

Dirk Tellmann

# Hardware-in-the-Loop-gestützte Entwicklungsplattform für Fahrerassistenzsysteme

Modelle der Umfeldsensorik und angepasste Fahrermodelle

Dirk Tellmann

Hardware-in-the-Loop-gestützte Entwicklungsplattform  
für Fahrerassistenzsysteme –

Modelle der Umfeldsensorik und angepasste Fahrermodelle

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Elektrotechnik / Informatik der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias

Tag der mündlichen Prüfung

9. Dezember 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2011

ISBN print: 978-3-86219-266-3

ISBN online: 978-3-86219-267-0

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-32675>

© 2012, [kassel university press GmbH, Kassel](http://www.uni-kassel.de/upress)

[www.uni-kassel.de/upress](http://www.uni-kassel.de/upress)

Printed in Germany

---

## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Kassel.

Ich danke Herrn Prof. Theuerkauf, dem Leiter des Instituts für Elektrische Energie-technik und Antriebstechnik für die Initiierung und anfängliche Betreuung der Arbeit. Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Dr. Ayeb für die kompetente Projektleitung des Forschungsprojektes bedanken, in dessen Umfeld diese Arbeit stattgefunden hat.

Nach der Besetzung des Fachgebietes Fahrzeugsysteme und Grundlagen der Elektrotechnik durch Herrn Prof. Brabetz wurde die Arbeit durch ihn weiter betreut. Ihm danke ich für das Interesse die Arbeit zu einem guten Abschluss zu bringen und für die Übernahme des Erstgutachtens. Herrn Prof. Zacharias danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Außerordentlich möchte ich an dieser Stelle noch einmal die besonders gute Zusammenarbeit mit meinen Kollegen Dr. Christian Schmidt und Dr. Carsten Schmidt hervorheben, die zu einem guten Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ebenfalls danke ich den Studenten, die in den Projekten mitgewirkt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben. Meiner Frau danke ich für das Verständnis und die Rücksichtnahme während der Entstehung dieser Arbeit.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Bildverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Fahrerassistenzsysteme . . . . .	3
1.2 Abstandsregeltempomat . . . . .	4
1.3 Spurhalteassistent . . . . .	5
1.4 Spurwechselassistent . . . . .	5
1.5 Weitere Systeme . . . . .	5
1.6 Sensoren . . . . .	6
1.6.1 Radar . . . . .	6
1.6.2 Infrarotlaser . . . . .	7
1.6.3 Ultraschall . . . . .	7
1.6.4 Video . . . . .	7
1.6.5 Weitere Sensoren . . . . .	8
1.6.6 Sensordatenverarbeitung . . . . .	8
<b>2 Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen</b>	<b>9</b>
2.1 Testverfahren . . . . .	9
2.2 Erprobung . . . . .	11
2.3 Simulationsumgebungen . . . . .	12
2.4 Das DECOS-Projekt . . . . .	13
2.4.1 Aufbau der Simulationsumgebung . . . . .	14
<b>3 Sensormodelle</b>	<b>17</b>
3.1 Koordinatensysteme . . . . .	18
3.2 Geometrischer Ansatz . . . . .	20
3.3 Reflexion . . . . .	24
3.3.1 Diffuse Reflexion . . . . .	25
3.3.2 Spekulare Reflexion . . . . .	27
3.4 Laserscanner . . . . .	29
3.4.1 Simulationsergebnisse . . . . .	31

3.5	Radarsensor . . . . .	34
3.5.1	Reflexion . . . . .	34
3.5.2	Antennendiagramm . . . . .	38
3.5.3	Objekterfassung . . . . .	41
3.6	Ultraschallsensor . . . . .	45
3.7	Kamera . . . . .	48
3.7.1	OpenGL . . . . .	48
3.7.2	Vereinfachtes Kameramodell . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Sensordatenverarbeitung</b>	<b>51</b>
4.1	Zielverfolgung . . . . .	52
4.2	Modelle . . . . .	53
4.2.1	Dynamikmodelle . . . . .	54
4.2.2	Sensormodelle . . . . .	56
4.3	Modellbasierte Filter . . . . .	58
4.3.1	Kalmanfilter . . . . .	59
4.3.2	Erweitertes Kalmanfilter . . . . .	62
4.4	Zielauswahl . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Fahrermodelle</b>	<b>66</b>
5.1	Makroskopische Betrachtung . . . . .	67
5.1.1	Beispiel: Nagel-Schreckenberg-Modell . . . . .	68
5.2	Mikroskopische Betrachtung . . . . .	70
5.3	Fahrzeugmodell . . . . .	72
5.3.1	Querdynamik . . . . .	72
5.3.2	Längsdynamik . . . . .	74
5.4	Wahrnehmung . . . . .	75
5.5	Folgeverhalten . . . . .	77
5.6	Spurhalteverhalten . . . . .	79
5.7	Überholverhalten . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Anwendung</b>	<b>85</b>
6.1	Implementierung der Simulationsumgebung . . . . .	85
6.1.1	SiL-Simulation . . . . .	86
6.1.2	HiL-Simulation . . . . .	87
6.2	Implementierung der DECOS-Funktionen . . . . .	88
6.3	Test von FAS . . . . .	89
6.3.1	Abstandsregeltempomat, ACC . . . . .	90
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>95</b>
<b>Literatur</b>		<b>97</b>

## Bildverzeichnis

2.1	V-Modell	10
2.2	Struktur der Simulationsumgebung	15
3.1	Anordnung der umfelderfassenden Sensoren	17
3.2	Ausrichtung der umfelderfassenden Sensoren	18
3.3	Darstellung eines Fahrzeugs	20
3.4	Schnitt zwischen Sensorstrahl und Dreieck	21
3.5	Schnitt mit begrenzender Kugel	23
3.6	Vergleich zwischen 2 begrenzenden Kugeln	24
3.7	Abdeckung mehrerer Objekte	25
3.8	Mikroskopische Ansicht der diffusen Reflexion	26
3.9	Diffuse Reflexion an Oberflächen	26
3.10	Spiegelnde Reflexion an Oberflächen	27
3.11	Prinzip des Retroreflektors	29
3.12	Erfassungsbereich des Laserscanners	30
3.13	Reflektierte Intensität eines Laserstrahls	32
3.14	Messergebnisse eines Laserscanners aus [30]	32
3.15	Konturen eines erfassten Objekts aus der Simulation	33
3.16	Konturen eines erfassten Objekts in der Simulationsumgebung	33
3.17	Erfassungsbereich des Radarsensors	37
3.18	Radardaten in der Simulationsumgebung	39
3.19	Antennendiagramm eines Radarsensors	40
3.20	Approximation des Antennendiagramms eines Radarsensors, Winkel $\alpha_2$ in rad.	40
3.21	Frequenzmodulation	42
3.22	Radarspektrum	42
3.23	Objekterkennung	44
3.24	Radarmesswerte für Abstand und Geschwindigkeit	45
3.25	Feld des Ultraschallsensors	46
3.26	Sendeküste des Ultraschallsensors	47
3.27	Visualisierung des Straßenverlaufs und Spurerkennung	49
3.28	Spurerkennung	50
4.1	Struktur der Objekterkennung und Verfolgung	51

4.2	Fensterfunktionen zur Objektverfolgung . . . . .	53
4.3	Zustandsraumdarstellung eines dynamischen Systems . . . . .	54
4.4	Erfassung von Abstand und Geschwindigkeit per Radar . . . . .	56
4.5	Erfassung von Objekten per Laser . . . . .	58
4.6	Aufbau des Kalmanfilters . . . . .	61
4.7	Vergleich gemessener und gefilterter Abstand . . . . .	62
4.8	Ermittlung des Abstands eines Hindernisses zur Trajektorie . . . . .	64
4.9	Ermittlung des Abstands eines Hindernisses zur Trajektorie . . . . .	65
5.1	Fahrermodelle . . . . .	67
5.2	Wellen im dichten Verkehr . . . . .	68
5.3	Fundamentaldiagramm . . . . .	69
5.4	Einspurmodell . . . . .	72
5.5	Modellierung der Längsdynamik . . . . .	75
5.6	Wahrnehmung von Relativbewegungen . . . . .	75
5.7	Zustandsdiagramm für das Folgemodell nach [4] . . . . .	78
5.8	Trajektorie während einer Folgefahrt . . . . .	80
5.9	Spurregelung des Fahrermodells . . . . .	80
5.10	Lenkwinkelverlauf während eines Spurwechsels . . . . .	81
5.11	Situation im Fahrerumfeld . . . . .	82
5.12	Erweiterung des Folgemodells nach Wiedemann . . . . .	82
6.1	Struktur der Sensorauswertung . . . . .	86
6.2	Struktur der SiL-Umgebung . . . . .	87
6.3	Struktur der HiL-Umgebung . . . . .	88
6.4	Prüfstand mit HiL, DECOS-Hardware und Scheinwerfer . . . . .	88
6.5	Rechencluster mit Flexrayschnittstelle . . . . .	89
6.6	Partitionierung der Assistenzsysteme . . . . .	90
6.7	Synchronisieren eines redundantes ACC . . . . .	91
6.8	Ausfall zweier ACC-Versionen . . . . .	92
6.9	Auffahrsituation $v = 50\text{km/h}$ , rechts: vergrößerter Ausschnitt . . . . .	92
6.10	Auffahrsituation $v = 100\text{km/h}$ , rechts: vergrößerter Ausschnitt . . . . .	93
6.11	Auffahrsituation, Kreisfahrt $v = 50\text{km/h}$ . . . . .	94
6.12	Auffahrsituation . . . . .	94

## Tabellenverzeichnis

3.1	Eigenschaften eines Laserscanners . . . . .	29
3.2	Eigenschaften eines Radarsensors . . . . .	34
3.3	Eigenschaften eines Ultraschallsensors . . . . .	45
3.4	Eigenschaften einer Videokamera . . . . .	48



## Kurzfassung

Moderne Kraftfahrzeuge werden zunehmend mit Systemen zur Unterstützung des Fahrers ausgerüstet. Diese neuen Funktionen werden in Form von Elektronik bzw. Software auf verschiedenen Steuergeräten implementiert. Zum Test dieser neuartigen Fahrerassistenzsysteme sind immer aufwändigere Testszenarien notwendig, um die Funktionalität in allen Verkehrssituationen sicherzustellen. Aus diesem Grund ist im Rahmen des europäischen Projektes DECOS die Idee entstanden, eine Simulationsumgebung für die gesamte Fahrzeugumgebung zu schaffen. Im Rahmen von drei Dissertationen entstanden Modelle einer virtuellen Umwelt, in der ein Testfahrzeug, ausgerüstet mit neuen Assistenzsystemen, zusammen mit anderen Fahrzeugen fahren kann. In dieser Arbeit werden Modelle zur Simulation der umfelderfassenden Sensorik des Testfahrzeuges und des Verhaltens von Fahrern im Straßenverkehr beschrieben.

Die erstellten Sensormodelle bilden zum Einen strahlenbasierte Systeme nach, wie Radar, Laser oder Ultraschall und zum Anderen bildauswertende Systeme zur Erfassung der Straße und von Verkehrsobjekten. Dazu werden die Sensoren auf einem simulierten Testfahrzeug durch eine virtuelle Umwelt bewegt. In der Umwelt befinden sich die Straße und weitere Fahrzeuge, die von den Sensoren erfasst werden. Die Sensordaten werden anschließend ausgewertet und in eine Form gebracht, die der Signalform realer Sensoren entspricht. Zur Anbindung eines Fahrerassistenzsystems werden die Daten der Sensoren mithilfe aktueller Verfahren wie dem Kalmanfilter und nichtlinearer Filter aufbereitet. Anschließend erfolgt eine Auswertung zur Ermittlung der relevanten Zieldaten, die über externe Schnittstellen dem zu prüfenden Echtteil, z.B. einem Steuergerät, zur Verfügung gestellt werden.

Die entwickelten Fahrermodelle sollen im Verkehr realistische Fahrmanöver durch-

führen und so das zu testende Fahrerassistenzsystem anregen. Das Ziel der Fahrer ist es, sich mit Wunschgeschwindigkeit fortzubewegen und sichere Abstände zu den übrigen Verkehrsteilnehmern zu halten. Dazu sind in den Modellen Regeln zum Folgeverhalten und für Überholvorgänge implementiert worden, so dass um das Testfahrzeug ein natürlicher Verkehrsfluss entsteht. Die Fahrer sind so in der Lage ein Fahrzeug, das durch ein Fahrdynamikmodell beschrieben wird, autonom durch den Verkehr zu steuern.

Zur Validierung der neuartigen Fahrerassistenzsysteme erfolgte eine Implementierung der Simulationsumgebung auf einem „Hardware in the Loop“-Simulator. Über physikalische Schnittstellen, wie dem CAN-Bus, wurde das Echteil, in Form eines Prototypen, an das virtuelle Fahrzeug und die Sensormodelle angeschlossen.

# 1 Einleitung

Die Anforderungen an einen PKW-Fahrer im Verkehr haben sich in den letzten Jahrzehnten stark verändert. In früheren Zeiten lag das primäre Ziel eines Fahrers darin, sein Fahrzeug sicher auf der Straße zu führen und die Stabilität durch geeignetes Verhalten sicherzustellen. Aufgrund der steigenden technischen Ausstattung eines Serienfahrzeugs, wie dem Anti-Blockiersystem (ABS) oder einem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP), wird der Fahrer zunehmend von dieser Aufgabe entkoppelt und ihm ein sichereres Fahren, auch im Grenzbereich, ermöglicht. Moderne Kraftfahrzeuge werden zunehmend mit Technologien zur Unterstützung des Fahrers und zur teilweise autonomen Fahrzeugführung ausgerüstet. Der Fahrer soll durch diese Systeme entlastet werden, indem das Fahrzeug und der umgebende Verkehr durch Sensoren überwacht und analysiert werden und ein Fahrerassistenzsystem (FAS) in die Fahrzeugführung eingreift. Auch im konstruktiven Bereich des Fahrzeugbaus hat es weitreichende Entwicklungen gegeben. Das Fahrzeug hat sich von einem rein funktionalen System zu einem integrierten Sicherheitssystem entwickelt. Ausgestattet mit Knautschzone, Sicherheitszelle und Airbags, bietet es dem Fahrer im Falle eines Unfalls maximalen Schutz.

