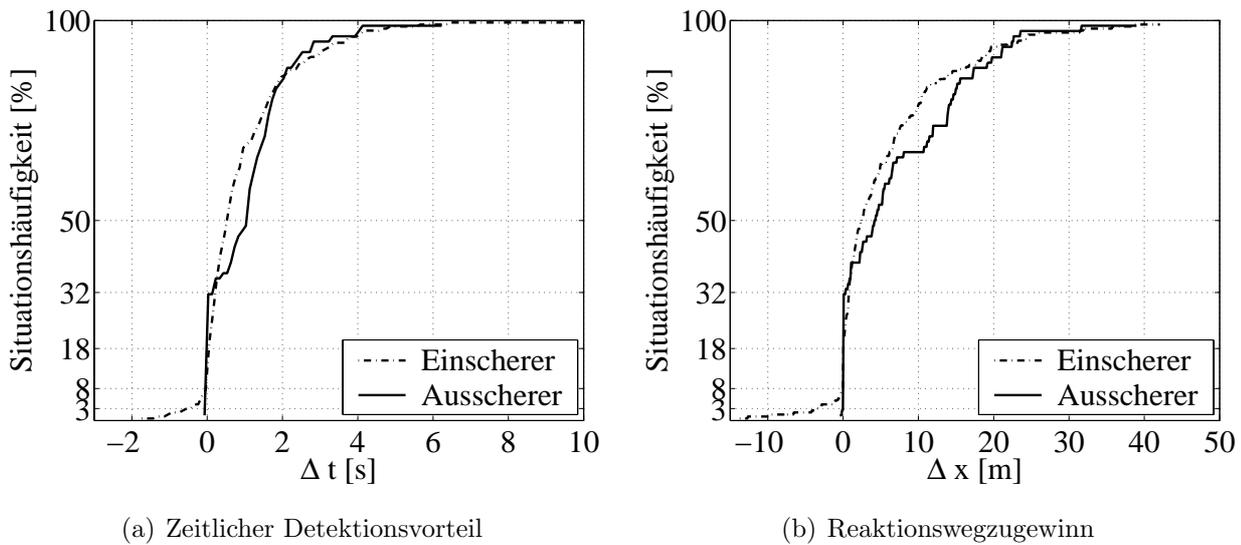


Abbildung 5.11: Prozentuale Situationshäufigkeit der Detektionsvorteile bei ein- und ausscherenden Fahrzeugen für FSZ2

Sowohl bei ein- als auch bei ausscherenden Fahrzeugen weisen die untersuchten Situationen in den meisten Fällen einen Zeitvorteil $\Delta t \geq 0$ auf. Der Anteil der Situationen, in denen FSZ2 einen Nachteil gegenüber dem Referenzsystem hat, liegt für einscherende Fahrzeuge bei ca. 8 % und für ausscherende Fahrzeuge bei 3 %. Die deutliche Steigung beider Kurven im Nullpunkt zeigt, dass eine Kenntnis des Fahrstreifens in bis zu 18 % der Einscher- bzw. 32 % der Ausscher-Situationen keinen Vorteil bringt. In den verbleibenden Situationen ist mit Fahrstreifenerkennung ein zeitlicher Vorteil zu verzeichnen, der mitunter 4,0 s oder mehr betragen kann. Die Ergebnisse belegen den Nutzen der Fahrstreifeninformation für die Detektion ein- und ausscherender Fahrzeuge. Allein auf Basis des Zeitvorteils lässt sich nur schwer beurteilen, welche Vorteile ein Fahrerassistenzsystem durch die zusätzliche Fahrstreifeninformation hat. Deswegen ist im rechten Diagramm der mittlere Zugewinn an Reaktionsweg¹⁶ dargestellt, um den z. B. ein Abstandsregelsystem mit Fahrstreifeninformation früher eingreifen kann als ohne. Es wird deutlich, dass die zeitlichen Vorteile einen signifikanten Einfluss auf die Reaktionsmöglichkeiten des Assistenzsystems haben.

5.4 Fazit

Es wurden vier unterschiedliche Algorithmen zur Fahrstreifenzuordnung für ein Abstandsregelsystem im Stop&Go-Verkehr entwickelt, die auf einer lidarbasierten Objekt- und Fahrstreifenerkennung aufbauen. Als Grundlage für ihre Beurteilung dienten Messdaten von insgesamt $14,3 \text{ h}^{-1}$ Fahrtzeit auf Bundesstraßen und Autobahnen, im Geschwindigkeitsbereich zwischen 0 und 50 km/h. Im Rahmen dieser Messungen traten Einscherer mit einer Häu-

¹⁶Für die Berechnung des zugewonnen Reaktionsweg wird die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem betroffenen Fahrzeug zu Situationsbeginn zu grunde gelegt.

figkeit von $12,96 \text{ h}^{-1}$ und Ausscherer mit einer Häufigkeit von $5,28 \text{ h}^{-1}$ auf. Im Vergleich der unterschiedlichen Algorithmen zur Fahrstreifenzuordnung ergibt sich, dass eine direkte Anwendung der lidarbasierten Fahrstreifenschätzung fehlerbehaftet ist. Die zusätzliche Berücksichtigung des potentiellen, lateralen Schätzfehlers ermöglicht eine insgesamt deutlich bessere Performance. Ein System, ohne Wissen über den Winkelversatz zwischen Fahrzeug und Fahrstreifen, stellt sich ebenfalls als anfällig für Fehldetektionen heraus. Mit dem besten entwickelten Algorithmus zur Fahrstreifenzuordnung kommt es im Mittel zu 2,3 Nebenspurstörungen bzw. 1,9 Objektverlusten pro Stunde.

Die absoluten Fehler spielen im Vergleich mit einer herkömmlichen Zielauswahl eine untergeordnete Rolle. Hier ergibt sich eine im Mittel um 0,98 s und 1,26 s verbesserte Detektion von Ein- und Ausscherern mit lidarbasierter Fahrstreifeninformation. Als Referenzsystem dient ein Algorithmus, dessen Aufbau in Anlehnung an aktuelle Seriensysteme realisiert und dessen Parametrierung auf die erhobenen Messdaten optimiert wurde. Es konnte keine Parametrierung des Referenzsystems gefunden werden, die bei gleichbleibender Anzahl an Fehldetektionen eine dynamischere Detektion von Ein- oder Ausscherern ermöglicht. Aufgrund der Optimierung des Referenzsystems auf die erhobenen Daten ist damit der Vorteil der lidarbasierten Fahrstreifeninformation für eine Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr belegt.

6 Diskussion der Ergebnisse

Die Hauptaussage der vorgelegten Arbeit lässt sich wie folgt zusammenfassen: *„Lidarsensorik kann dazu verwendet werden neben der hinlänglich bekannten Objektdetektion auch eine Fahrstreifenerkennung durchzuführen. Durch Kombination beider Informationen lässt sich die Zielauswahl für ein Abstandsregelsystem im Stop&Go-Verkehr ohne den Einsatz von Zusatzsensorik verbessern, wodurch im Vergleich zu herkömmlichen Systemen eine schnellere Detektion des Ein- bzw. Ausscherens anderer Fahrzeuge möglich ist.“* Diese Aussage soll im Folgenden diskutiert sowie Empfehlungen für die Weiterentwicklung formuliert werden.

6.1 Objektivität, Reliabilität und Validität

Die drei wichtigsten Kriterien zur Beurteilung einer wissenschaftlichen Untersuchung sind: Objektivität, Reliabilität und Validität. Die oben gegebene Hauptaussage der Arbeit wird nun im Hinblick auf diese drei Kriterien diskutiert.

Ein Ergebnis wird als objektiv bezeichnet, wenn es unabhängig von der Person des Untersuchers ist. Die Möglichkeit mit einem Lidarsensor eine Markierung zu detektieren ist bereits in anderen Arbeiten aufgezeigt worden. Zum ersten Mal wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch eine vorausschauende Schätzung des Fahrstreifenverlaufs und deren Kombination mit einer, auf der gleichen Sensorik aufbauenden Objektdetektion, unternommen. Da die Ergebnisse der Fahrstreifenzuordnung von der Wahl der Sensorik abhängen, die im vorliegenden Fall in erster Linie von der Anzahl der Messebenen sowie der Verfügbarkeit der Sensorik beeinflusst wurde, liegt eine Einschränkung der Objektivität vor. Allerdings konnte gezeigt werden, dass die ausgewählte Sensorik nicht das mit Lidarsensorik erreichbare Optimum im Hinblick auf eine Fahrstreifendetektion darstellt. Die Untersuchungsergebnisse sind mithin zwar nicht uneingeschränkt objektiv, mit Blick auf heute verfügbare Lidarsensoren jedoch realistisch. Weiterhin wurde die Markierungsdetektion auf trockener und nasser Fahrbahn mit für Deutschland extrem schlechter und guter Markierungsqualität überprüft. Dadurch wurde eine objektive Einschätzung der Verfügbarkeit der Markierungsdetektion ermöglicht. Die Aussage, dass die lidarbasierte Fahrstreifenzuordnung im Vergleich zu herkömmlichen Systemen eine frühere Detektion von ein- und ausscherenden Fahrzeugen ermöglicht ist als objektiv zu bewerten, da als Vergleichssystem eine optimierte Zielauswahl und damit die bestmögliche Referenz verwendet wurde. Lediglich die Wahl der Messstrecke und das vorliegende Verkehrsaufkommen schränken die Objektivität ein, allerdings aufgrund der Beschränkung auf Bundesstraßen

und Autobahnen sowie der Definition des ausgewerteten Geschwindigkeitsbereichs zwischen 0 und 50 km/h nur in geringem Maße.