Aktuelle Statistiken [1] belegen die Auswirkungen der technischen Sicherungssysteme im Kraftfahrzeug. Im Jahr 1970 wurden in Deutschland noch über 21000 Menschen im Straßenverkehr getötet. Diese Zahl ging bis zum Jahr 2005 um ca. 75% auf 5361 zurück, während sich in dieser Zeit die Fahrleistung und KFZ-Bestand ungefähr verdreifacht haben. In Zuge dieses positiven Trends verfolgt das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) das Ziel die Zahl der Unfälle weiter zu reduzieren und hat sich zum Ziel gesetzt, neben anderen Maßnahmen, auch die Forschung und Entwicklung im Bereich der Fahrerassistenzsysteme zu fördern.

Entgegen dieses positiven Trends ist leider zu bemerken, dass die Zahl der Unfälle, die durch zu geringe Abstände oder Missachtung von Vorfahrt und Vorrang entstehen, in den letzten Jahren gleich geblieben ist, bzw. leicht zugenommen hat. Als Ursachen hierfür kommen das Fehlverhalten der Fahrer in Betracht, sowie die immer stärkere Motorisierung der Kraftfahrzeuge und die steigende Verkehrsdichte, die zu einer erhöhten Dynamik im Verkehrsfluss führen. Die Fahrzeugführung und die Analyse und Bewertung von Verkehrssituationen werden für den Fahrer zu einer anspruchsvollerlen Aufgabe, siehe z.B. [5] und [6].

Aus Statistiken [2] ergeben sich für Verkehrsunfälle, die durch Fehlverhalten des Fahrers entstehen, zum Großteil die folgenden Ursachen:

- Zu hohe Geschwindigkeit (13%)
- Zu geringer Abstand (9%)
- Verletzung der Vorfahrt oder des Vorrangs (11%)
- Fehlverhalten beim Abbiegen (6%)

Diese Ursachen belegen eine große „Fehlerneigung“ des Menschen und es werden durch Fahrerassistenzsysteme Beiträge erwartet, um die angestrebte Halbierung der Zahl der Verkehrstoten bis zum Jahr 2010 [1] zu erreichen. Seit einigen Jahren gibt es viele Projekte die sich mit der Steigerung der Sicherheit durch weitere technische Maßnahmen befassen. Hier folgen zwei Beispiele.

**Invent:** Dieses Projekt entwickelt neue Technologien, um Unfälle zu vermeiden und Staus zu reduzieren. 23 Unternehmen aus der Automobil-, der Zulieferindustrie und anderen Branchen arbeiten an Lösungen im Bereich der Fahrerassistenz, dem Verkehrsmanagement und der Logistik.

**eSafety:** In dieser Initiative sollen Strategien zur Forschung und Entwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologien zur Erhöhung der Sicherheit auf europäischen Straßen vorgeschlagen werden.

An diesen beiden Beispielen ist zu erkennen, dass prinzipiell zwei Ansätze verfolgt werden, den Verkehr weiter zu sichern und zu stabilisieren. Zum Einen können makroskopische Maßnahmen getroffen werden, indem der Verkehr in seiner

Gesamtheit gesteuert wird und durch eine erhöhte Kommunikation eine Beeinflussung des Verkehrsflusses erreicht wird. Andererseits sollen die einzelnen Fahrzeuge im Verkehr, durch zunehmende technische Ausstattung, ihre Umgebung erfassen und durch geeignete Fahrerassistenzsysteme die Sicherheit steigern.

## 1.1 Fahrerassistenzsysteme

Zu den Fahrerassistenzsystemen im Kraftfahrzeug zählen im Allgemeinen alle technischen Einrichtungen, die den Fahrer in der Fahrzeugführung unterstützen. Dies beinhaltet Systeme zur Überwachung des dynamischen Zustands, die im Fall von Gefahr warnen, oder aktiv eingreifen, wie das ESP.

Weiterführende Systeme zur unterstützenden oder autonomen Fahrzeugführung sind in der Lage die Umgebung zu erfassen und so neben fahrzeugeigenen Daten auch Informationen des umgebenden Verkehrs zu nutzen.

Die zunehmende Komplexität solcher Systeme erfordert in der Entwicklung und im Versuch umfangreiche Testmethoden, die es dem Entwickler ermöglichen einzelne Komponenten und das Gesamtsystem hinreichend zu testen. Die Simulation spielt in diesem Bereich eine immer größere Rolle.

Im Folgenden wird das Funktionsprinzip der Assistenzsysteme vorgestellt, die im Projekt untersucht wurden. Dabei kann im Prinzip zwischen unfallvermeidendem Funktionen (CWA: Collision Warning and Avoidance) und Systemen zur Steigerung des Fahrkomforts (DAS: Driver Assistance Systems) unterschieden werden.

In den folgenden Fällen soll durch Assistenzsysteme eine Unterstützung des Fahrers erfolgen.

**Kritische Situationen:** Das System erkennt eine kritische Verkehrssituation frühzeitig und ermöglicht durch ein Warnsignal oder ein selbstständiges Eingreifen in die Fahrzeugsteuerung die Verhinderung eines Unfalls oder zumindest die Reduzierung von Unfall- und Personenschäden.

**Komplexe Verkehrssituationen:** Durch eine umfangreiche Ausrüstung des Fahrzeugs mit Sensoren wird die Umgebung im Verkehr erfasst und analysiert. Der Fahrer wird durch die gewonnenen Informationen unterstützt und im Falle eines Fehlverhaltens gewarnt oder durch einen Eingriff daran gehindert.

**Routinesituationen:** Wiederkehrende und andauernde Tätigkeiten während der Fahrt werden durch ein System überwacht oder übernommen, um Unfälle durch Ermüdung oder Ablenkung zu vermeiden.

In [8] werden aktuelle Forschungsprojekte zum Thema neue Assistenzsysteme vorgestellt.

## 1.2 Abstandsregeltempomat

Der Abstandsregeltempomat ist, wie der Name bereits vermuten lässt, eine Weiterentwicklung der normalen Tempomatfunktion, die schon lange ihren Einzug in Fahrzeugen der Ober- und Mittelklasse gehalten hat. Mittlerweile hat sich in der Automobilindustrie die Abkürzung ACC (adaptive-cruise-control) etabliert. Mit Hilfe eines Sensors, der die vorausfahrenden Fahrzeuge erfasst, werden die Geschwindigkeit und der Abstand ermittelt und die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs dementsprechend angepasst. Eines der ersten Systeme wurde 1998 von Mercedes-Benz unter dem Namen „Distronic“ auf den Markt gebracht. Danach folgten weitere Hersteller, wie Nissan, BMW und später auch Volkswagen.

Als Messsystem werden sowohl Radarsensoren (Radio Detection and Ranging) eingesetzt, als auch Laserscanner (Lidar, Light Detection and Ranging) im Infrarotbereich. Der Eingriff in die Längsführung erfolgt über eine Momentenvorgabe an das Motorsteuergerät und einen Bremseingriff. Systeme der ersten Generation arbeiten in einem Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 180 km/h und greifen in die Fahrzeugbeschleunigung mit einem Höchstwert von ca. 1/3 der maximalen Beschleunigung ein. Die Fahrzeugsteuerung besteht aus einer trajektorienbasierten Regelung, die abstandsabhängig zwischen verschiedenen Folgestrategien wie Annähern, Folgen oder Geschwindigkeitsregelung umschaltet. Zur genaueren Beschreibung siehe z.B. [7].

Die zweite Generation des ACC beinhaltet zusätzlich die sog. „follow to stop“-Funktion und ist in der Lage, das Fahrzeug bis zum Stillstand herunter zu bremsen und auch automatisch wieder anzufahren. Weitere Systeme, die sich in der Entwicklung befinden, bzw. bereits in Serienfahrzeugen angeboten werden, sind Funktionen zur Unterstützung einer Notbremsung. Dazu wird im Falle einer bevorstehenden Kollision bereits der Bremsdruck aufgebaut, bevor der Fahrer reagiert.

### **1.3 Spurhalteassistent**

Der Spurhalteassistent unterstützt den Fahrer in der Querführung des Fahrzeugs, indem die vorausliegende Fahrspur erfasst wird und im Falle eines Verlassens der Spur eine Warnung generiert wird oder ein Lenkeingriff erfolgt. In der Fahrzeugindustrie werden solche Systeme als „lane-departure-warning“ (LDW), „heading-control“ oder „lane-keeping-support“ bezeichnet. Die Fahrspur wird durch optische Verfahren erfasst, entweder durch eine Kamera oder Infrarotsensoren, die unter dem Fahrzeug angebracht sind. Der Eingriff in die Fahrzeugführung erfolgt über einen elektrischen Antrieb, der mit der Lenksäule verbunden ist.

### **1.4 Spurwechselassistent**

Im Gegensatz zum Spurhalteassistenten soll der Spurwechselassistent den Fahrer während eines Spurwechsels unterstützen. Dazu werden die Nachbarspuren des Fahrzeugs mit Radarsensoren, Kameras oder Laserscannern überwacht und im Falle einer drohenden Kollision eine Warnung generiert. Eine Weiterentwicklung stellt die Spurwechselunterstützung („lane-change-support“) dar, die einen gewünschten Spurwechsel automatisch durchführt.

### **1.5 Weitere Systeme**

Zusätzlich zu den vorgestellten Systemen wird in der Forschung und Entwicklung an vielen weiteren Projekten gearbeitet, die auf eine zunehmende autonome Fahr-

zeugführung abzielen siehe z.B. [8]. Als Beispiel seien hier der Einparkassistent, Systeme zur Verkehrszeichenerkennung oder Funktionen zur Unterstützung der Rückwärtsfahrt mit einem Anhänger genannt.

## 1.6 Sensoren

Soll ein Fahrzeug in der Lage sein mit Hilfe eines Assistenzsystems teilautonom auf der Straße zu navigieren, ist es auf zuverlässige Umgebungsdaten angewiesen. Die Entwicklung solcher Sensorsysteme hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht und so können in heutigen Fahrzeugen hochwertige Sensoren verbaut werden, die vor kurzem noch untragbare Kosten verursacht hätten.

Im Folgenden werden die Messprinzipien vorgestellt, die in dieser Arbeit untersucht und modelliert werden. Eine genaue Beschreibung erfolgt in Kapitel 3.

### 1.6.1 Radar

Die ersten Messsysteme, die in Fahrzeugen zur Erfassung des Fremdverkehrs eingesetzt wurden, basierten auf dem Radarprinzip. Die Idee ein Kraftfahrzeug mit einem Radar auszurüsten, um den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu messen, kam bereits in den fünfziger Jahren auf. Einer der ersten Prototypen war der „Cadillac Cyclone“ aus dem Jahr 1959, der in der Lage war Hindernisse zu erkennen und den Fahrer akustisch und optisch zu warnen. Da die Sensoren noch auf Röhrentechnologie basierten und eine Signalauswertung aufgrund fehlender Rechenleistung sehr schwierig war, dauerte es noch sehr lange bis die ersten kommerziell ausgerichteten Entwicklungen begannen.

Heutige Radarsensoren bestehen aus planaren Antennen, die kostengünstig aus einem Wafer gefertigt werden können. Die Frequenzbereiche in denen die Radarantennen senden und empfangen sind gesetzlich festgelegt. Die Sensoren für den Fernbereich senden im Bereich von 76-77 GHz und werden gemeinhin als „long range radar“ (LRR) bezeichnet.

Ihre Reichweite kann bis zu 200 m betragen, allerdings ist der Öffnungswinkel des Erfassungsbereichs sehr schmal. Die ausgestrahlte Leistung wird gebündelt, um

von erfassten Objekten Signale in ausreichender Stärke zu erhalten. Um diese Einschränkung auszugleichen wird heutzutage mit mehreren Sendekeulen gearbeitet. Sensoren für den Nahbereich, sog. „short range radar“ (SRR), arbeiten aufgrund kostengünstiger Fertigung im 24-GHz-Band. Allerdings soll ab dem Jahr 2013 in das 79-GHz-Band gewechselt werden. Aufgrund ihrer geringeren Reichweite weist ihr Erfassungsbereich einen größeren Öffnungswinkel auf. Die Sensoren werden für gewöhnlich in der Stoßstange montiert.

### **1.6.2 Infrarotlaser**

Da Assistenzsysteme mittlerweile auch zunehmend im Mittelklassensegment eingesetzt werden sollen, besteht ein Bedarf nach kostengünstigen Alternativen zum Radarsensor. Hier bieten sich Laserscanner an, die aufgrund ihres einfachen Aufbaus günstig hergestellt werden können. Es handelt sich hierbei um Infrarotsensoren, die mit Hilfe eines bewegten Strahles die Umgebung abtasten. Der Strahl wird hierbei über rotierende Spiegel oder Piezoaktoren bewegt. Die Reichweite kann ebenfalls bis zu 200 m betragen. Die Sensoren werden in der Stoßstange oder hinter der Windschutzscheibe verbaut.