Die Reliabilität einer Untersuchung beschreibt ihre Messgenauigkeit. Mit dem Ziel eine hohe Reliabilität zu erreichen, wurden die durchgeführten Versuche stets mehrmals wiederholt. Die dabei ermittelte und auch angegebene Standardabweichung kann als Tendenz für die jeweils vorliegende Reliabilität verwendet werden. Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Fahrstreifenschätzung wurde durch einen Vergleich mit Ground-Truth-Daten überprüft, dessen Ergebnisse als direktes Maß für die Reliabilität interpretiert werden können. Die Simulation des Fahrereinflusses wurde im Rahmen der durchgeführten Datenerhebung durch variierende Vorgaben an den Fahrer des Testfahrzeugs realisiert, der diese ohne technische Hilfsmittel umsetzte. Dadurch entstehende Einflüsse auf die Reliabilität sind jedoch als gering einzuschätzen, da das Verhalten ein- und auscherender Fahrzeuge maßgeblich durch ihre Fahrer und nur indirekt durch das Verhalten des Ego-Fahrzeugs bestimmt ist. Die Reliabilität der Auswahl der zu bewertenden Ein- und Ausschersituationen wurde durch Sichtbewertung anhand fester Kriterien¹ gewährleistet.

Die Validität einer Untersuchung beschreibt ihre Gültigkeit, d. h. den Grad der Genauigkeit, mit der sie misst, was sie zu messen vorgibt. Der durchgeführte Vergleich der Fahrstreifenschätzung mit Ground-Truth-Daten liefert somit nicht nur eine Aussage über die Reliabilität sondern auch über die Validität der Untersuchung. Die Aussage, dass eine kombinierte Objekt- und Fahrstreifenenerkennung ohne Zusatzsensorik möglich ist, ist nur eingeschränkt valide. So benötigt das entwickelte System zur Fahrstreifendetektion zwar keine zusätzliche Videosensorik, aber es sind zwei Lidarsensoren im Einsatz, die zudem nicht auf die in Serie übliche Art und Weise am Fahrzeug verbaut sind. Die Verwendung zweier Sensoren resultiert aus der reduzierten Sensorqualität im Seitenbereich. Die dadurch geringere Validität der Untersuchung wird allerdings durch das abwechselnd seitenversetzte Fahren im Fahrstreifen zumindest teilweise kompensiert.

6.2 Empfehlungen zur Weiterentwicklung

Als Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen bieten sich unter anderem die im letzten Kapitel identifizierten Faktoren an, durch welche die Objektivität, die Reliabilität oder die Validität der erzielten Ergebnisse eingeschränkt werden. Vor allem die Bereiche Sensorik bzw. Sensorik Konstellation sowie die Systemausprägung werden im Folgenden diskutiert.

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Sensorwahl, die zu Beginn dieser Arbeit im Jahr 2003 getroffen wurde. Die gewählte Sensorik war nicht auf eine Anwendung zur Fahrstreifendetektion optimiert und der Zugriff auf die Sensordaten der gemessenen Werte von Distanz und Intensität waren beschränkt. Dadurch waren der Signalverarbeitung und der

¹In der vorgelegten Arbeit wurde dazu in erster Linie die laterale Relativposition zur Fahrstreifenmarkierung verwendet.

darauf aufbauenden Markierungsinterpretation in dieser Arbeit klare Grenzen gesetzt. Bei erweitertem Zugriff auf die Sensordaten ist noch Optimierungspotential im Hinblick auf die Detektionsreichweite aber auch die Interpretation der Messpunkte zu vermuten, wie es z. B. von Ibeo² schon genutzt wird. Als erster Schritt sollte eine genauere Untersuchung dieses Potentials durchgeführt werden. Daran sollte sich der zweite Schritt anschließen, in dem die verwendete Sensorkonstellation in Abhängigkeit zukünftiger Sensorleistung neu überdacht wird. Dies vor allem mit Fokus auf eine Anwendung in Serie, bei der in der Regel nur ein Lidarsensor an der Fahrzeugfront untergebracht wird. Die Optimierung der Sensorik sollte das Ziel verfolgen später nur einen Sensor zu benötigen und die Ausrichtung der Messebenen sowie die Signalverarbeitung dementsprechend wählen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zur Verbesserung der Zielauswahl vor allem die Fahrstreifenbreite, der laterale Versatz und der Winkelversatz des Fahrzeugs zum Fahrstreifen zu ermitteln sind.

Bezogen auf die Systemausprägung konnte in der vorgelegten Arbeit gezeigt werden, dass die Qualität der durchgeführten Fahrstreifenschätzung ausreicht, um die Zielauswahl einer Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr zu verbessern. In weiteren Schritten sollte untersucht werden, ob auch ein ACC-System von der Fahrstreifeninformation profitieren kann. Schon in Vorgängerarbeiten wurde gezeigt, dass für die Darstellung einer LDW-Funktion auch ein Lidarsensor ohne vorausschauende Fahrstreifenschätzung ausreicht. Die Vermutung, dass auch das entwickelte System eine solche Funktion unterstützen kann, liegt nahe, wäre jedoch noch zu prüfen. Dabei wäre weiterhin zu evaluieren, inwieweit querführende Funktionen durch die entwickelte Fahrstreifenschätzung bedient werden können, wobei sich auch hier eine erste Konzentration auf den Stop&Go-Bereich sinnvoll empfiehlt.

6.3 Fazit

Die Diskussion der Ergebnisse zeigt, an welchen Stellen in dieser Arbeit Kompromisse eingegangen werden mussten und inwiefern diese Kompromisse einen Einfluss auf die Gesamtergebnisse haben. Für eine Serienanwendung oder die technische Umsetzung ist vor allem die Frage interessant, ob eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität gegeben ist. Übertragbar sind die erzielten Ergebnisse insoweit, dass eine kombinierte Objekt- und Fahrstreifendetektion auf Basis von Lidarsensorik nachweislich möglich ist und die Zielauswahl einer Abstandsregelung durch eine zusätzliche Fahrstreifeninformation verbessert wird. Allerdings ist für die Umsetzung am Fahrzeug auch die verwendete Sensorkonstellation zu beachten. Die erzielten Ergebnisse stellen im Hinblick auf die Sensorik eine eher pessimistische Abschätzung der Möglichkeiten dar. Eine Übertragbarkeit ist dadurch gegeben. Die Verwendung von zwei Sensoren hingegen ist für eine Anwendung in Serie eher unrealistisch, in Abhängigkeit von der verwendeten Sensorik und der Zielanwendung allerdings auch nicht zwingend notwendig.

²Fürstenberg, Kämpchen, Lages, Dietmayer, Willhoef: Markierungserkennung, 2005, S. 1ff

Mit dem Ziel, aktuelle Assistenzsysteme zu verbessern und neue Systeme zu entwickeln, werden kurz- und mittelfristig Informationen über den Fahrstreifenverlauf benötigt. Die Ergebnisse der vorgelegten Arbeit belegen die Möglichkeiten der Lidartechnologie diese Informationen zu liefern. Ob sich der Lidar jedoch in einer Form durchsetzen wird, die eine Objekt- und eine Fahrstreifendetektion kombiniert, wird unter anderem auch davon abhängen, wie schnell sich eine zusätzliche Kamera als Serienlösung für Fahrerassistenzsysteme etablieren kann.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Abstandsregelsysteme für den Stau nutzen bislang einen Radar- oder Lidarsensor zur Detektion anderer Verkehrsteilnehmer und regeln den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Das für die Regelung relevante Objekt wird durch Prädiktion der eigenen Bewegung bestimmt, was in Situationen ein- oder ausscherender Fahrzeuge zu einer Objektauswahl führen kann, die sich nicht mit der Erwartung des Fahrers deckt. Das resultierende Systemverhalten wird durch den Fahrer als unkomfortabel empfunden. Die Verwendung eines zusätzlichen Videosensors zur Fahrstreifendetektion hat sich bislang aufgrund der durch diesen ebenfalls ansteigenden Systemkosten nicht durchsetzen können. Durch eine kombinierte Objekt- und Fahrstreifendetektion mit nur einer Sensorik kann das Ansteigen der Kosten vermieden oder zumindest reduziert werden. In der vorgelegten Arbeit wurde hierzu eine Lidarsensorik aus einem Seriensystem eingesetzt, die durch geeignete Ausrichtung und mit einer neu entwickelten Signalverarbeitung die Detektion sowohl von Objekten als auch des Fahrstreifens ermöglicht. Der Fokus der Arbeit lag dabei auf der Detektion des Fahrstreifenverlaufs mit dem Ziel, die Erkennung von ein- und ausscherenden Fahrzeugen zu verbessern und dadurch den Komfort eines Abstandsregelsystems im Stop&Go-Verkehr zu erhöhen.