### **1.6.3 Ultraschall**

Ultraschallsensoren werden im Nahbereich eingesetzt, um die direkte Umgebung des Fahrzeugs zu erfassen. Es werden Ultraschallimpulse auf einer Frequenz von ca. 40 kHz ausgestrahlt, die von umgebenden Objekten reflektiert werden. Prinzipbedingt ist die Reichweite auf wenige Meter begrenzt.

### **1.6.4 Video**

Die bisher vorgestellten Sensorsysteme basieren auf einer Abtastung der Umgebung durch elektromagnetische oder auch „akustische“ Wellen und liefern dadurch nur eingeschränkte Informationen über die Umgebung. Zur Auswertung komplexerer Verkehrssituationen und optischer Informationen sind Bilddaten der Umwelt notwendig, die mit Algorithmen zur Bildauswertung analysiert werden.

Aufgrund der beschränkten Auflösung der Bildsensoren kann von einer ungefähren Reichweite von 60 m ausgegangen werden in denen Objekte erkannt werden. Die Videokameras sind meistens hinter der Windschutzscheibe positioniert. Es besteht die Möglichkeit eine Kamera zur Auswerfung von Verkehrssituationen einzusetzen. Mit zwei stereoskopischen Kameras können erweiterte Tiefeninformationen gewonnen werden.

### **1.6.5 Weitere Sensoren**

Für die automatische Führung eines Kraftfahrzeuges sind des Weiteren Informationen über den Zustand des Eigenfahrzeugs notwendig. Dazu werden die translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen erfasst und zusätzliche Größen wie z.B. der Lenkwinkel oder Motorsignale.

### **1.6.6 Sensordatenverarbeitung**

Die Verarbeitung von Sensordaten geschieht mit Hilfe modellbasierter Filter zur Verbesserung der Signale. In Kapitel 4 wird eine Anwendung dieser Filtermethoden dargestellt.

Werden in einem Kraftfahrzeug mehrere Sensoren zur Wahrnehmung des Umfelds eingesetzt ist es notwendig, die verschiedenen Sensordaten zu einem konsistenten Abbild der Umgebung zu verarbeiten. Diese Verfahren sind unter dem Begriff „Sensordatenfusion“ bekannt und Thema zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

## 2 Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen

Die Entwicklung und der Test von Fahrerassistenzsystemen werden heutzutage gemäß des V-Modells durchgeführt.

Es handelt sich dabei um ein Stufenmodell, in dem zuerst die Anforderungen gemäß Lastenheft an das zu entwickelnde System festgelegt werden. Anschließend erfolgt die Spezifikation der Architektur des Gesamtsystems. Sie wird in Form eines Pflichtenheftes festgehalten. Für den Entwurf wird die Architektur in Module heruntergebrochen, die dann einzeln implementiert werden. Das hier vorgestellte Modell ist relativ abstrakt und kann im Anwendungsfall durchaus mehr Stufen aufweisen, z.B. wird für gewöhnlich zwischen Hard- und Softwareentwurf unterschieden.

Während der Entwicklung folgt auf jeden Schritt im Diagramm eine Verifikation der Ergebnisse. Die Verifikation ist in diesem Fall ein formaler Nachweis der Korrektheit einer jeden Stufe im V-Modell. Nach Implementierung der Module erfolgt eine Validierung gemäß der Spezifikationen. Die Validierung erfolgt mit Hilfe von Tests denen zunächst die einzelnen Module unterzogen werden. Anschließend erfolgen Tests der integrierten Module und ein Test des Gesamtsystems.

### 2.1 Testverfahren

Bevor ein neues System in die Serie eines Automobilherstellers gelangt, muss es in umfangreichen Tests seine Funktionsfähigkeit zeigen. Dazu durchläuft der Prototyp zuerst die folgenden Stufen bis er tatsächlich in einem Testfahrzeug erprobt wird.

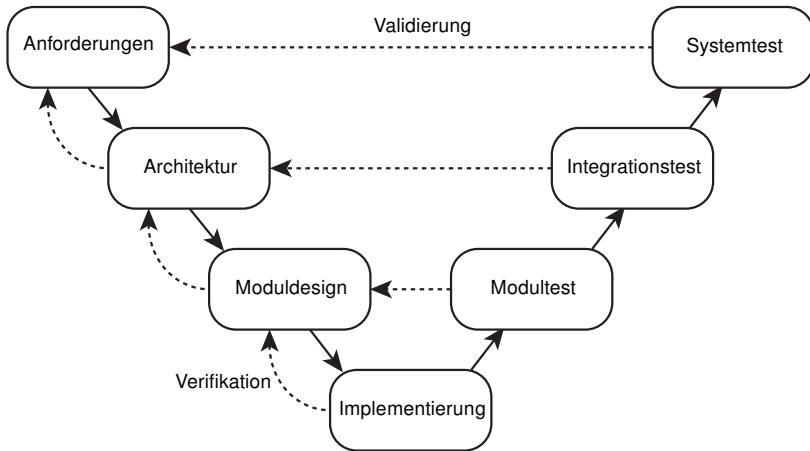


Bild 2.1: V-Modell

**Model in the loop, MiL:** Durch eine Modellierung der Zielumgebung kann schon während der Entwicklung geprüft werden, ob eine grundsätzliche Funktion gewährleistet ist. Das neu entwickelte System wird dazu in Form eines Modells in einem Simulationswerkzeug erstellt und zusammen mit den relevanten Umgebungsmodellen getestet.

**Software in the loop, SiL:** Aus dem getesteten Modell wird entweder manuell oder automatisiert der Programmcode für die Zielplattform erstellt. Über eine emulierte Schnittstelle erfolgt eine Kommunikation mit der simulierten Umgebung.

**Hardware in the loop, HiL:** Mittels eines echtzeitfähigen Rechners, der über alle notwendigen physischen Schnittstellen verfügt, wird das erstellte Echtteil an die simulierte Umgebung angebunden. Eine HiL-Umgebung erlaubt sowohl den Test einzelner Komponenten, als auch den Test eines Verbundes von Steuergeräten und Aktoren.

Die Übergänge zwischen den verschiedenen Testverfahren sind fließend. Code-generatoren erlauben die direkte Verwendung der erstellten Modelle in der SiL-

Umgebung. Durch sog. Rapid Prototyping Technologie kann neue Technologie schneller am HiL getestet werden, um anschließend am realen Objekt erprobt zu werden.

## 2.2 Erprobung

Die Erprobung stellt die ersten praktischen Versuche mit dem neuen Prototypen dar. In einem Versuchsstand wie z.B. einem Motorenprüfstand oder einem Rollenprüfstand wird die Funktion unter kontrollierten Bedingungen untersucht. Wichtig ist es, die Funktionalität über den gesamten Arbeitsbereich sicherzustellen und nachzuweisen. Dazu ist es notwendig neben den normalen Arbeitsbedingungen auch Grenzbereiche anzufahren, um spätere Gefahrensituationen zu vermeiden. Des weiteren muss großer Wert auf Reproduzierbarkeit gelegt werden, um Funktionsänderungen bewerten zu können.

Der Test eines Fahrerassistenzsystems stellt die Entwickler allerdings vor größere Herausforderungen, da die notwendige Testumgebung nicht nur aus dem Testfahrzeug besteht, sondern auch aus dem umgebenden Verkehr und der Straße. Aus dem Grund erfolgt während der Entwurfsphase eines Fahrerassistenzsystems bereits sehr früh der Einsatz auf einer Teststrecke. Die Nachteile dieses Vorgehens sind zum einen die Kosten, die durch die vielen praktischen Versuche entstehen und zum anderen das Risiko, das die Testingenieure tragen, da die Fahrzeuge immer von einem Fahrer gesteuert werden müssen. Die beschriebenen Probleme führen zu dem Bedürfnis einen Großteil der Versuche bereits in der Simulation oder zumindest in einen statischen Versuchsstand durchzuführen.

Am Institut für Dynamik und Schwingungen der Technischen Universität Braunschweig ist ein Simulationsplattform im Maßstab 1:10 entwickelt worden, mit der das Verhalten mehrer Verkehrsteilnehmer erforscht werden kann. Aufgrund der schlechten Skalierbarkeit ist es jedoch unmöglich die Fahrdynamik eines realen Fahrzeugs auf ein Modell abzubilden.

In [12] wird ein Prüfstand beschrieben, in dem das Testfahrzeug, mit Assistenzsystem ausgerüstet, auf einem Rollenprüfstand fährt. Die übrigen Verkehrsteilnehmer werden durch bewegliche Plattformen dargestellt und bewegen sich in Rela-

tion zum Testfahrzeug, um Differenzgeschwindigkeiten darzustellen. Durch diese Maßnahmen wird erreicht, dass das ganze Testverfahren quasi statisch durchgeführt wird, während sich das Testfahrzeug mit einer virtuellen Geschwindigkeit bewegt. Neben den beschriebenen Vorteilen ergeben sich natürlich Einschränkungen gegenüber einer realen Fahrt im Verkehr. Die Beschleunigung die das Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand erfährt, werden zwar auf die Reifen übertragen, wirken aber nicht auf den Aufbau und die Beschleunigungssensoren. Ebenfalls ist es schwierig Rotationen abzubilden, da in einer simulierten Kurvenfahrt der gesamte Fremdverkehr um das Testfahrzeug gedreht werden muss. Diese Form des Versuchs bringt einen großen Sicherheitsgewinn, allerdings ist eine Reduzierung der Kosten nicht zu erwarten. Da die Fahrzeuge in diesem Fall ferngesteuert werden ist die Reproduzierbarkeit sichergestellt.

Der Technische Überwachungsverein(TÜV) Süd hat im Jahr 2006 umfangreiche Untersuchungen an vier aktuellen Oberklassefahrzeugen mit Abstandsregeltempomat durchgeführt [13]. Dazu wurden Fahrzeuge mit einem hochpräzisen Messsystem ausgerüstet, das aus einer Intertialplattform (Inertia Measurement Unit, IMU) und einem Differenzial-GPS (Global Positioning System) besteht. So war es möglich Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aller Verkehrsteilnehmer zu erfassen. Um eine Reproduzierbarkeit der Versuche sicherzustellen und die Ergebnisse der unterschiedlichen Fahrzeuge vergleichen zu können wurden die Fahrzeuge von Robotern gesteuert. Untersucht wurden der eingehaltene Abstand, das Verhalten beim Auffahren auf eine Kolonne, aufgebrachte Verzögerungen, Reaktionen auf Ein- und Ausschervorgänge und Kurvenfahrten. Die Ergebnisse der Untersuchungen waren zum Teil sehr unterschiedlich und offenbarten „einige Schwachstellen, die in den folgenden Generationen zu optimieren sind“ [13].

## 2.3 Simulationsumgebungen

Die vorangegangenen Beispiele zeigen, dass das Thema der Erprobung von Fahrerassistenzsystemen in der Automobilindustrie noch nicht ausschöpfend behandelt worden ist und hier ein großer Entwicklungsbedarf besteht. Aus dem Grund gibt es Bestrebungen die Entwicklung neuer Fahrzeuge und Fahrzeugkomponenten

vermehrt „virtuell“ durchzuführen [14]. Die Nutzung virtueller Prototypen soll den notwendigen Einsatz physikalischer Prototypen hinauszögern und die Zeit zur Serienreife deutlich verkürzen. Eine umfangreiche Simulationsumgebung ermöglicht dabei eine frühzeitige Abdeckung vieler realer Testfälle.

Um Untersuchungen von Fahrerassistenzsystemen bereits am Entwicklungsrechner zu ermöglichen, wurden zahlreiche Simulationsumgebungen erstellt. Im Rahmen des DECOS-Projektes wurden Untersuchungen durchgeführt, ob die Nutzung einer bestehenden Simulationsumgebung möglich ist [10]. Die zum Projektstart erfolgten Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass die Verwendung bestehender Simulationsumgebungen nicht sinnvoll ist, da sie den erarbeiteten Anforderungen nicht entsprechen.

## 2.4 Das DECOS-Projekt

Das europäische Projekt DECOS (Dependable Embedded Components and Systems) entwickelt neue Methoden für den Entwurf eingebetteter Systeme im Bereich des Automobilbaus, der Luftfahrt und der Industrie. Es wird gefördert innerhalb des 6. Rahmenprogrammes der EU („6th EU Framework Programme“). Die Methoden beschreiben einen durchgängigen Entwicklungsprozess, der es ermöglicht Funktionen in einem Verbund von Steuergeräten zu implementieren und zu verteilen. Es handelt sich dabei um einen Paradigmenwechsel im Entwicklungsprozess. Das Entwicklerziel wandelt sich von der gängigen föderalen Steuergeräte-Architektur hin zu einer integrierten Vorgehensweise bei der Definition und der Implementierung von elektronischen Funktionen im Fahrzeug.

Das Projekt besteht aus mehreren Teilprojekten, die sich mit einzelnen Aspekten befassen.

**Architektur:** Es werden neue Möglichkeiten entwickelt Anwendungen in einem Verbund von Steuergeräten sowohl zeitlich als auch räumlich zu verteilen. Dabei werden die Funktionen gekapselt und es entsteht so die Möglichkeit, Anwendungen parallel auf einer Zielhardware auszuführen ohne das eine ungewünschte Beeinflussung zwischen unterschiedlichen Anwendungen

entstehen kann. Alternativ können Funktionen im Steuergeräteverbund verteilt und dort zeitgesteuert ausgeführt werden.

**Werkzeuge:** Neue Werkzeuge erlauben eine Durchgängigkeit während der Entwicklung neuer Funktionalitäten. Dazu ist eine Werkzeugkette entwickelt worden, die aus einer abstrakten Beschreibung der Zielhardware, der Kommunikationsstruktur und den einzelnen Anwendungen automatisiert, die notwendigen Steuergeräteroutinen erstellt. Vorgänge wie die manuelle Quellcodeerstellung und die Verifikation der erstellten Programme werden durch die neue Technologie überflüssig. Zur Validierung der erstellten Anwendungen werden Werkzeuge geschaffen, um anschließende Testverfahren zu automatisieren und zu beschleunigen.

**Methoden:** Die Methodik beschreibt die einheitliche Anwendung der entwickelten Technologien und Werkzeuge. Es werden Richtlinien zur Beschreibung der verteilten Systeme und zum Vorgehen während der Entwicklung und der Validierung der Anwendungen erstellt.

**Anwendungen:** Zur Validierung der Systeme wurden im Projekt für die einzelnen Anwendungsgebiete Automotive, Luftfahrt und Industrie Demonstratoren entwickelt, die die Möglichkeiten der entwickelten Methoden und Techniken zeigen sollen. Deshalb ist im Forschungsverbund Fahrzeugsysteme an der Universität Kassel ein Prüfstand aufgebaut worden, an dem Fahrerassistenzsysteme umfassend getestet werden. Der Aufbau des Prüfstands wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

## 2.4.1 Aufbau der Simulationsumgebung

Im DECOS-Projekt wurden während der Initialisierungsphase Anforderungen an den Prüfstand erarbeitet [9], die in Bild 2.2 in Form eines Blockschaltbildes dargestellt sind. Um ein Assistenzsystem umfassend testen zu können, ist es notwendig den gesamten Regelkreis des Systems Testfahrzeug, Assistenzsystem und Umwelt darzustellen. Dazu wurden für die Simulation einzelne Module definiert:

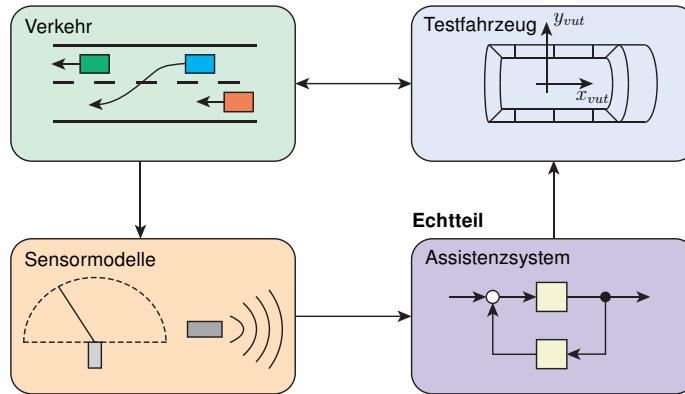


Bild 2.2: Struktur der Simulationsumgebung

**Virtuelle Umwelt:** Die virtuelle Umwelt enthält einen konfigurierbaren dreidimensionalen Straßenverlauf, auf dem sich das Testfahrzeug und weitere Verkehrsteilnehmer bewegen können.

**Testfahrzeug:** Das Testfahrzeug wird mit der Dynamik des Aufbaus und Modellen des Antriebsstranges dargestellt. Es besteht die Möglichkeit über Schnittstellen für ein Fahrerassistenzsystem in die Fahrzeugsteuerung einzutreten und relevante Messgrößen zu erfassen.

**Verkehrssimulation:** Zur Simulation des Assistenzsystems ist es notwendig, den umgebenden Verkehr, der das Verhalten des Testfahrzeugs beeinflusst angemessen darzustellen. Die Fahrzeuge der Umgebung müssen entsprechende Fahrmanöver durchführen, um das Assistenzsystem anzuregen.

**Fahrermodelle:** Um einen natürlichen Verkehrsfluss darzustellen, werden die Fahrzeuge durch parametrierbare Fahrermodelle gesteuert, die das relevante Verhalten eines realen Fahrers nachbilden.

**Sensormodelle:** Um den Regelkreis zu schließen, wird das Verkehrsgeschehen um das Testfahrzeug von Modellen der umfelderfassenden Sensorik erfasst. Die

gewonnenen Daten werden aufbereitet und dem Assistenzsystem zur Verfügung gestellt.

An der Universität Kassel wurde die Simulationsumgebung von drei Mitarbeitern entwickelt. In [11] sind die technischen Grundlagen der Simulationsumgebung dargestellt. In [10] wird die Erzeugung kritischer Situationen für das zu testende Assistenzsystem beschrieben. In dieser Arbeit werden die Fahrermodelle und Sensormodelle ausführlich dargestellt.

### 3 Sensormodelle

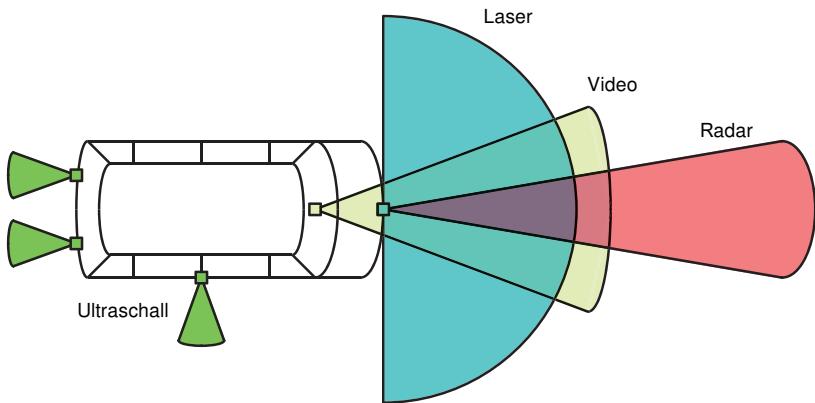


Bild 3.1: Anordnung der umfelderfassenden Sensoren

Ein Fahrerassistenzsystem kann das Fahrzeug nur sicher führen, wenn es über verlässliche Umgebungsdaten verfügt. In der Realität kann es allerdings zu vielfältigen Störeinflüssen auf den Messvorgang kommen. Die Sensoren bewegen sich mit dem Testfahrzeug durch die Umgebung und sind dadurch Schwingungen der Fahrzeugdynamik ausgesetzt, die eine Erfassung der Umgebung erschweren. Durch Umwelt, Straße und Objekte mit schlechten Reflexionseigenschaften entstehen weitere Störungen. Bildauswertende Sensorsysteme, die auf einer Kamera basieren unterliegen ebenso störenden Einflüssen wie z.B. Verdeckung von Fahrzeugen und Teile der Straße. Für die Simulation ist es daher notwendig, diesen Messvorgang angemessen darzustellen, um diese Einflüsse bereits während der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen untersuchen zu können. Aus diesem

Grund wurden neue Modelle entwickelt, die auf einer geometrischen Repräsentation des Erfassungsbereichs basieren und so eine detaillierte Nachbildung erlauben und auch Störeinflüsse darstellen. Dieses Sensormodell wird im Folgenden allgemein vorgestellt und anschließend wird für die einzelnen Sensortypen ein konkretes Modell abgeleitet. Das Modell wird in seiner geometrischen Positionierung und Ausrichtung beschrieben, die grundsätzlichen geometrischen Zusammenhänge der Objekterfassung werden dargestellt und Gleichungen für die Reflexion an Oberflächen hergeleitet. Da eine Kamera auf einem anderen Prinzip beruht als strahlenbasierte Sensoren wie Radar und Laser, wird in Abschnitt 3.7 ein Verfahren vorgestellt, auch videobasierte Sensorsysteme angemessen darzustellen.

### 3.1 Koordinatensysteme

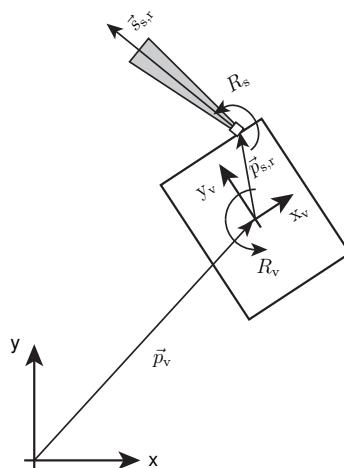


Bild 3.2: Ausrichtung der umfelderfassenden Sensoren

Da die Sensoren während der Fahrt mit dem Testfahrzeug bewegt und rotiert werden und an unterschiedlichen Positionen am Fahrzeug angebracht sind, wie in Bild 3.1 dargestellt, ist es notwendig, den simulierten Sensorstrahl  $\vec{s}_{s,r}$  auf

das Fahrzeug zu transformieren. In der Simulationsumgebung existieren drei verschiedene Koordinatensysteme. Alle Fahrzeuge, Objekte und die Straße werden in festen Weltkoordinaten positioniert. Die Fahrzeugkoordinaten beschreiben ein fahrzeugfestes Koordinatensystem, das mit dem Testfahrzeug bewegt und rotiert wird. Die Sensorpositionen werden in Relation zum Fahrzeugmittelpunkt beschrieben und in diesen Sensorkoordinaten findet der Messvorgang statt.

In Bild 3.2 ist das Testfahrzeug mit den drei Koordinatensystemen, den Positionsangaben und den Rotationsoperationen dargestellt.

Die Fahrzeugposition wird durch den Vektor  $\vec{p}_v$  beschrieben.

$$\vec{p}_v = \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Die Ausrichtung des Fahrzeugs ergibt sich durch den Rollwinkel  $\varphi$ , den Nickwinkel  $\vartheta$  und den Gierwinkel  $\psi$ .

$$R_x(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$R_y(\vartheta) = \begin{pmatrix} \cos(\vartheta) & 0 & \sin(\vartheta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\vartheta) & 0 & \cos(\vartheta) \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$R_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$R_v = R_x(\varphi) \cdot R_y(\vartheta) \cdot R_z(\psi) \quad (3.5)$$

Die relative Position des Sensors am Fahrzeug wird durch  $\vec{p}_{s,r}$  beschrieben. Somit

ergibt sich die absolute Position  $\vec{p}_s$  zu:

$$\vec{p}_s = \vec{p}_v + R_v \cdot \vec{p}_{s,r} \quad (3.6)$$

Die Ausrichtung des Sensors  $\vec{s}_s$  ergibt sich aus den drei Winkeln  $\varphi_s$ ,  $\vartheta_s$ ,  $\psi_s$  und der relativen Ausrichtung  $\vec{s}_{s,r}$

$$R_s = R_x(\varphi_s) \cdot R_y(\vartheta_s) \cdot R_z(\psi_s) \quad (3.7)$$

$$\vec{s}_s = R_v \cdot R_s \cdot \vec{s}_{s,r} \quad (3.8)$$

## 3.2 Geometrischer Ansatz

Zur Modellierung der Sensoren, die auf dem Prinzip basieren elektromagnetische Wellen zu senden und das reflektierte Signal zu empfangen, wurde auf Methoden der Computergrafik zurückgegriffen.

Die Fahrzeuge der Umgebung werden dazu durch einfache geometrische Modelle dargestellt, siehe Bild 3.3. Die Oberfläche der Objekte besteht aus Dreiecken, denen Parameter für die einzelnen Sensoren zugewiesen werden und die von den Sensormodellen erfasst werden können.

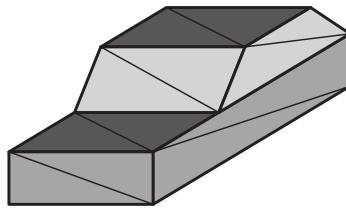


Bild 3.3: Darstellung eines Fahrzeugs

Zur Bestimmung der Sensordaten müssen die Sensorstrahlen mit den Oberflächen der Objekte zum Schnitt gebracht werden, siehe Bild 3.4. Der Abstand zwischen Sensor und Dreieck ergibt sich aus dem folgenden Zusammenhang, siehe auch [15].