Als wesentliche Einflussparameter auf die Detektionsgrenzen des Lidarsensors bei der Markierungsdetektion sind die Distanz zur Markierung, der Auftreffwinkel zwischen Strahl und Oberfläche sowie die Beschaffenheit der Oberfläche zu nennen. Auf Autobahnen und Bundesstraßen wird die Begrenzung des Fahrstreifens durch weiße – oder im Baustellenbereich auch gelbe – Streifen gekennzeichnet. Dabei werden retroreflektierende Materialien eingesetzt, die die Detektion durch den Lidarsensor unterstützen. Mit den in dieser Arbeit verwendeten Sensoren war so eine im Vergleich zur herkömmlichen Fahrbahn erhöhte Detektionsreichweite von bis zu 30 m möglich. Angaben über die absolute Detektionsreichweite bzw. eine optimale Einbauposition lassen sich jedoch nur in Abhängigkeit von der verwendeten Sensorik, sowie von gesetzlichen Einschränkungen durch die Forderung nach Augensicherheit treffen. Ein Versuchsfahrzeug wurde an seinem Stoßfänger mit zwei Lidarsensoren ausgestattet, die jeweils in sechs vertikal versetzten Ebenen einen horizontalen Bereich von 36° abscannen. Fünf der sechs Ebenen wurden dabei zur Markierungsdetektion auf die Fahrbahn, die sechste zur Erfassung anderer Verkehrsteilnehmer fahrbahnparallel ausgerichtet.

Das im Bereich einer Markierung entstehende Maximum im Rückstrahlsignal einer Lidar-Messebene wurde unter Anwendung einer gradientenbasierten Kantendetektion lokalisiert. Da das Rauschverhalten und damit die Kantendetektion von der Sensorik und dem befahre-

nen Fahrbahnbelag abhängt, wurde die Parametrierung der Kantendetektion auf Basis von Referenzmessungen auf drei stark unterschiedlichen Fahrbahnbelägen durchgeführt. Die Detektion einer Markierung hängt von den retroreflektiven Eigenschaften der Markierung ab. Die Verfügbarkeit der Markierungsdetektion wurde deswegen auf einer Strecke überprüft, auf der nachweislich Markierungen mit Retroreflexionswerten unterhalb der gesetzlich geforderten Richtwerte verlegt waren. Für die gewählte Sensorkonstellation lag die minimale Detektionsreichweite bei ca. 8 m und beschränkte sich damit auf die fahrzeughohen Messebenen. Bei Markierungen mit hohen Retroreflexionswerten weitete sich die Detektion auch auf die dritte und vierte Messebene mit einer minimalen Reichweite von 13 m und Maximalwerten bis 23 m aus. Zwei der fünf zur Markierungsdetektion vorgesehenen Messebenen leisteten jedoch nahezu keinen Beitrag. Hohe Detektionsverluste traten vor allem auf nasser Fahrbahn auf, weswegen in jedem Fall eine herkömmliche Zielauswahl als Rückfallebene vorzusehen ist. Auf Basis der detektierten Markierungspositionen wurde der Verlauf des Fahrstreifens in einem Erweiterten Kalman-Filter geschätzt. Der Fahrstreifenverlauf wurde durch ein Kreismodell beschrieben. Es wurden zwei Filter mit unterschiedlicher Parametrierung parallel betrieben und die Ergebnisse beider Filter in jedem Zeitschritt gewichtet und kombiniert. So kann die Schätzung des Fahrstreifenverlaufs auf eine Krümmungsänderung der Fahrbahn sehr dynamisch reagieren, bleibt jedoch auf einer konstant gekrümmten Fahrbahn wenig verrauscht. Auf einer Fahrbahn mit Landstraßenprofil wurde im Geschwindigkeitsbereich zwischen 10 und 50 km/h ein Vergleich der geschätzten Werte mit parallel ermittelten Ground-Truth-Daten durchgeführt. Dabei blieb der mittlere Fehler in der lateralen Positionsbestimmung des Fahrstreifens in einer Entfernung von 20 m immer unterhalb von 14 cm. Die mittlere Detektionsreichweite lag im Vergleich dazu mit etwa 14 m deutlich darunter. Auf dem nur einseitig gestrichelten Fahrstreifen standen pro Messzyklus im Schnitt 4,2 detektierte Markierungspositionen für die Schätzung zur Verfügung.

Durch gemeinsame Auswertung des geschätzten Fahrstreifenverlaufs und der detektierten Objekte kann eine Fahrstreifenzuordnung eines Objekts auf ausschließlicher Basis von Lidarsensorik durchgeführt werden. Das Potential eines solchen Systems wurde durch Messfahrten im Großraum Stuttgart untersucht, bei denen insgesamt 14,3 h Fahrt im Stop&Go-Verkehr aufgezeichnet wurden. Einscherende Fahrzeuge traten dabei mit einer mittleren Häufigkeit von $12,96 \text{ h}^{-1}$ auf, ausscherende Fahrzeuge mit einer mittleren Häufigkeit von $5,28 \text{ h}^{-1}$. Ein Fahrzeug wurde dabei als Ein- oder Ausscherer gewertet, sobald die Zeitlücke den in der ISO-Norm für ACC-Systeme definierten Maximalwert unterschritt. Als Vergleichssystem für die Fahrstreifenzuordnung diente ein Algorithmus, der in Anlehnung an die herkömmliche Funktionsweise einer radarbasierten Zielauswahl entwickelt und auf die erhobenen Daten optimiert wurde. Bei gleicher Fehldetektionsrate konnten einscherende Fahrzeuge mit Fahrstreifeninformation im Schnitt 0,98 s Sekunden früher erkannt werden als mit einer herkömmlichen Zielauswahl. Bei Ausscherern war dieser Zeitvorteil mit 1,26 s sogar noch größer. Insgesamt bewirkte die zusätzliche Fahrstreifeninformation in 82 % (68 %) aller Einscher-Situationen (Ausscher-Situationen) einen zeitlichen Vorteil und in lediglich 8 % (3 %) der Situationen

einen zeitlichen Nachteil. Sie erhöht somit deutlich die Möglichkeiten eines Längsregelsystems, komfortabel auf ein- und ausscherende Fahrzeuge zu reagieren.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass ein Lidarsensor sowohl die Objekterkennung als auch eine Schätzung des Fahrstreifenverlaufs vor dem Fahrzeug liefern kann. Gerade für eine Anwendung im Stop&Go-Verkehr reichen die erzielbaren Detektionsreichweiten zur kostengünstigen Verbesserung des Systemverhaltens einer Abstandsregelung aus. Als Empfehlung für die Weiterentwicklung lässt sich vor allem eine Optimierung der Sensorik und der darauf aufbauenden Markierungsdetektion identifizieren sowie eine fundierte Analyse des potentiellen Nutzens des entwickelten Systems für querregelnde Assistenzfunktionen anregen.

Anhang

A.1 Koordinatensysteme

Wie in Abbildung A.1 dargestellt, werden in der vorgelegten Arbeit drei unterschiedliche Koordinatensysteme verwendet.