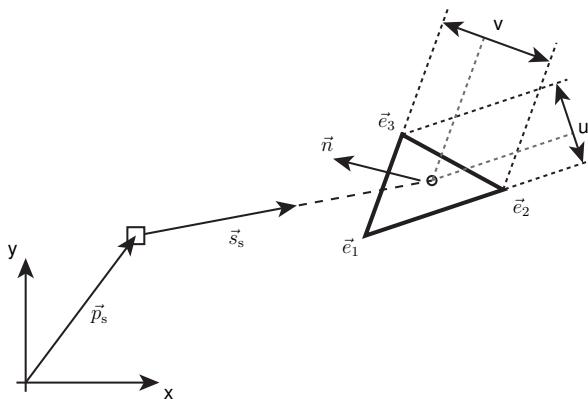


Bild 3.4: Schnitt zwischen Sensorstrahl und Dreieck

$$\vec{n} = (\vec{e}_2 - \vec{e}_1) \times (\vec{e}_3 - \vec{e}_1) \quad (3.9)$$

$$a = -\vec{s}_s \cdot \vec{n} \quad (3.10)$$

$$\cos(\beta) = \frac{a}{|\vec{s}_s| \cdot |\vec{n}|} \quad (3.11)$$

Der Winkel  $\beta$  beschreibt den Schnittwinkel zwischen dem Sensorstrahl und dem Normalenvektor  $\vec{n}$  der Ebene, in der sich das Dreieck befindet. Ist die folgende Bedingung erfüllt, schneidet der Sensorstrahl die Fläche des Dreiecks von vorne.

$$\cos(\beta) > 0 \quad (3.12)$$

Der Schnitt mit der Dreiecksfläche wird durch die beiden normierten Koordinaten  $u$  und  $v$  überprüft.

$$u = \frac{(\vec{e}_3 - \vec{e}_1) \cdot [(\vec{p}_s - \vec{e}_1) \times \vec{s}_s]}{\vec{s}_s \cdot \vec{n}} \quad (3.13)$$

$$v = \frac{(\vec{e}_2 - \vec{e}_1) \cdot [(\vec{p}_s - \vec{e}_1) \times \vec{s}_s]}{\vec{s}_s \cdot \vec{n}} \quad (3.14)$$

$$0 \leq u \leq 1 \quad (3.15)$$

$$0 \leq v \leq 1 \quad (3.16)$$

$$u + v \leq 1 \quad (3.17)$$

Im Falle eines Schnitts ergibt sich der Abstand dann zu:

$$d = \frac{(\vec{p}_s - \vec{e}_1) \cdot \vec{n}}{\vec{s}_s \cdot \vec{n}} \quad (3.18)$$

Um Rechenzeit einzusparen ist es notwendig, eine Vorauswahl der Objekte zu treffen, die auf einen Schnitt mit dem Sensorstrahl überprüft werden. Jedes Objekt weist dazu einen Radius auf (bounding sphere) durch den die maximale Ausdehnung vom geometrischen Schwerpunkt beschrieben wird. Der Sensorstrahl wird im ersten Schritt mit dieser Kugel zum Schnitt gebracht, siehe Bild 3.5.

$$\cos(\alpha) = \frac{\vec{s}_s \cdot \vec{d}_o}{|\vec{s}_s| \cdot |\vec{d}_o|} \quad (3.19)$$

$$= \frac{s_0}{|\vec{d}_o|} \quad (3.20)$$

$$s_0^2 = |\vec{d}_o|^2 - r^2 \quad (3.21)$$

Der Wert  $\vec{s}_s$  beschreibt die Richtung des Sensorstrahls und ist auf die Länge  $|\vec{s}_s| = 1$  normiert. Somit ergibt sich als Bedingung für den Schnitt zwischen

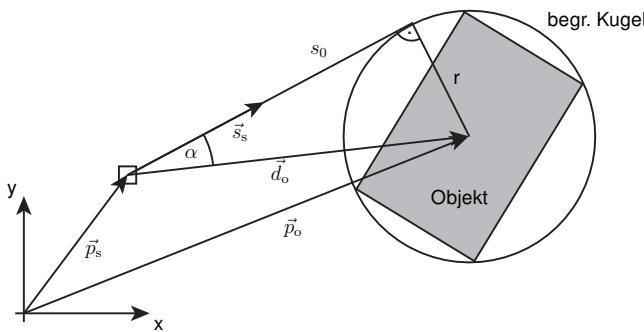


Bild 3.5: Schnitt mit begrenzender Kugel

Strahl und Kugel:

$$r^2 < |\vec{d}_o|^2 - (\vec{s}_s \cdot \vec{d}_o)^2 \quad (3.22)$$

Alternativ ist es möglich die Geometrie eines Objekts nicht durch eine Kugel, sondern in anderer Form zu abstrahieren. In Abhängigkeit der Objektgeometrie kann es sein, dass eine Kugel ein sehr viel größeres Volumen beschreibt als der tatsächliche Körper einnimmt und das Volumen z.B. durch einen Quader besser approximiert wird.

In Bild 3.6 sind zwei Beispiele dargestellt. Das Verhältnis vom realen Volumen  $V_o$  zum approximierten Volumen  $V$  ergibt:

$$\frac{V_{o,a}}{V_a} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{\pi}} \approx 0,68 \quad (3.23)$$

$$\frac{V_{o,b}}{V_b} << \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{\pi}} \quad (3.24)$$

Im zweiten Fall ist eine Vorauswahl trotz des höheren Rechenaufwandes durch

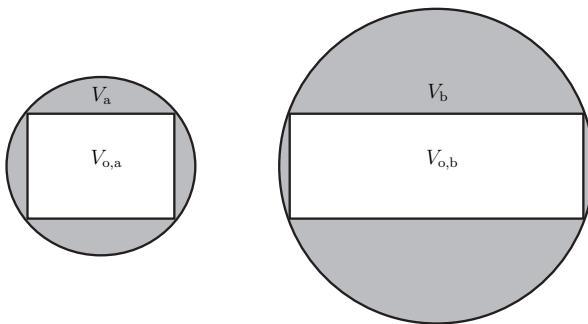


Bild 3.6: Vergleich zwischen 2 begrenzenden Kugeln

den Schnitt mit einem begrenzenden Quader sinnvoller. In der Computergrafik ist das beschriebene Vorgehen unter dem Begriff „Level of Detail“ (LOD) bekannt und wird vornehmlich in Computerspielen und 3D-Visualisierungen eingesetzt. Die Zahl der Detaillierungsstufen kann über die hier beschriebenen zwei Stufen hinausgehen.

Werden mehrere Objekte abgetastet, so kann es zu Abdeckungen kommen wie in Bild 3.7 dargestellt. Es gilt zu beachten, dass ein Objekt zwar mit seinem begrenzenden Radius den Sensorstrahl schneiden kann, aber selbst nicht erfasst wird. Ein geschnittenes Objekt verdeckt weitere Objekte. Durch eine Sortierung erfolgt die Ermittlung des kürzesten Abstands.

### 3.3 Reflexion

Die Sensorstrahlen, die ein Objekt der Umgebung treffen, werden von diesem reflektiert. Zur Bestimmung des empfangenen Sensorsignals wird im Folgenden auf den Rückstreuvgang eingegangen. Die Reflexion wird durch die verschiedenen Reflexionsfaktoren der Oberfläche bestimmt, da ein Sensorstrahl auf verschiedene Weisen reflektiert werden kann. Ein Teil des eingestrahlten Signals wird diffus, also ungerichtet zurückgestreut. Die spekulare Reflexion bildet die spiegelnde

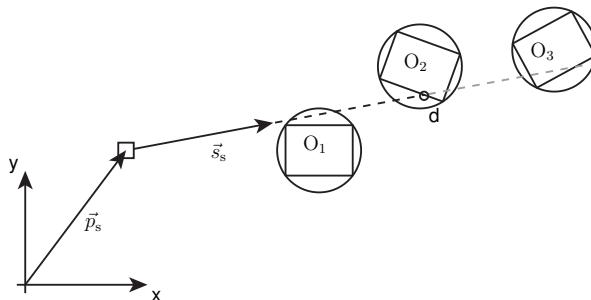


Bild 3.7: Abdeckung mehrerer Objekte

Komponente der Oberfläche ab. Des weiteren werden im Verkehr zunehmend so genannte „Retroreflektoren“ eingesetzt, die das Signal parallel zur Ausbreitungsrichtung reflektieren. Die Effekte durch Transmission werden vernachlässigt.

### 3.3.1 Diffuse Reflexion

In Bild 3.8 ist die mikroskopische Darstellung eines diffusen Reflexionsvorgangs zu sehen. Das Lambertsche Gesetz beschreibt den Rückstreuvgang einer ideal diffusen Oberfläche. Das bedeutet, die Wellenlänge des eingestrahlten Signals ist viel kleiner als die Rauigkeit der reflektierenden Oberfläche und das Material weist hinreichend viele Streuzentren auf. Im optischen Bereich ist z.B. Papier ein sehr guter diffuser Reflektor. Für langwelligere Signale wie dem Radar mit Wellenlängen von einigen mm bis cm sind auch noch Oberflächen aus Sand spiegelnd und diffuse Oberflächen bestehen z.B. aus Geröll. Sind diese Bedingungen erfüllt, ergibt sich für das reflektierte Signal der folgende Zusammenhang, der in Bild 3.9 verdeutlicht wird.

Die Strahlung  $S_s$  trifft auf die Fläche  $dA$  und wird dort diffus zurückgestreut. Die Fläche  $dA$  kann dabei als punktförmig gegenüber dem Abstand zum Sender angenommen werden. Die reflektierte Strahlung  $I_{\text{diff}}$  ist abhängig vom Abstrah-

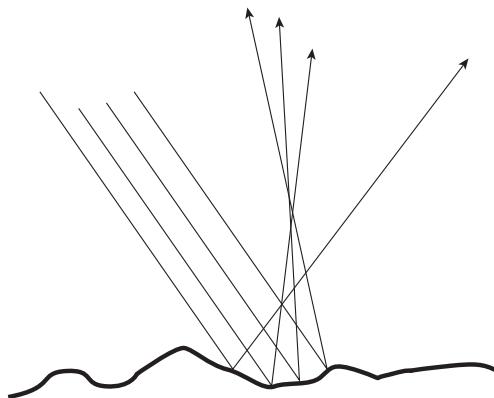


Bild 3.8: Mikroskopische Ansicht der diffusen Reflexion

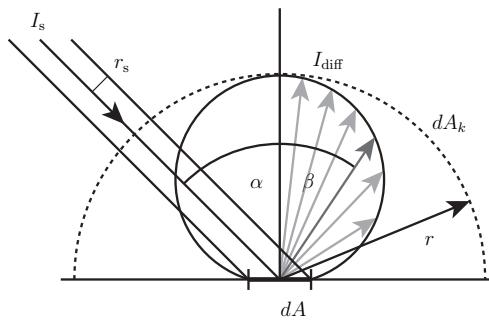


Bild 3.9: Diffuse Reflexion an Oberflächen

lungswinkel  $\beta$  und vom Abstand  $r$ .

$$I_{\text{diff}}(\beta) \sim k_{\text{diff}} \frac{S_s}{2\pi r^2} \cdot \cos(\beta) \quad (3.25)$$

### 3.3.2 Spekulare Reflexion

Im Gegensatz zur diffusen Reflexion wird an einer spiegelnden Oberfläche der Strahl gerichtet reflektiert. Der Vorgang wird durch das Reflexionsgesetz beschrieben. Der eintreffende Strahl wird unter dem gleichen Winkel wieder abgestrahlt, wie er einstrahlt wurde, siehe Bild 3.10.

$$\alpha = \beta \quad (3.26)$$

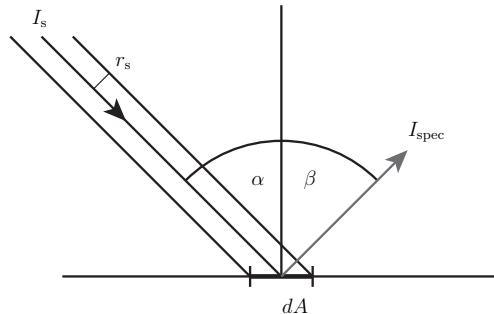


Bild 3.10: Spiegelnde Reflexion an Oberflächen

Zur praktischen Anwendung kommen in dieser Arbeit Modelle der spiegelnden Reflexion, die auch eine gewisse „Unschärfe“ der Oberfläche beschreiben. Ein Modell mit physikalischerem Hintergrund ist die Beckmannverteilung, siehe z.B.

[16].

$$I_{\text{spec}} \sim \frac{1}{4m^2 \cos^4(\Delta\alpha)} \cdot e^{-\left(\frac{\tan(\Delta\alpha)}{m}\right)^2} \quad (3.27)$$

Die Gleichung beschreibt die Intensität in Abhängigkeit von der Abweichung  $\Delta\alpha$  vom idealen Reflexionswinkel  $\beta$ . Der Faktor  $m$  beschreibt die mittlere Abweichung der Ausrichtung von Mikrofacetten, durch die die Oberfläche dargestellt wird. Ein kleiner Wert entspricht einer glatten spiegelnden Oberfläche, mit zunehmendem Wert steigt die Rauhigkeit.

In der Praxis wird häufig ein vereinfachter Zusammenhang genutzt, der unter dem Namen „Phong-Beleuchtungsmodell“ bekannt ist. Für die Intensität ergibt sich der folgende Zusammenhang.

$$I_{\text{spec}} \sim \cos^n(\Delta\alpha) \quad (3.28)$$

Der Wert  $n$  hat in diesem Fall keine physikalische Entsprechung. Vergleiche mit komplexeren Modellen zeigen nur geringe Abweichungen, während der numerische Aufwand jedoch erheblich reduziert wird. Aus diesem Grund kommt diese Gleichung sehr oft in numerischen Anwendungen, wie z.B. der Computergrafik, zum Einsatz.

Eine besondere Variante der reflektierenden Oberflächen ist der Retroreflektor. Durch eine spezielle Oberflächenstruktur wird der eintreffende Strahl immer in Richtung der Quelle reflektiert, siehe Bild 3.11. Im optischen Bereich werden Retroreflektoren für Verkehrsschilder, Fahrbahnmarkierungen und Fahrzeugreflektoren („Katzenaugen“) eingesetzt. Für langwelligere Signale, wie dem Radar, gibt es ebenfalls Retroreflektoren, die Anwendung finden in der Schifffahrt z.B. auf Bojen. Sie bestehen aus Metallplatten, die den Reflektor formen.

Im Folgenden werden aus den vorgestellten allgemeinen Zusammenhängen zur Modellierung von Reflexionsvorgängen die Sensormodelle abgeleitet.

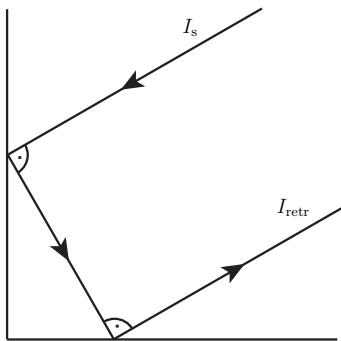


Bild 3.11: Prinzip des Retroreflektors

## 3.4 Laserscanner

Ein Laserscanner tastet die Umgebung mit Hilfe eines rotierenden Laserstrahls ab. In Tabelle 3.1 sind einige technische Merkmale eines Laserscanners für den Automotivbereich der Marke Ibeo dargestellt.