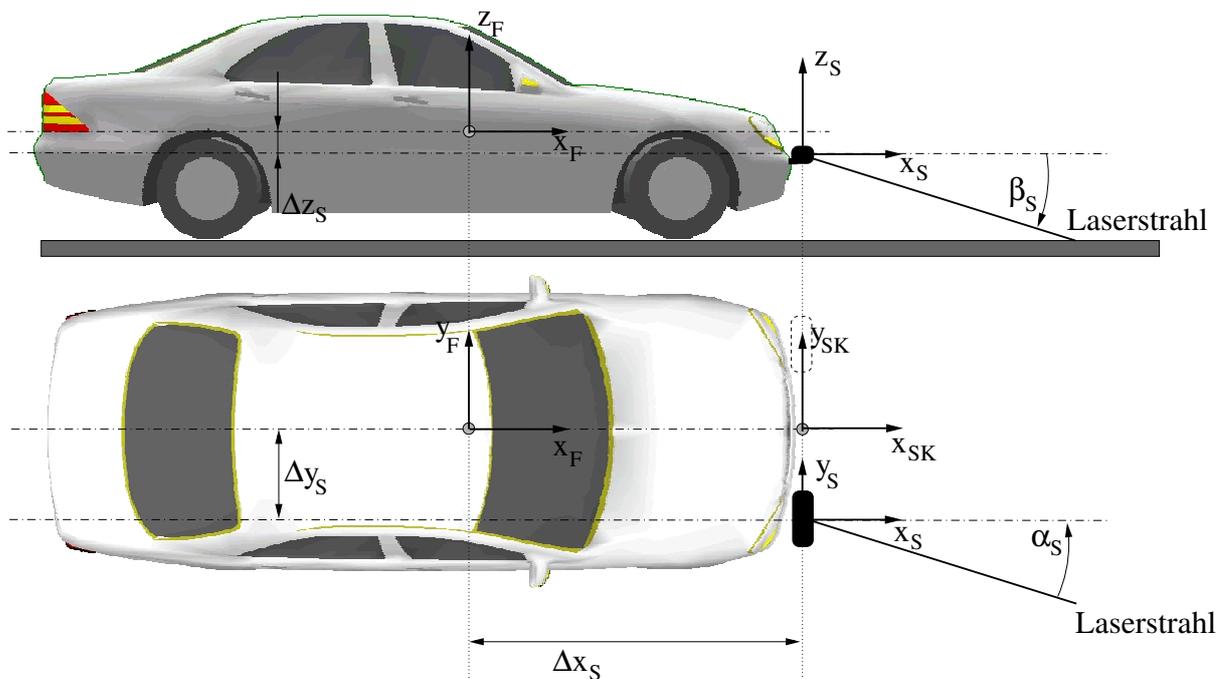


Abbildung A.1: Koordinatensysteme am Versuchsfahrzeug

Das Fahrzeugkoordinatensystem $[x_F, y_F, z_F]$ nach DIN 70000¹ hat seinen Ursprung im Fahrzeugschwerpunkt, das Sensor-Koordinatensystem $[x_S, y_S, z_S]$ im Strahlausgangspunkt des Sensors. Der Ursprung der Sensorkonstellation $[x_{SK}, y_{SK}, z_{SK}]$ liegt im Zentrum der zwei verbauten Sensoren. Die kartesischen Koordinaten eines Messpunktes können im Sensor-Koordinatensystem auf Basis der Distanzmessung d_S sowie der Winkel α_S und β_S ermittelt werden.

$$\begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} = T_{z_S} \cdot T_{y_S} \cdot \begin{pmatrix} d_S \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

¹ISO: Begriffsdefinitionen, 1991, S. 2-3

Die verwendeten Rotationsmatrizen T_{z_S} und T_{y_S} sind gegeben durch

$$T_{z_S} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_S & -\sin \alpha_S & 0 \\ \sin \alpha_S & \cos \alpha_S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$T_{y_S} = \begin{pmatrix} \cos \beta_S & 0 & \sin \beta_S \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_S & 0 & \cos \beta_S \end{pmatrix}. \quad (\text{A.3})$$

Im Sensor-Koordinatensystem ergibt sich

$$\begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_S \cos \beta_S \cos \alpha_S \\ d_S \cos \beta_S \sin \alpha_S \\ -d_S \sin \beta_S \end{pmatrix}. \quad (\text{A.4})$$

Durch weitere Transformation der Sensor-Koordinaten kann ein Messpunkt auf Basis von Gl. (A.4) auch im Koordinatensystem der Sensor-Konstellation

$$\begin{pmatrix} x_{SK} \\ y_{SK} \\ z_{SK} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta y_S \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

sowie im Fahrzeug-Koordinatensystem

$$\begin{pmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x_S \\ \Delta y_S \\ \Delta z_S \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

ausgedrückt werden.

A.2 Vereinfachung der Messgleichung

Gegeben sei die Messgleichung aus Kapitel 4

$$y_F = \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right) \cos(\Delta\psi) \pm$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 \cos^2(\Delta\psi) - \left[x_F^2 + \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 - 2 x_F \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right) \sin(\Delta\psi) - \left(\frac{1}{c} - a b\right)^2 \right]} \quad (\text{A.7})$$

Aufgrund der in Gl. (A.7) vorhandenen Terme $\frac{1}{c}$ ist der Fall $c = 0$ nicht definiert, ein Fall der bei einer Software-Implementierung zu berücksichtigen ist. Aus dem unter der Wurzel stehenden Anteil

$$w = \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 \cos^2(\Delta\psi) - \left[x_F^2 + \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 - 2 x_F \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right) \sin(\Delta\psi) - \left(\frac{1}{c} - a b\right)^2 \right] \quad (\text{A.8})$$

und der Gleichung

$$\cos^2 = 1 - \sin^2 \quad (\text{A.9})$$

ergibt sich

$$w = \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 - \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 \sin^2(\Delta\psi) \quad (\text{A.10})$$

$$- x_{\text{F}}^2 - \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 + 2 x_{\text{F}} \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right) \sin(\Delta\psi) + \left(\frac{1}{c} - a b\right)^2 .$$

Der Ausdruck vereinfacht sich weiter zu

$$w = -\left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right)^2 \sin^2(\Delta\psi) - x_{\text{F}}^2 + 2 x_{\text{F}} \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right) \sin(\Delta\psi) + \left(\frac{1}{c} - a b\right)^2 . \quad (\text{A.11})$$

Eine Anwendung der zweiten binomischen Formel führt auf

$$w = -\left[x_{\text{F}} - \left(\frac{1}{c} + y_{\text{off}}\right) \sin(\Delta\psi) \right]^2 + \left(\frac{1}{c} - a b\right)^2 . \quad (\text{A.12})$$

Durch Einsetzen von Gl. (A.12) in Gl. (A.7) ergibt sich

$$y_{\text{F}} = \frac{1}{c} \left[(1 + c y_{\text{off}}) \cos\Delta\psi \pm \sqrt{(1 - a b c)^2 - \left[c x_{\text{F}} - (1 + c y_{\text{off}}) \sin(\Delta\psi) \right]^2} \right] . \quad (\text{A.13})$$

Die Erweiterung von Gl. (A.13) um den Multiplikator des Terms $\frac{1}{c}$ führt auf

$$y_{\text{F}} = \frac{1}{c} \left[\frac{(1 + c y_{\text{off}})^2 \cos^2(\Delta\psi) - ((1 - a b c)^2 - [c x_{\text{F}} - (1 + c y_{\text{off}}) \sin(\Delta\psi)]^2)}{(1 + c y_{\text{off}}) \cos(\Delta\psi) + \sqrt{(1 - a b c)^2 - [c x_{\text{F}} - (1 + c y_{\text{off}}) \sin(\Delta\psi)]^2}} \right] . \quad (\text{A.14})$$

Durch Ausmultiplizieren des Zählers ergibt sich

$$y_{\text{F}} = \frac{1}{c} \cdot \left[\frac{(1 + c y_{\text{off}})^2 (\cos^2(\Delta\psi) + \sin^2(\Delta\psi)) - (1 - a b c)^2 + c^2 x_{\text{F}}^2 - 2 c x_{\text{F}} (1 + c y_{\text{off}}) \sin(\Delta\psi)}{(1 + c y_{\text{off}}) \cos(\Delta\psi) + \sqrt{(1 - a b c)^2 - [c x_{\text{F}} - (1 + c y_{\text{off}}) \sin(\Delta\psi)]^2}} \right] . \quad (\text{A.15})$$

Weiteres Ausmultiplizieren, Vereinfachen anhand Gl. (A.9) und Teilen durch c resultiert im Endergebnis

$$y_{\text{F}} = \frac{2 y_{\text{off}} + c y_{\text{off}}^2 + 2 a b - c a^2 b^2 + c x_{\text{F}}^2 - 2 x_{\text{F}} (1 + c y_{\text{off}}) \sin(\Delta\psi)}{(1 + c y_{\text{off}}) \cos(\Delta\psi) + \sqrt{(1 - a b c)^2 - [c x_{\text{F}} - (1 + c y_{\text{off}}) \sin(\Delta\psi)]^2}} , \quad (\text{A.16})$$

das von $\frac{1}{c}$ unabhängig ist.