Tabelle 3.1: Eigenschaften eines Laserscanners

Wellenlänge	905 nm
Reichweite	150 m
Strahldurchmesser	1 cm
Strahldivergenz	5 mrad
Entfernungsauflösung	4 cm
Winkelauflösung	$0,125^\circ - 1^\circ$
Messbereich	hor: $180^\circ$ ; vert: $3,2^\circ$
Abtastrate	10 ... 40Hz

Ein Laser erzeugt einen Lichtstrahl, der sich durch hohe zeitliche und räumliche Kohärenz auszeichnet. Dieser Strahl kann aufgrund seiner räumlichen Kohärenz gut gebündelt werden und ist somit ein nützliches Werkzeug in vielen technischen Anwendungen. Durch die Bündelung des Strahls kann der Laser auch in der Entfernungsmessung eingesetzt werden, um kleinere Objekte zu erfassen. Dabei

wird der Abstand ermittelt, indem die Laufzeit eines ausgesandten Lichtsignals gemessen wird. Zur Detektion des reflektierten Signals dient eine Infrarotdiode, die zusammen mit dem Laser installiert wird. Durch die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ergibt die geforderte zeitliche Auflösung  $\Delta t$  hohe Anforderungen an die Messauswertung.

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (3.29)$$

$$\Delta d = 4\text{cm} \quad (3.30)$$

$$\Rightarrow \Delta t = 266\text{ps} \quad (3.31)$$

Die Rotation des Strahles wird durch bewegliche Spiegel erzeugt. Diese werden entweder durch elektrische Antriebe gedreht, oder durch Piezoaktorik bewegt, wobei die zweite Variante aufgrund der nicht notwendigen Mechanik, die kostengünstigere Variante ist.

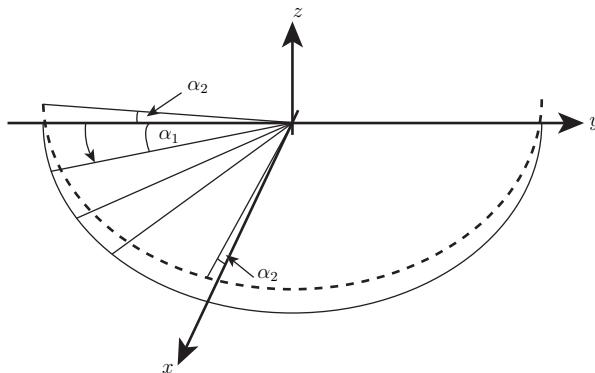


Bild 3.12: Erfassungsbereich des Laserscanners

Mathematisch wird der rotierende Sensorstrahl durch die Parameter  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  beschrieben (siehe Bild 3.12), wobei der Winkel  $\alpha_1$  die Rotation beschreibt und der Winkel  $\alpha_2$  die Neigung der Ebene, in der der Laserstrahl rotiert. Es ergibt sich

der folgende Richtungsvektor, der mit den umgebenden Objekten zum Schnitt gebracht wird, siehe Abschnitt 3.2.

$$\vec{s}_{s,r} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) \\ \sin(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) \\ \sin(\alpha_2) \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

Zur Betrachtung des Reflexionsvorgangs wird davon ausgegangen, dass die Divergenz des Laserstrahls zu vernachlässigen ist und der Strahl nur vollständig auf ein Objekt trifft. Das bedeutet, dass das gesamte ausgestrahlte Licht wieder reflektiert bzw. absorbiert wird. Das reflektierte Signal setzt sich zusammen aus den verschiedenen Anteilen die sich aus den unterschiedlichen Reflexionsmodellen ergeben. Die minimale Intensität zur Erfassung eines Objekts ergibt sich aus der maximalen Reichweite des Sensors. In Bild 3.13 ist ein Beispiel für den Verlauf der winkelabhängigen reflektierten Intensität dargestellt.

$$I_{\text{refl}} = I_{\text{diff}} + I_{\text{spec}} \quad (3.33)$$

$$= I_s \cdot k_{\text{diff}} \cdot \cos(\Delta\alpha) + I_s \cdot k_{\text{spec}} \cdot \cos^n(\Delta\alpha) \quad (3.34)$$

### 3.4.1 Simulationsergebnisse

Zur Validierung des Laserscannermodells werden hier einige Simulationsergebnisse vorgestellt und mit realen Messergebnissen aus Veröffentlichungen verglichen. In [30] sind die Messdaten zur Erfassung eines vorrausfahrenden Fahrzeugs dargestellt. Ein Messergebnis ist in Bild 3.14 zu sehen.

In der Simulationsumgebung wurden diese Szenen nachgestellt, um eine Validierung des Sensormodells durchzuführen. In Bild 3.15 sind die Simulationsergebnisse für die gleichen Situationen mit den gleichen Abstandswerten dargestellt.

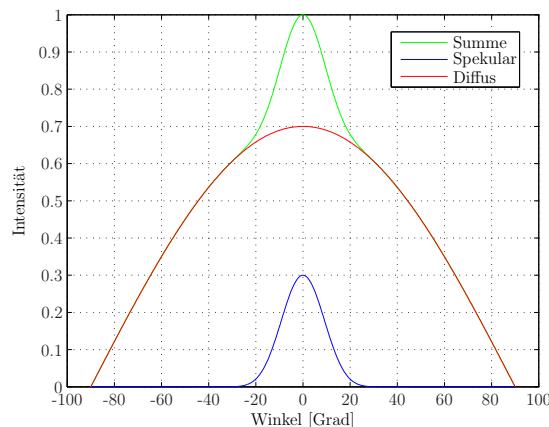


Bild 3.13: Reflektierte Intensität eines Laserstrahls

Segment				
Video-bild				
Distanz	10 m	18 m	42 m	79 m

Bild 3.14: Messergebnisse eines Laserscanners aus [30]

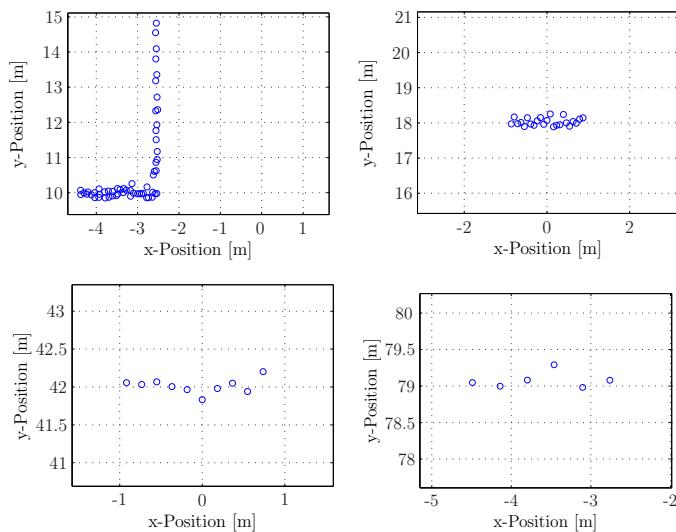


Bild 3.15: Konturen eines erfassten Objekts aus der Simulation



Bild 3.16: Konturen eines erfassten Objekts in der Simulationsumgebung

### 3.5 Radarsensor

Ein Radarsensor zur Abstandsmessung im Automobilbereich besteht aus einer Antenne, die elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von 24 GHz, bzw. 76 GHz ausstrahlt. Die Strahlung wird von Objekten reflektiert und von der Antenne wieder empfangen. Durch Messung der Laufzeit wird, wie beim Laserscanner, der Abstand ermittelt. Weisen die erfassten Objekte einen Geschwindigkeitsvektor auf, kann durch die Frequenzverschiebung des empfangenen Signals zusätzlich die zur Ausstrahlungsrichtung parallele Geschwindigkeitskomponente ermittelt werden.

Tabelle 3.2: Eigenschaften eines Radarsensors

Frequenz	76 GHz
Reichweite	2-120 m
Horizontaler Öffnungswinkel	$\pm 8^\circ$
Anzahl der Strahlen	3
Winkelgenauigkeit	0,6° im Elevationsbereich von $\pm 1,5^\circ$
Abstandsgenauigkeit	max(0, 6m, 5%)
Trennvermögen	$\Delta x_{trenn} = 3,5\text{m}$ ; $\Delta v_{trenn} = 6\text{m/s}$
Zykluszeit	125ms

#### 3.5.1 Reflexion

Der Sende- und Empfangsprozess wird bei Radaranwendungen durch die Radargleichung beschrieben. Zur genaueren Erläuterung siehe z.B. [17], [18] und [19]. Die Sendeleistung  $P_s$  eines Kugelstrahlers breitet sich idealerweise isotrop aus. Weist eine Antenne eine Richtungscharakteristik auf, siehe Abschnitt 3.5.2, so wird dieser Einfluss durch den Faktor  $G_s$ , dem sog. Antennengewinn, berücksichtigt. Im Abstand  $r$  ergibt sich somit die Leistungsdichte  $S_s$  aus dem folgenden Zusammenhang.

$$S_s(r) = \frac{P_s}{4\pi r^2} \cdot G_s \quad (3.35)$$

Ein Objekt im Abstand  $r$  reflektiert die aufgenommene Leistung  $S_s(r)$ . Dabei kann die Oberfläche  $A_z$  genau wie die Antenne eine Vorzugsrichtung aufweisen, die durch den Faktor  $G_z$  berücksichtigt wird. Das Produkt  $A_z \cdot G_z$  wird dabei als Radarrückstreufläche oder Radarquerschnitt  $\sigma$  bezeichnet. Sie ist die senkrecht zur Einstrahlrichtung wirksame Fläche und beschreibt das Verhältnis der reflektierten Leistung zur aufgenommenen Leistung.

$$S_r(r) = \frac{S_s(r) \cdot A_z \cdot G_z}{4\pi r^2} \quad (3.36)$$

$$\sigma = A_z \cdot G_z \quad (3.37)$$

Der Wert  $\sigma$  ist abhängig von der Fläche, der Form, dem Material und eventuell auch der Wellenlänge. Im Folgenden sind einige Beispiele für primitive Objektgeometrien gegeben. Diese Zusammenhänge gelten nur für den sog. optischen Bereich, das heißt die Wellenlänge  $\lambda$  ist im Verhältnis zu den Objektmaßen sehr klein und für den Fernbereich der abstrahlende Antenne.

- Kugel:  $\sigma = \pi r_k^2$
- Zylinder:  $\sigma = \frac{2\pi r_z l_z^2}{\lambda}$
- Ebene Fläche:  $\sigma = \frac{4\pi A_z^2}{\lambda^2}$

Flächen mit einer planaren Oberfläche weisen ein besonderes Verhalten auf. Sie reflektieren die eingestrahlte Leistung nur in eine Richtung wieder zurück, bzw. im Falle eines Zylinders nur in einer Ebene. Gekrümmte Flächen weiten das eingestrahlte Signal auf und sind somit aus einem größeren Winkelbereich zu erfassen. Allgemein ist der Radarquerschnitt abhängig von der Fläche und der Krümmung der Oberfläche und es ergibt sich für eine gekrümmte Fläche der folgende Zusammenhang (Herleitung und Beispiele siehe z.B. [17]).

$r_1$ : Krümmungsradius x-Richtung

$r_2$ : Krümmungsradius y-Richtung

$$\sigma = \pi r_1 r_2 \quad (3.38)$$

Wird davon ausgegangen, dass die einfallende Leistungsdichte vom Objekt reflektiert und von der gleichen Antenne wieder aufgenommen wird, ergibt sich der folgende Zusammenhang. Die Empfangsantenne weist die, von der Wellenlänge abhängige, effektive Wirkfläche  $A_s$  auf.

$$A_s = \frac{G_s \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} \quad (3.39)$$

$$P_e = \frac{P_s \cdot G_s^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \quad (3.40)$$

Es ist zu erkennen, dass die empfangene Leistung abhängig ist von der Entfernung des Objektes, der Antennengeometrie, der Wellenlänge und den Objekteneigenschaften, die in  $\sigma$  zusammengefasst sind. Gerade die Rückstreufläche  $\sigma$ , die maßgeblich durch die Geometrie des Objekts vorgegeben wird, beeinflusst den Erfassungsvorgang. Aufgrund der nahezu reinen spiegelnden Reflexion der Radarwellen ist das empfangene Signal stark abhängig vom Einstrahlwinkel, da Objekte wie Kraftfahrzeuge eine komplexe Oberflächenstruktur aufweisen und so eine richtungsabhängige Rückstreufläche entsteht.

Historisch bedingt finden sich hierzu viele Untersuchungen im zivilen und militärischen Luftfahrtbereich und der Seefahrt. Messungen an kleineren zivilen Flugzeugen zeigen Änderungen der Rückstreufläche um bis zu 15 dB bei kleinen Variationen des Messwinkels. Um diesen Effekt geeignet darzustellen ist es notwendig, die Oberfläche der Objekte nicht nur feiner aufzulösen als es in Bild 3.3 dargestellt ist, sondern auch eine Krümmung der Oberfläche zu modellieren. Krümmungen führen zu einer Aufweitung des reflektierten Signals während ebene Oberflächen das Signal gezielt in eine Richtung reflektieren und so nur bei senkrechter Einstrahlung vom Radar zu erfassen sind. Diesen Effekt macht

man sich, neben anderen Maßnahmen, in der sog. „Stealth“-Technologie zu Nutze, einer Technik, um militärische Objekte vor der Radarortung zu schützen. Da reale Fahrzeuge im Straßenverkehr Rundungen aufweisen, müssen diese ebenfalls geeignet berücksichtigt werden.