A.3 Bewertung der Fahrstreifenschätzung

Teststrecke

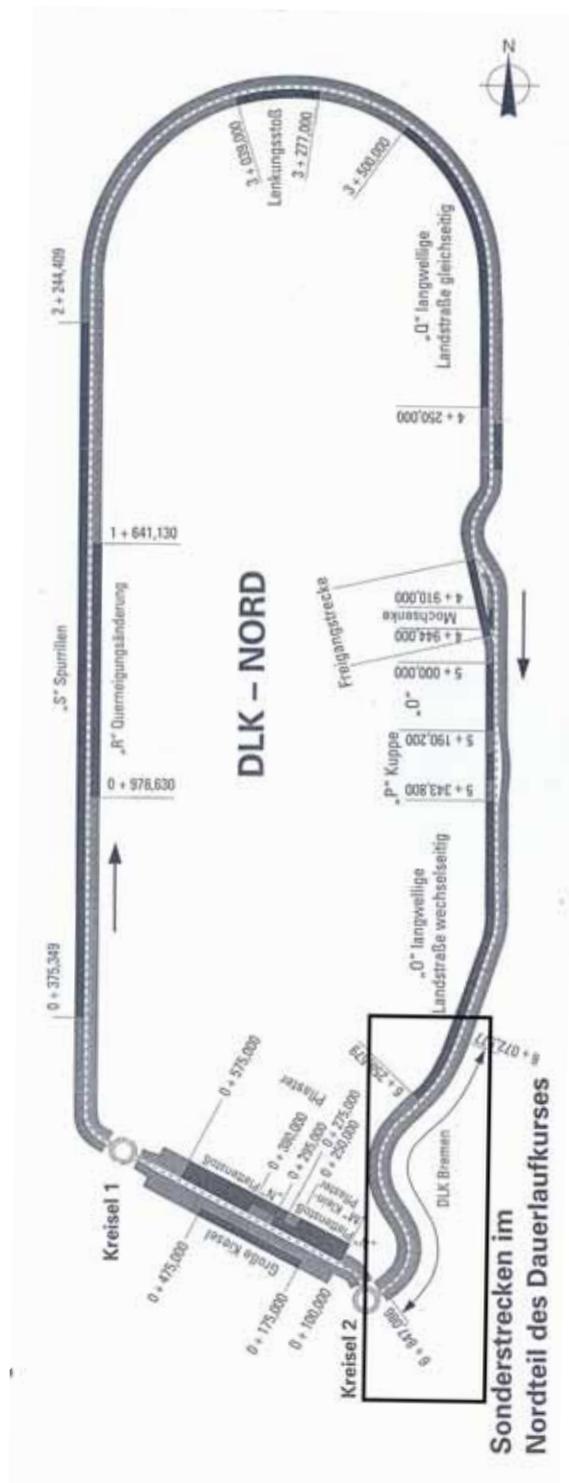


Abbildung A.2: Testabschnitt DLK Nord auf dem Testgelände Papenburg

Messmatrix

Tabelle A.1 stellt die zur Bewertung der Fahrstreifenschätzung durchgeführten Messfahrten zusammen. Neben der Geschwindigkeit und dem längs- bzw. querdynamischen Fahrverhalten sind auch die mittlere Detektionsreichweite \bar{x}_{SK} und die mittlere Anzahl der detektierenden Ebenen eb sowie die jeweils dazugehörige Standardabweichung dargestellt.

Tabelle A.1: Messungen zur Beurteilung der Fahrstreifendetektion

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Geschwindigkeit [km/h]	10	20	30	40	50	30	0 – 50
Fahrverhalten quer	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.	dyn.	konst.
Fahrverhalten längs	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.	dyn.
$\bar{x}_{SK, links}$ [m]	9,03	8,98	9,23	9,14	8,97	8,04	8,37
(σ [m])	(5,10)	(5,16)	(4,98)	(4,86)	(4,88)	(5,80)	(5,24)
$\bar{x}_{SK, rechts}$ [m]	14,32	14,01	14,19	13,77	13,36	12,09	13,87
(σ [m])	(3,93)	(4,31)	(4,73)	(5,03)	(5,25)	(6,19)	(4,90)
eb_{links}	1,37	1,38	1,42	1,39	1,38	1,22	1,22
(σ)	(0,97)	(0,98)	(0,97)	(0,96)	(0,96)	(1,03)	(0,98)
eb_{rechts}	2,98	2,90	2,93	2,77	2,76	2,36	2,75
(σ)	(0,97)	(1,03)	(1,09)	(1,15)	(1,20)	(1,29)	(1,07)

Bestimmung des Abstands Leitplanke – Markierung

Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, mit dem der Abstand einer Markierung zur Leitplanke ermittelt werden kann. Dieser wird direkt zwischen Markierungsaussenkante und Befestigungspfosten der Leitplanke gemessen. Ein Laser-Messgerät² wird hierzu auf der Markierung positioniert und auf den Befestigungspfosten gerichtet (siehe Abbildung A.3). Jeweils zwei Messungen M_1 und M_2 mit einem Abstand auf der Markierung von $d_M = 20$ cm werden durchgeführt. Die Messpunkte werden so gewählt, dass der Punkt auf der Markierung mit der kürzesten Distanz zum Pfosten zwischen ihnen liegt. Aus den beiden Distanzmessungen d_1 und d_2 wird anschließend die kürzeste Distanz d zum Pfosten berechnet³.

²Leica Geosysteme AG: Gebrauchsanweisung, , S. 1ff

³Bronstein, Semendjajew, Musiol, Mühlig: Taschenbuch der Mathematik, 2001, S. 147

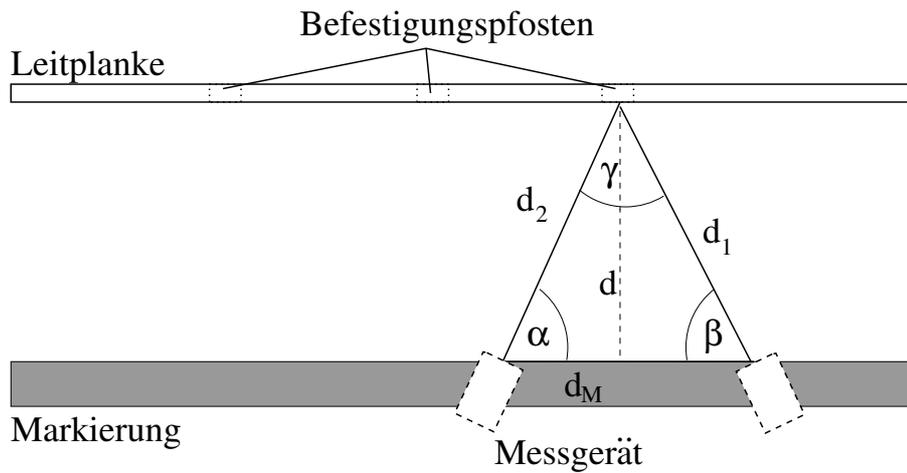


Abbildung A.3: Berechnung des Markierungsabstands

Über den Satz des Pythagoras im schiefwinkligen Dreieck kann zunächst der Winkel γ berechnet werden

$$\gamma = \arccos\left(\frac{d_1^2 + d_2^2 - d_m^2}{2 d_1 d_2}\right). \quad (\text{A.17})$$

Der Winkel α ergibt sich weiter zu

$$\alpha = \arcsin\left[\frac{d_1}{d_M} \sin(\gamma)\right] \quad (\text{A.18})$$

und die Distanz d ergibt sich als Höhe des schiefwinkligen Dreiecks nach

$$d = d_2 \sin(\alpha). \quad (\text{A.19})$$

Literaturverzeichnis

3M Deutschland:

[Vorübergehende Fahrbahnmarkierung, Zugriff 26.01.2006]

Vorübergehende Fahrbahnmarkierung A541 gelb, Zugriff 26.01.2006

<http://cms.3m.com/cms/DE/de/0-152/kFFrzFZ/view.jhtml>.

Adase:

[Adase Roadmap, Zugriff 26.01.2006]

Deliverable D2D Roadmap Development, <http://www.adase2.net>, Zugriff 26.01.2006.

Adiprasito, S.B.:

[Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich, 2004]

Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, 2004.

Aufrere, R.; Chapuis, R.; Chausse, F.:

[To Locate a Vehicle on a Nonstructured Road, 2000]

A Dynamic Vision Algorithm to Locate a Vehicle on a Nonstructured Road, In *The International Journal of Robotics Research*, 2000, S. 411–423.

Bar-Shalom, Y.:

[Tracking and Data Association, 1988]

Tracking and Data Association, In Academic Press INC, New York, 1988.