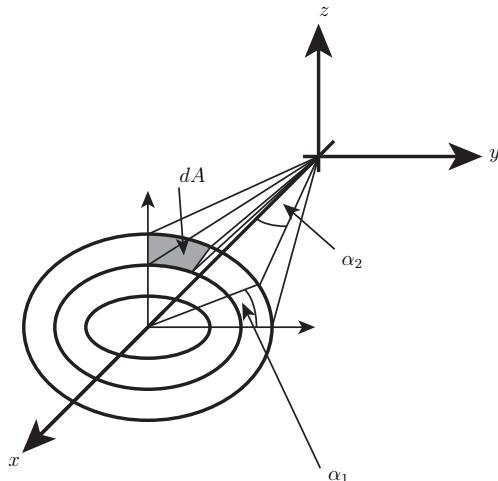


Bild 3.17: Erfassungsbereich des Radarsensors

Dazu wird im folgenden zunächst der Erfassungsbereich des Radarsensors näher betrachtet. In Analogie zu Gleichung (3.32) wird für die Radarkeule ein Vektorfeld definiert, das mit den Winkeln  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  den Erfassungsbereich des Sensors aufspannt, siehe Bild 3.17.

$$\alpha_{1,i} = 0, \Delta\alpha_1, 2 \cdot \Delta\alpha_1, \dots, (m-1) \cdot \Delta\alpha_1, 2\pi \quad (3.41)$$

$$\alpha_{2,i} = 0, \Delta\alpha_2, 2 \cdot \Delta\alpha_2, \dots, (n-1) \cdot \Delta\alpha_2, \alpha_{2,max} \quad (3.42)$$

$$\vec{s}_{s,r,i} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{2,i}) \\ \sin(\alpha_{1,i}) \cdot \sin(\alpha_{2,i}) \\ \cos(\alpha_{1,i}) \cdot \sin(\alpha_{2,i}) \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

Es ergibt sich somit eine kegelförmige Radarkeule, die aus  $m \cdot n$  Elementen besteht. Jedem Strahl dieses Vektors ist ein inkrementelles Flächenelement  $dA_i$  zugeordnet.

$$\Delta\alpha_1 = \text{const.} \quad (3.44)$$

$$\Delta\alpha_2 = \text{const.} \quad (3.45)$$

$$\Delta A_i = 2\pi r^2 \cdot (\cos(\alpha_{2,i}) - \cos(\alpha_{2,i} + \Delta\alpha_2)) \cdot \frac{\Delta\alpha_1}{2\pi} \quad (3.46)$$

Den einzelnen Flächeninkrementen  $\Delta A_i$  wird eine Sendeleistung zugewiesen, die sich aus der Strahlungsdichte  $S_s$  ergibt. Diese wird im folgenden Kapitel näher beschrieben. Die Strahlungsdichte über dieses Flächeninkrement wird als gleichmäßig angenommen. Die Summe der reflektierten Signale muss dem Radarquerschnitt des erfassten Objekts entsprechen.

$$S_s = S_s(r, \alpha_2) \quad (3.47)$$

$$P_{r,i}(r) = k_r \cdot S_s(r, \alpha_2) \cdot \Delta A_i(r, \alpha_2) \quad (3.48)$$

$$S_{r,i} = \frac{P_{r,i}(r)}{4\pi r^2} \quad (3.49)$$

Der Reflexionsfaktor  $k_r$  ist eine Eigenschaft, die dem erfassten Dreieck zugewiesen wird. Siehe dazu Abschnitt 3.3. In Bild 3.18 ist die Visualisierung des Erfassungsbereichs des Radarsensors dargestellt. In diesem Beispiel verfügt der Sensor über drei Radarkeulen, die um  $4^\circ$  verdreht sind. Die reflektierten Radardaten können ebenfalls dargestellt werden.

### 3.5.2 Antennendiagramm

Aufgrund beschränkter Sendeleistung wird der Strahlung durch eine spezielle Antennengeometrie eine Richtcharakteristik gegeben. Vereinfacht kann diese Aus-



Bild 3.18: Radardaten in der Simulationsumgebung

richtung durch einen Faktor beschrieben werden wie es im vorhergehenden Kapitel durch den Gewinn gemacht wurde. Da das Feld einer Antenne aber nicht konstant in alle Richtungen abgestrahlt wird, wird in diesem Abschnitt eine genauere Beschreibung vorgestellt. Das Fernfeld einer Antenne wird im sog. Antennendiagramm beschrieben. Dieses Diagramm stellt die abgegebende Feldstärke der Antenne in Abhängigkeit des Abstrahlungswinkels dar. Die Darstellung ist auf den Maximalwert von 1 normiert und ist für gewöhnlich logarithmisch. Ein Beispiel für einen Sensor mit 4 Radarkeulen ist in Bild 3.19 dargestellt. Es ist die jeweilige Hauptkeule zu erkennen, die weitere Nebenkeulen aufweist.

Für die Modellierung ist nur die Form der Hauptkeule von Interesse, da die geringe Intensität der Nebenkeulen für die Erfassung von Objekten nicht relevant ist. Zur Vereinfachung im Modell wird der Verlauf der Sendeintensität durch eine Näherung beschrieben. Dazu wird die abgegebene Sendeleistung  $P_s$  durch eine logarithmierte Kosinusfunktion approximiert.

$$P_s \sim 10^{a_1 \cdot \cos(a_2 \cdot \alpha + a_3)} \quad (3.50)$$

Der Kurvenverlauf wird durch die Faktoren  $a_i$  auf das reale Diagramm angepasst. Die Faktoren haben keine direkte physikalische Entsprechung. In Bild 3.20 ist der Vergleich zwischen Approximation und realem Verlauf dargestellt.

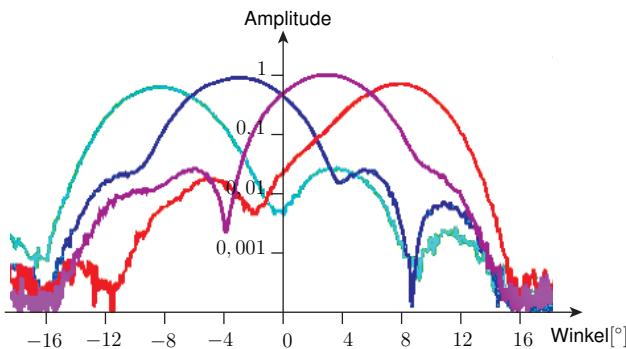


Bild 3.19: Antennendiagramm eines Radarsensors

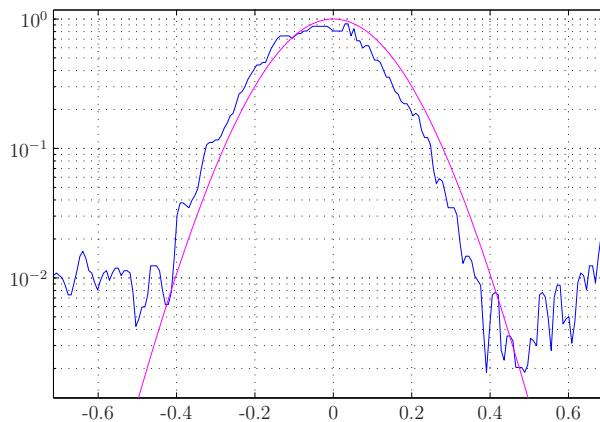


Bild 3.20: Approximation des Antennendiagramms eines Radarsensors, Winkel  $\alpha_2$  in rad.

### 3.5.3 Objekterfassung

Radarsensoren im Kraftfahrzeug werden heutzutage hauptsächlich mit dem sog. Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)-Verfahren betrieben. Das Sendesignal wird in seiner Frequenz moduliert, wie in Bild 3.21 a) dargestellt. Die Frequenz des empfangenen Signals ist aufgrund der Signallaufzeit um einen zeitlichen Abstand  $\Delta t$  verschoben. Werden Sende- und Empfangssignal gemischt, ergibt sich eine niederfrequente Zwischenfrequenz. Diese Zwischenfrequenz ist eine Funktion des Abstandes und der Geschwindigkeit des Zielobjektes. Der Abstand  $\Delta d$  führt zu einem Verlauf wie in Bild 3.21 b). Das zeitverzögerte Empfangssignal führt nach dem Mischen mit dem Sendesignal zu einer Frequenz  $f_b$ , die dem Abstand entspricht. Weist das erfasste Objekt eine relative Geschwindigkeit  $\Delta v$  auf, so wird der gesamte Frequenzverlauf aufgrund des Dopplereffekts angehoben wie in Bild 3.21 c) dargestellt. Nach dem Mischen ergibt sich die Zwischenfrequenz  $f_d$ . Die Überlagerung der beiden Effekte ist in Bild 3.21 d) zu sehen.

$$f = f_b \pm f_d = \frac{2 \cdot f_h}{c \cdot t_M} \cdot \Delta d \pm \frac{2 \cdot f_0}{c} \cdot \Delta v \quad (3.51)$$

Werden zwei unterschiedliche Frequenzrampen durchfahren, kann Gleichung (3.51) eindeutig gelöst werden. In der Praxis wird mit Hilfe von drei unterschiedlichen Frequenzrampen im Sendesignal die Robustheit des Verfahrens erhöht. Dazu werden unterschiedliche Anstiegszeiten  $t_M$  verwendet. Durch die gewonnene Redundanz werden Fehlinterpretationen vermieden.

Zur Modellierung der beschriebenen Mechanismen wird zunächst das auszuwertende Frequenzsignal betrachtet. In Bild 3.22 ist beispielhaft ein Frequenzspektrum dargestellt, in dem zwei Maxima zu erkennen sind, die zwei detektierte Objekte repräsentieren sollen. Neben weiteren Einflüssen, wie atmosphärischem Rauschen, kommt es aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Objekte beim reflektierten Signal zu einer Aufweitung der Amplitude im Spektrum. Dieser Effekt wird im Modell durch die in Abschnitt 3.2 und Abschnitt 3.3 beschriebenen Mechanismen berücksichtigt. Zusätzlich wird den simulierten Messdaten ein Rauschen überlagert.

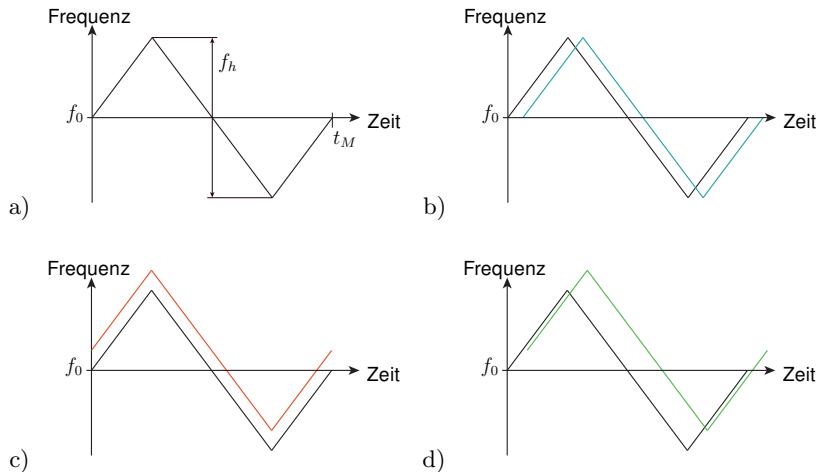


Bild 3.21: Frequenzmodulation

a: Sendesignal, b: Empfangssignal durch Abstand  $\Delta d$ , c: Empfangssignal durch rel. Geschwindigkeit  $\Delta v$ , d: Überlagerung von  $\Delta x$  und  $\Delta v$

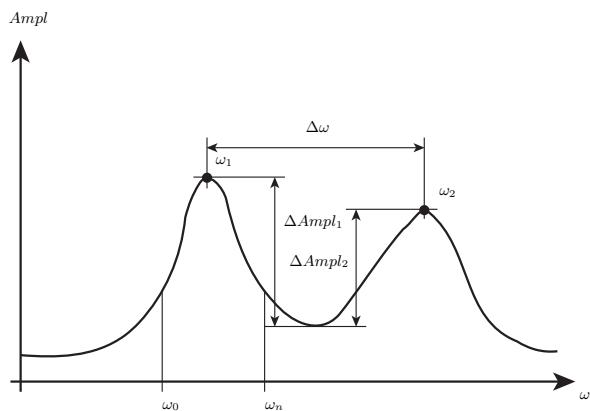


Bild 3.22: Radarspektrum

Um Objekte unterscheiden zu können muss der Signal-Rauschabstand  $\Delta P$  zwischen den Frequenzmaxima  $\omega_i$  genügend groß sein. Im Modell ergibt sich, durch den in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Zusammenhang, für die Reflexion eines jeden Flächeninkrements  $dA_i$  (Gleichung (3.44)) an einem Objekt, ein simulierter Messwert  $\vec{\Delta p}_i$ . Werden die simulierten Messwerte mit ihrer Intensität  $I$ , dem Abstand  $\Delta x$  und der Differenzgeschwindigkeit  $\Delta v$  im Diagramm aufgetragen, ergeben sich für jeden Abtastschritt Dichteveerteilungen aus denen die Objektinformationen gewonnen werden müssen (siehe Bild 3.24).