Baum, D.; Hamann, C.D.; Schubert, E.:

[High Performance ACC, 1996]

High Performance ACC System based on Sensor Fusion with Distance Sensor, Image Processing Unit and Navigation System, In *International Symposium on Advanced Vehicle Control Aachen*, 1996, S. 1380–1391.

Behringer, R.:

[Rechnersehen, 1997]

Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1997.

- Bertozzi, M.; Broggi, A.; Fascioli, A.:
[Vision-based intelligent vehicles, 2000]
Vision-based intelligent vehicles: State of the art and perspectives, In *Robotics and Autonomous Systems 32*, 2000, S. 1–16.
- Bertozzi, M.; Broggi, A.; Fascioli, A.; Tibaldi, A.:
[Detection of Lane Markings, 2002]
An Evolutionary Approach to Lane Markings Detection in Road Environments, In *Atti del 6 Convegno dell'Associazione italiana per l'Intelligenza Artificiale*, 2002, S. 1–9.
- Bertozzi, M.; Broggi, A.; Lasagni, A.; Del Rose, M.:
[Pedestrian Detection, 2005]
Infrared Stereo Vision-based Pedestrian Detection, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2005, S. 23–28.
- Bishop, R.:
[Technology and Trends, 2005]
Intelligent Vehicle Technology and Trends, Artech House, Boston, London, 2005.
- Bold, J.:
[Straßenranderkennung, 2000]
Erweiterung des Systems "Automatische Fahrspurerkennung" um eine Sensorik zur Straßenranderkennung, Diplomarbeit, Berufsakademie Stuttgart, Ausbildungsbereich E-Technik Fachrichtung Automatisierungstechnik, 2000.
- Braess, H.H.; Reichart, G.:
[Prometheus, 1995]
Prometheus: Vision des "intelligenten Automobils" auf "intelligenter Straße"?, *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, 1995, Vol. 97, S. 200–205.
- Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.; Musiol, G.; Mühlig, H.:
[Taschenbuch der Mathematik, 2001]
Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, 2001.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (bast):
[Prüfbericht, Zugriff 26.01.2006]
Prüfbericht Nr.: 98 1A 10.01, Zugriff 26.01.2006.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen:
[Verkehrsbericht 2000, 2000]
Verkehrsbericht 2000, 2000.
- Carsense:
[Carsense, Zugriff 26.01.2006]

Sensing of Car Environment at Low Speed Driving, <http://www.carsense.org>, Zugriff 26.01.2006.

CEN Europäisches Komitee für Normung:

[Anforderungen an Markierungen, 1997]

Europäische Norm EN1436 – Anforderungen an Markierungen auf Strassen, 1997.

Citroen:

[AFIL, Zugriff 10.08.2005]

Lane Departure Warning System LDWS, <http://www.citroen.com/CWW/en-US/TECHNOLOGIES/SECURITY/AFIL>, Zugriff 10.08.2005.

Cramer, H.; Scheunert, U.; Wanielik, G.:

[Modelle zur Umfelderkennung, 2005]

Modelle zur sensorischen Umfeld- und Situationserfassung, In *Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2005, S. 72–79.

Dagli, I.:

[Erkennung von Einscherer-Situationen, 2005]

Erkennung von Einscherer-Situationen für Abstandsregeltempomaten, Dissertation, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Fakultät für Informations- und Kognitionswissenschaften, 2005.

DaimlerChrysler AG:

[Betriebsanleitung S-Klasse, 2005]

Betriebsanleitung S-Klasse, 2005.

Denso Corporation:

[Denso WA-C01, 2003]

Specification Denso WA-C01, 2003.

Dickmanns, E.D.; Zapp, A.:

[Recursive 3-D Road Recognition, 1992]

Recursive 3-D Road and Relative Ego-State Recognition, In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol. 14*, 1992, S. 199–213.

Dorißen, H.T.; Höver, N.:

[Autonome Intelligente Geschwindigkeitsregelung (AICC), 1996]

Autonome Intelligente Geschwindigkeitsregelung (AICC) – Ein Beitrag zur Steigerung des Komforts und der aktiven Fahrsicherheit, *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, 1996, Vol. 98, S. 396–405.

Eisenhardt, M.:

[Datenfusion für zwei Lidar-Sensoren, 2005]

Entwicklung einer Datenfusion für zwei Lidar-Sensoren, Diplomarbeit, Fachhochschule Esslingen, Hochschule für Technik, Fachbereich Informationstechnik, 2005.

Fardi, B.; Scheunert, U.; Cramer, H.; Wanielik, G.:

[Laserbased Lane Detection II, 2003]

Multi Modal Detection and Parameter-Based Tracking of Road Borders with a Laser Scanner, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2003, S. 95–99.

Fastenmeier, W.; Gstalter, H.; Lehnig, U.:

[Spurwechselforgänge, 2001]

Analyse von Spurwechselforgängen im Verkehr, *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 2001, Vol. 1, S. 15–23.

Filzek, B.:

[Abstandsverhalten auf Autobahnen, 2002]

Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, 2002.

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen:

[Anwendung von Fahrbahnmarkierungen, 1980]

Richtlinien für die Markierung von Straßen RMS Teil 2: Anwendung von Fahrbahnmarkierungen RMS-2, 1980.

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen:

[Anlage von Hauptverkehrsstraßen, 1993]

Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen EAHV, 1993.

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen:

[Markierungszeichen, 1993]

Richtlinien für die Markierung von Straßen RMS Teil 1: Abmessungen und geometrische Anordnung von Markierungszeichen, 1993.

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen:

[Anlage von Erschließungsstraßen, 1995]

Empfehlungen für die Anlage von Erschließungsstraßen EAE 85/95, 1995.

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen:

[Linienführung, 1995]

Richtlinien für die Anlage von Straßen RAS Teil: Linienführung RAS-L, 1995.

Franke, U.:

[Real time 3-D Road Recognition, 1992]

Real time 3D-road modeling for autonomous vehicle guidance, In *Selected Papers of the 7th Scandinavian Conference on Image Analysis*, 1992, S. 277–284.

Franke, U.; Joos, A.:

[Real-time Stereo Vision, 2000]

Real-time Stereo Vision for Urban Traffic Scene Understanding, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2000.

Franke, U.; Rabe, C.:

[Depth from Motion, 2005]

Kalman Filter based Depth from Motion with Fast Convergence, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2005, S. 180–185.

Fritz, H.:

[CHAUFFEUR, 1999]

Longitudinal and Lateral Control of Two Electronically Coupled Heavy-Duty Trucks in the CHAUFFEUR Project, In *Processings of the 6th World Congress on Intelligent Transporting Systems*, 1999, S. 1348–1352.

Frost & Sullivan:

[Fahrerassistenzsysteme, Zugriff 30.01.2006]

Fahrerassistenzsysteme machen Autofahren zu einer neuen Erfahrung, <http://www.innovations-report.de/html/berichte/verkehrlogistik/bericht-14876.html>, Zugriff 30.01.2006.

Fürstenberg, K.; Kämpchen, N.; Lages, U.; Dietmayer, K.; Willhoeft, V.:

[Markierungserkennung, 2005]

Verfahren zur Erkennung von Markierungen auf einer Fahrbahn, *Offenlegungsschrift DE 10 2004 003 850 A1*, 2005.

Gavrilla, D.:

[Pedestrian Detection, 2001]

Sensor-Based Pedestrian Detection, In *IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2001, S. 77–81.

Gavrilla, D.; Franke, U.; Wöhler, C.; Görzig, S.:

[Real-time Vision, 2001]

Real-Time Vision for Intelligent Vehicles, In *IEEE Instrumentation and Management Magazine*, 2001, S. 22–27.

Gehrig, S.:

[Vision-Based Vehicle-Following System, 2000]

Design, Simulation, and Implementation of a Vision-Based Vehicle-Following System, Dissertation, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Fakultät für Physik, 2000.

Gelb, A.:

[Applied Optimal Estimation, 1974]

Applied Optimal Estimation, The MIT Press, 1974.

Gern, A.:

[Multisensorielle Spurerkennung, 2005]

Multisensorielle Spurerkennung für Fahrerassistenzsysteme, Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät für Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik, 2005.

GOLD:

[GOLD, Zugriff 30.01.2006]

GOLD: a Parallel Real-Time Stereo Vision System for Generic Obstacle and Lane Detection, <http://vislab.unipr.it/GOLD/>, Zugriff 30.01.2006.

Grewal, M.S.; Andrews, A.P.:

[Kalman Filtering, 2001]

Kalman Filtering Theory and Practice Using Matlab, Canada: Wiley Interscience, 2001.

Hanau, L.:

[Bestimmung der Fahrzeugaufbaubewegung, 2004]

Beurteilung verschiedener Beobachter-Modelle zur Bestimmung von Nick-, Hub- und Wankbewegung in der Simulation, Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, 2004.

Hella KG Hueck & Co.:

[Idis, 2004]

Technical Information Idis, 2004.

Hirsche, E.U.; Tenzinger, B.:

[Inventarisierung von Fahrbahnmarkierungen, 1984]

Inventarisierung und Beurteilung von Fahrbahnmarkierungen im Ausland, Schriftenreihe der deutschen Studiengesellschaft der Hersteller von Markierungsglasperlen (DSGM), Edition 5, 1984.

Hofmann, U.; Rieder, A.; Dickmanns, D.:

[Hybrid ACC, 2003]

Radar and vision data fusion for hybrid adaptive cruise control on highways, In *Machine Vision and Applications*, 2003, S. 1–14.

Honda:

[Honda LKAS, Zugriff 03.06.2006]

LKAS, <http://world.honda.com/factbook/auto/motorshow/200310/10.html>, Zugriff 03.06.2006.

Ibeo:

[ALASCA XT, Zugriff 06.03.2006]

Seven in one blow.... ALASCA XT, The first Multi-Application Sensor for increased safety and comfort on the road, <http://www.ibeo-as.de>, Zugriff 06.03.2006.

Invent:

[Teilprojekt Stauassistent STA, Zugriff 20.01.2006]

Teilprojekt Stauassistent STA, <http://www.invent-online.de>, Zugriff 20.01.2006.

ISO:

[Begriffsdefinitionen, 1991]

Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe, DIN 70000, 1991.

ISO:

[ISO ACC, 2002]

Transport information and control systems – Adaptive Cruise Control systems – Performance requirements and test procedures, ISO/FDIS 15622, 2002.

Iteris:

[Lane Departure Warning System, Zugriff 30.01.2006]

Lane Departure Warning System, http://www.iteris.com/av/av_index.html, Zugriff 30.01.2006.

Jähne, B.:

[Digitale Bildverarbeitung, 2002]

Digitale Bildverarbeitung, Springer-Verlag, 2002.

Kapp, A.; Brugger, D.:

[Miniaturisierter Laserscanner, 2004]

Miniaturisierter Laserscanner zur Umfelderkennung im Fahrzeugbereich, In *VDI/VW-Tagung Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit*, 2004.

Kariya, Aichi:

[Objekt- und Fahrspurerkennung, 2000]

Autoradar zur Erfassung einer Fahrspurmarkierung und eines voraus befindlichen Hindernisses, *Offenlegungsschrift DE 199 54 362 A1*, 2000.

Kasprzak, W.; Niemann, H.; Wetzl, D.:

[Road Parameter Estimation, 1994]

Adaptive Road Parameter Estimation in Monocular Image Sequence, In *The British Machine Vision Conference*, 1994, S. 691–700.

Kirchner, A.:

[Sensordatenverarbeitung eines Laserscanners, 2000]

Sensordatenverarbeitung eines Laserscanners für autonome Fahrfunktionen von Kraftfahrzeugen, Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik, 2000.

Kirchner, A.; Heinrich, T.:

[Detection of road boundaries, 1998]

Model based detection of road boundaries with a laser scanner, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1998, S. 93–98.

Kluge, K.; Lakshmanan, S.:

[Deformable-Template, 1995]

A Deformable-Template Approach to Lane Detection, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1995, S. 54–59.

Koshla, D.:

[Two-Clothoid Road Model, 2002]

Accurate estimation of forward path geometry using two-clothoid road model, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2002.

Kreucher, Ch.; Lakshmanan, S.:

[A Frequency Domain Approach to Lane Detection, 1999]

A Frequency Domain Approach to Lane Detection in Roadway Images, In *International Conference on Image Processing*, 1999.

Kämpchen, N.; Bühler, M.; Dietmayer, K.:

[Fusion of Laserscanner and Video, 2005]

Feature-Level Fusion for Free-Form Object Tracking using Laserscanner and Video, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2005, S. 452–457.

Lages, U.:

[Laser Sensor Technologies, 2004]

Laser Sensor Technologies for Preventive Safety Functions, In *ATA ELn Italy*, 2004.

Lakshmanan, S.; Kaliyaperumal, K.; Kluge, K.:

[LEXLUTHER, 1998]

LEXLUTHER: An Algorithm for Detecting Road and Obstacles in Radar Images, In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 1998, S. 415–420.

Lauffenburger, J.P.; Baujon, J.; Basset, M.; Gissinger, G.L.:

[Das NAICC-Projekt, 2000]

Das NAICC-Projekt: ein Navigationssystem, das durch eine intelligente Steuerung der Fahrgeschwindigkeit unterstuetzt wird, In *SAE Intelligent Vehicle Systems*, 2000, S. 115–122.

Leica Geosysteme AG:

[Gebrauchsanweisung]

DISTOTM Gebrauchsanweisung.

Ma, B.; Lakshmanan, S.; Hero, A. O.:

[Pavement Boundary Detection, 2000]

Pavement Boundary Detection Via Circular Shape Models, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2000, S. 644–649.

Marsden, G.; Brackstone, M.; McDonald, M.:

[Assessment of the stop and go function, 2001]

Assessment of the stop and go function using real driving behaviour, In *ADAS 2001 Conference*, Birmingham, U.K, 2001, S. 1–5.

McDonald, J.B.; Franz, J.; Shorten, R.:

[Hough Transform for Lane Detection, 2001]

Application of the Hough Transform to Lane Detection in Motorway Driving Scenarios, In *The Irish Signals and Systems Conference*, 2001.

Meis, U.; Schneider, R.:

[Bildgebendes Kfz-Radar, 2004]

Bildgebendes Kfz-Radar - Automatische Umgebungsinterpretation, In *VDI-Tagung Sensor und Messsysteme*, 2004, S. 225–232.

Mercedes-Benz:

[Telligent Spurassistent, Zugriff 03.06.2006]

Telligent Spurassistent, <http://mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc-germany-website/de/home-mpc/trucks/home/products/new-trucks/actros/cabs/features/fittings-for-security.0002.0001.html>, Zugriff 03.06.2006.

Meseberg, H.H.; Goerner, E.W.:

[Messung der Retroreflexion, 1984]

Methoden zur Messung der Retroreflexion von Fahrbahnmarkierungen, Schriftenreihe der deutschen Studiengesellschaft der Hersteller von Markierungsglasperlen (DSGM), 1984.

Meseberg, H.H.; Seliger, R.:

[Nachtsichtbarkeit, 1993]

Fahrbahnmarkierungen mit verbesserter Nachtsichtbarkeit bei Nässe, Schriftenreihe der deutschen Studiengesellschaft der Hersteller von Markierungsglasperlen (DSGM), 1993, S. 34–42.

Mitschke, M.:

[Fahrverhalten, 1990]

Dynamik der Kraftfahrzeuge Band C: Fahrverhalten, Springer-Verlag, Berlin, 1990.

MoTiV – Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr:

[Abschlussbericht MoTiV, 2000]

Abstands- und Geschwindigkeitsregelung - Abschlussbericht einer Machbarkeitsstudie zu „ACC im Ballungsraum - ACCiB “, 2000.

Möbus, R.; Kolbe, U.:

[Radartracking, 2005]

Multi-Target Multi-Object Radartracking

Technischer Bericht, DaimlerChrysler AG, 2005.

Naab, K.:

[ACC in Ballungsräumen, 1998]

ACC in Ballungsräumen, In *7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik*, 1998, S. 551–565.

Nahverkehrsgesellschaft Baden Württemberg mbH:

[Blickpunkt Mobilität – Entwicklung, Zugriff 26.01.2006]

Blickpunkt Mobilität – Entwicklung, Zugriff 26.01.2006

<http://www.3-loewen-takt.de/d/1757>.

Nissan:

[Nissan Sedan, Zugriff 26.01.2006]

Nissan Releases Fuga Luxury Sports Sedan, http://press.nissan-global.com/EN/CORPORATE/RELEASE/041_014.html, Zugriff 26.01.2006.

Paetzold, F.; Franke, U.; Seelen, W. v.:

[Lane Recognition in Urban Environment, 2000]

Lane Recognition in Urban Environment using Optimal Control Theory, In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2000.

Parent, M.:

[Automatic Driving, 1994]

Automatic Driving in Stop and Go Traffic, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1994, S. 93–98.

Parent, M.; Daviet, P.; Denis, J.C.; M'Saada, T.:

[Influence of ACC, 1999]

Influence of ACC in Stop&Go Mode on Traffic Flow, In *ITS Intelligent Transportation Systems*, 1999, S. 22–26.

Persson, M.; Botling, M.; Hesslow, E.; Johansson, R.:

[Stop&Go Controller, 1999]

Stop&Go Controller for Adaptive Cruise Control, In *International Conference on Control Applications*, 1999, S. 1692–1697.

Pomerleau, D.; Jochem, T.:

[Automated Vehicle Steering, 1996]

Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering, In *IEEE Expert*, 1996, S. 19–27.

Richert, D.:

[Modellbasierte Stop&Go-Regelung, 2004]

Modellbasierte Stop&Go-Regelung für den INVENT-Stauassistenten, In *VDE-Kongress, Berlin*, 2004.

Risack, R.; Klausmann, P.; Krüger, W.; Enkelmann, W.:

[Robust Lane Recognition, 1998]

Robust lane recognition embedded in a real-time driver assistance system, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1998, S. 35–40.

Ristic, B.; Arulampalam, S.; Gordon, N.:

[Particle Filters, 2004]

Beyond the Kalman-Filter: Particle Filters for Tracking Applications, Artech House, London, 2004.

Robert Bosch GmbH:

[ACC, 2002]

Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC, 2002.

Rongben, W.; Youchun, X.:

[Road Edge Detection, 2002]

A Vision-Based Road Edge Detection Algorithm, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2002.

Sala, G.:

[Urban Drive Control Applications, 1999]

Evaluation Framework and Assessment of Urban Drive Control Applications, In *ITS Intelligent Transportation Systems*, 1999.

Sandkühler, D.; Benmimoun, A.:

[Verkehrssituationserkennung, 2004]

Verkehrssituationserkennung: Entwicklungsmethoden, -werkzeuge und Anwendung, In *VDI-Tagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*, Wolfsburg, 2004.

Schiffmann, J.K.; Widmann, G.R.:

[Radar Tracking, 1998]

Model-Based Scene Tracking Using Radar Sensors For Intelligent Automotive Vehicle Systems, In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 1998, S. 421–426.

Schneider, R.; Wanielik, G.; Wenger, J.:

[Millimeter-Wave Imaging, 1996]

Millimeter-Wave Imaging of Traffic Scenarios, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1996, S. 327–332.

Schraut, M.:

[Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten, 2000]

Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen, Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2000.

Schwarzinger, M.:

[Optische Spurerkennung, 1998]

Optische Spurerkennung

Technischer Bericht, Daimler-Benz AG, 1998.

Shimomura, N.; Fujimoto, N.; Oki, K.; Muro, H.:

[Laser Radar and Vision, 2002]

An Algorithm for Distinguishing the Types of Objects on the Road Using Laser Radar and Vision, In *IEEE Transactions on Intelligent Transportations Systems*, 2002, S. 189–195.

SICK AG:

[Telegramm-Spezifikation, 2002]

Telegramme zur Bedienung/Parametrierung der Lasermesssysteme LMS 2xx, 2002.

Trzebiatowski, M. Smuda von:

[Multihypothesenanalyse, 2003]

Multihypothesenanalyse fahrbahnparalleler Strukturen zur optischen Spurerkennung auf schlecht strukturierten Straßen, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung, 2003.

Southall, B.; Taylor, C.J.:

[Road Shape Estimation, 2001]

Stochastic road shape estimation, In *8th IEEE International Conference on Computer Vision*, 2001.

Sparbert, J.; Dietmayer, K.; Streller, D.:

[Laserbased Lane Detection I, 2001]

Lane Detection and Street Type Classification using Laser Range Images, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2001, S. 454–459.

Toyota:

[Toyota Radar Cruise Control, Zugriff 08.03.2006]

Toyota Adds Low-speed Range to Radar Cruise Control, <http://www.toyotaimportsforum.co.uk/articles>, Zugriff 08.03.2006.

Uhler, W.; Weilkes, M.:

[Systemkonzept eines erweiterten ACC, 2000]

Stop&Go: Systemkonzept und Gesamtfunktionalität eines erweiterten ACC, In *9. Aache-ner Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik*, 2000, S. 567–588.

Volvo:

[Volvo XC90, Zugriff 30.01.2006]

Volvo XC90 – Robust-Eleganter Weggefährte, <http://de.volvocars.ch/Showroom/XC90/>, Zugriff 30.01.2006.

Reyher, A. von; Raab, M.; Winner, H.:

[Advanced Environment Detection, 2004]

Advanced Environment Detection based on Lidar, In *VDI/VW-Tagung Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit*, 2004.

Reyher, A. von; Joos, A.; Winner, H.:

[Lidar-Based Lane Detection, 2005]

A Lidar-Based Approach for Near Range Lane Detecion, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2005, S. 146–151.

Rymon Lipinski, T. von:

[ZTV M02, 2002]

Mehr Verkehrssicherheit auf unseren Straßen durch Fahrbahnmarkierungen: Höhere Qualitätsanforderungen in der neuen ZTV M02, In *VSVI Seminar Berlin-Brandenburg*, 2002.

Wambsganss, H.:

[Lichttechnische Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen, 1996]

Lichttechnische Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen bei Dunkelheit, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrische Energietechnik, 1996.

Wang, Y.; Shen, D.; Teoh, W.K.:

[Catmull-Rom Spline, 1998]

Lane Detection Usin Catmull-Rom Spline, In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1998, S. 51–57.

Watanabe, T.; Kishimoto, N.; Hayafune, K.; Yamada, K.:

[Intelligent Cruise Control, 1995]

Development of an Intelligent Cruise Control System, In *The World Congress on Intelligent Transportation Systems*, 1995, S. 1229–1235.

Weilkes, M.; Baum, D.; Hummel, M.; Sauerbrey, J.:

[Stauassistent, 2002]

Stauassistent: Systemkonzept und Funktionalität, In *VDI-Berichte Nr. 1728*, 2002, S. 329–340.

Weilkes, M.; Bürkle, L.; Rentschler, T.; Scherl, M.:

[Zukünftige Fahrzeugführungsassistenz, 2004]

Zukünftige Fahrzeugführungsassistenz – Kombinierte Längs- und Querführung, In *VDI-Berichte Nr. 1828*, 2004, S. 405–416.

Weinberger, M.:

[ACC-Einfluß auf das Fahrverhalten, 2001]

Der Einfluß von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrverhalten, Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, 2001.

Widmann, G.R.; Daniels, M.K.:

[Lidar vs. Radar, 2000]

Comparison of Lidar-Based and Radar-Based Adaptive Cruise Control Systems, In *Intelligent Vehicle Systems (SP-1538)*, 2000, S. 1–14.

Winner, H.:

[Adaptive Cruise Control, 1999]

Adaptive Cruise Control, Chapter 30 in R. Jurgen (Editor): *Automotive Electronics Handbook*, Mc. Graw-Hill, 1999.

Winner, H.; Urban, W.; Luder, J.; Keller, F.:

[Gierratenkorrektur, 2002]

Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung eines korrigierten Offsetwerts, *Europäische Patentanmeldung EP 1 258 407 A2*, 2002.

Winner, H.:

[ACC-Entwicklung, 2003]

Die lange Entwicklung des ACC, In *Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2003, S. 1–4.

Winner, H.:

[Skriptum Kraftfahrzeuge I, 2003]

Kraftfahrzeuge I – Skriptum zur Vorlesung, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, 2003.

Winner, H.:

[ACC-Tagesform, 2005]

Die Aufklärung des Rätsels der ACC-Tagesform und daraus abgeleitete Schlussfolgerungen für die Entwicklerpraxis, In *Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2005, S. 1–8.

Winner, H.:

[Skriptum Fahrerassistenzsysteme, 2005]

Fahrerassistenzsysteme – Vorlesungsskript Ausgabe SS 2005, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, 2005.

Wolkenstein, P.:

[Der Audi Q7, 2005]

Der neue Audi Q7, *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, 2005, Vol. 107, S. 958–967.

Yamamura, Y.; Tabe, Y.; Kanehira, M.; Murakami, T.:

[ACC with Stop-And-Go Capability, 2001]

Development of an Adaptive Cruise Control System with Stop-and-Go Capability, In Intelligent Vehicle Initiative (IVI): Technology and Navigation Systems, 2001, S. 37–43.

Yi, K.; Hong, J.; Kwon, Y.D.:

[A vehicle control algorithm, 2001]

A vehicle control algorithm for stop-and-go cruise control, In In Proc. of the I MECH E Part D Journal of Automobile Engineering, 2001, S. 1099–1115.

Zhang, W.B.:

[Verfahren zur Straßenerkennung, 1996]

Bereichsbasierte Verfahren zur Straßenerkennung für die autonome Führung von Fahrzeugen, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1996.