Jeder Messwert wird durch einen Vektor  $\vec{\Delta p}_i$  beschrieben:

$$\vec{\Delta p}_i = \begin{pmatrix} S_{r,i} \\ \Delta x_i \\ \Delta v_i \end{pmatrix} \quad (3.52)$$

Die einzelnen Messwerte werden sortiert, so dass gilt:

$$\Delta x_i > \Delta x_{i-1} \quad (3.53)$$

$$\Delta v_j > \Delta v_{j-1} \quad (3.54)$$

Dann ergibt sich analog zu Bild 3.22 eine Verteilung der empfangenen Leistung.

$$P_i(\Delta x_i) = \frac{S_{r,i}}{\Delta x_i - \Delta x_{i-1}} \quad (3.55)$$

Zur Objekterkennung werden die einzelnen Messpunkte  $\vec{\Delta p}_i$  zu Objekten  $m_i$  zusammengefasst, wie in Bild 3.24 dargestellt. Dazu werden Fenster definiert von denen die Objekte umgeben sind und die dem Trennvermögen des Sensors entsprechen. Der Algorithmus zur Objekterkennung wird in Bild 3.23 beschrieben. Ausgehend von den einzelnen Messwerten werden Gruppen gebildet, die sich durch die Differenzen  $\Delta x_{trenn}$  oder  $\Delta v_{trenn}$  unterscheiden müssen. Diese Differenz wird durch das Trennvermögen des Sensors (siehe Tabelle 3.2) festgelegt. Anschließend werden aus den einzelnen Gruppen Schwerpunkte  $m_i$  gebildet, die den Frequenzmaxima  $\omega_i$  eines realen Sensors entsprechen.

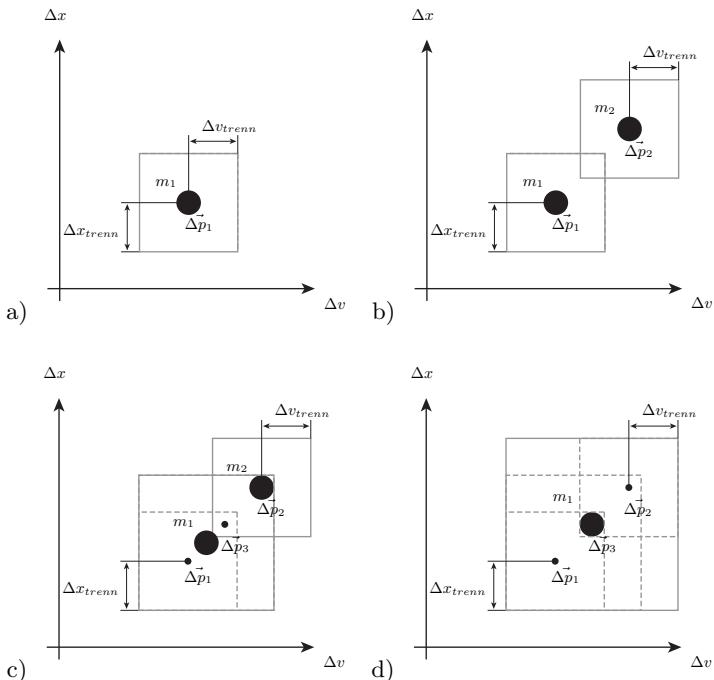


Bild 3.23: Erzeugung von Radarobjekten

- Bildung des Objekts  $m_1$  aus Messwert  $\vec{\Delta p}_1$ ,
- Bildung des zweiten Objekts  $m_2$  aus Messwert  $\vec{\Delta p}_2$ ,
- Hinzufügen des Messwerts  $\vec{\Delta p}_3$  zu Objekt  $m_1$ ,
- Verschmelzung der Objekte  $m_1$  und  $m_2$

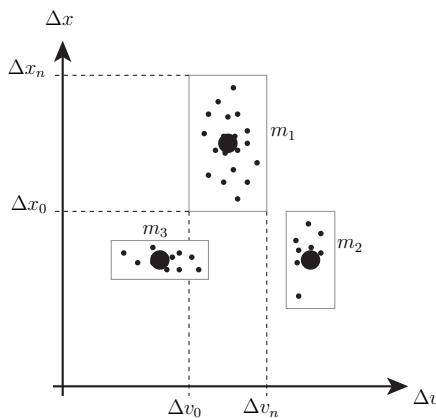


Bild 3.24: Radarmesswerte für Abstand und Geschwindigkeit

Aufbauend auf den erkannten Objekten des Radarsensors findet eine weitere Objekterkennung und Verfolgung statt auf die in Kapitel 4 eingegangen wird.

## 3.6 Ultraschallsensor

Ultraschallsensoren werden im Automobilbereich hauptsächlich für die Überwachung des direkten Fahrzeugumfelds genutzt. Sie werden für Komfortsysteme eingesetzt wie z.B. Einparkhilfen oder Einparkassistenten. In Tabelle 3.3 sind einige Eckdaten für einen Ultraschallsensor aus dem Automobilbau angegeben.

Tabelle 3.3: Eigenschaften eines Ultraschallsensors

Frequenz	40 kHz
Reichweite	0,3 - 5m
Horizontaler Öffnungswinkel	$\pm 15^\circ$
Anzahl der Strahlen	1
Abstandsgenauigkeit	max(0,6m, 5%)
Zykluszeit	100ms

Der Sensor besteht aus einer schwingungsfähigen Membran, die akustische Signale im Ultraschallbereich von 40 kHz aussendet. Die Membran dient ebenfalls als Empfänger. Die Auswerteelektronik ist einfach gehalten und besteht aus einer Laufzeitermittlung zur Entfernungsmessung. Die Wellenlänge ergibt sich aus der Schallgeschwindigkeit  $c_L$  die in Luft ca. 343 m/s beträgt.

$$\lambda = \frac{c_L}{f} \quad (3.56)$$

$$\lambda = 8,575 \text{ mm} \quad (3.57)$$

Ein Ultraschallsensor bildet ein Feld aus, das in Nahfeld und Fernfeld unterteilt wird. Im Nahfeld kommt es aufgrund der Nähe zur Schwingungsquelle zu Interferenzen, die durch Auslöschungen und Verstärkungen eine stark schwankende Intensitätsverteilung zur Folge haben. Dieser Bereich kann nicht zur Objekterfassung genutzt werden. Der Übergang zum Fernfeld wird durch die Nahfeldlänge  $l_n$  angegeben (siehe [20]).

$$D = \text{Sensordurchmesser} \quad (3.58)$$

$$l_n = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (3.59)$$

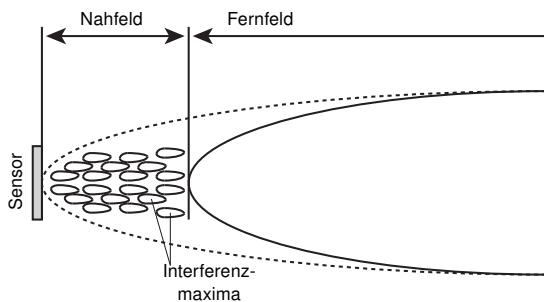


Bild 3.25: Feld des Ultraschallsensors

Im Fernfeld bildet sich eine Strahlenkeule aus, die weitere Nebenkeulen aufweisen kann.

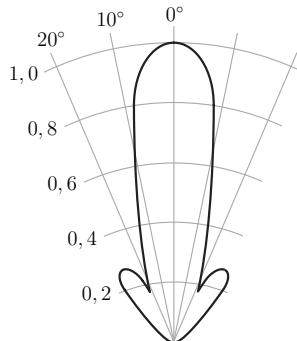


Bild 3.26: Sendekeule des Ultraschallsensors

In Bild 3.26 ist das Fernfeld eines Ultraschallsensors dargestellt. Das Feld besteht aus einer Hauptkeule und zwei Nebenkeulen, die durch deutlich ausgeprägte Minima getrennt sind. Für das Sensormodell wird nur die Hauptkeule betrachtet, die Nebenkeulen werden in ihrer Intensität vernachlässigt. Ultraschallwellen werden an Grenzschichten unterschiedlicher Schallwellenwiderstände reflektiert. Der Reflexionsfaktor  $k_r$  kann im Bereich von  $0 \dots 1$  variieren. Die relativ große Wellenlänge der Ultraschallwellen führen im automobilen Umfeld hauptsächlich zu spekularen Reflexionen (vgl. Abschnitt 3.3). Aufgrund der großen Ähnlichkeit bietet es sich an das Modell des Ultraschallsensors analog zum Radarsensor aufzubauen. Da der Sensor nicht in der Lage ist mehrere Objekte zu unterscheiden, wird auf eine Objekterkennung verzichtet und das Ausgangssignal aus dem geingsten Abstandssignal gebildet. Bei Verwendung mehrerer Ultraschallsensoren werden Triangulationsverfahren genutzt, um die Objekterfassung robuster zu gestalten. Dabei wird das ausgesendete Signal eines Sensors von allen Sensoren empfangen.

Tabelle 3.4: Eigenschaften einer Videokamera

Reichweite	ca. 60m
Horizontaler Öffnungswinkel	ca. 30°
Abtastrate	12,5Hz

## 3.7 Kamera

Um komplexere Verkehrsszenen zu analysieren und optische Merkmale der Umgebung zu erfassen wie z.B. Fahrbahnmarkierungen und Verkehrsschilder, werden Videokameras eingesetzt. In Tabelle 3.4 sind einige Eigenschaften einer Videokamera aufgeführt.

Zur Modellierung des Videosensors wurden zwei Konzepte untersucht. Zum Einen sollte der tatsächliche Bilderfassungsvorgang nachgebildet werden. Dazu wurde auf Funktionen der Computergrafik und spezielle Grafikhardware zurückgegriffen, da die Berechnung der Projektion der Umgebung in ein zweidimensionales Bild sehr rechenintensiv ist. Für den HiL-Simulator wurde aufgrund mangelnder Grafikfähigkeiten des Betriebssystems auf ein einfacheres Modell übergegangen.

### 3.7.1 OpenGL

Zur Darstellung realistischer dreidimensionaler Szenen hat sich in der Computer-technik der OpenGL-Standard etabliert. Es handelt sich hierbei um eine Bibliothek zur Beschreibung dreidimensionaler Objekte, die von einer leistungsfähigen Grafikkarte dargestellt werden. In Bild 3.27 ist die Visualisierung einer Straße dargestellt, wie sie auch von einer Kamera erfasst würde (siehe dazu [11]).

Um eine Auswertung vorzunehmen, wird das Bild aus dem Bildspeicher gelesen und mit den entsprechenden Algorithmen untersucht. In Bild 3.27 ist beispielhaft das Ergebnis einer Kantenerkennung mit anschließender Fahrspurerkennung dargestellt.

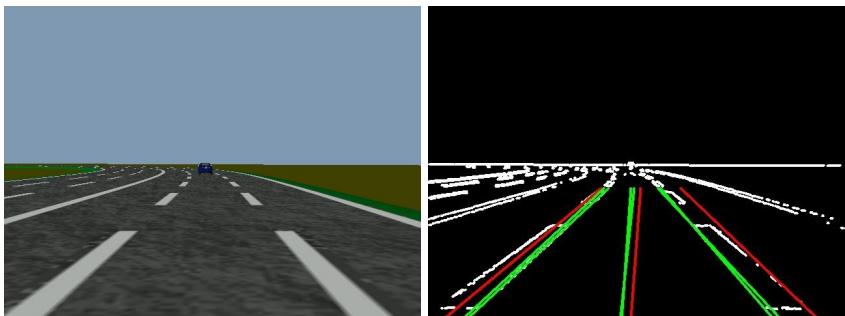


Bild 3.27: Visualisierung des Straßenverlaufs und Spurerkennung

### 3.7.2 Vereinfachtes Kameramodell

Aufgrund des enormen Rechenaufwands und den speziellen Anforderungen an das Grafiksystem wurde für den Betrieb auf dem HiL-Simulator ein vereinfachtes Modell der Spurerkennung implementiert. Dieses Modell gewinnt die Informationen über die Straße direkt aus dem Straßenverlauf. In der Simulationsumgebung wird der Straßenverlauf durch Splines dargestellt, die eine Kurve im dreidimensionalen Raum beschreiben. Auf den Splines existiert ein mitlaufendes Koordinatensystem mit den drei Koordinaten  $D$ ,  $O$  und  $L$  für die zurückgelegte Bogenlänge, den Versatz auf der Fahrbahn und der Höhe über der Fahrbahn. Zur genauen Beschreibung der Splines für die Straße sei auf [11] verwiesen.

An einem Vorrausschaupunkt  $\vec{\Delta x}$  vor dem Fahrzeug, der durch die Zeit  $t_v$  festgelegt wird, wird der Abstand  $o$  zur Mittellinie  $\vec{s}(D)$  der Straße berechnet. Zusätzlich errechnet sich der Winkel zwischen der Längsachse des Fahrzeugs und der Straße aus der Fahrzeugausrichtung beschrieben durch den Vektor  $\vec{L}$  und den

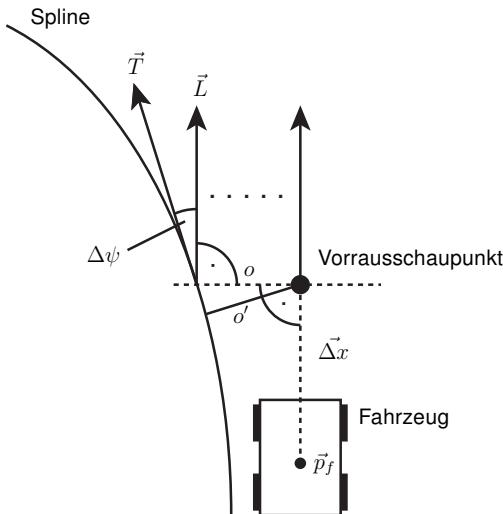


Bild 3.28: Spurerkennung

Tangentenvektor der Straße  $\vec{T}$ .

$$o' = \min(\vec{p}_f + \vec{\Delta x} - \vec{s}(D)) \quad (3.60)$$

$$o \approx \frac{o'}{\cos(\psi)} \quad (3.61)$$

$$\vec{\Delta x} = \vec{v}_f \cdot t_v \quad (3.62)$$

$$\cos(\psi) = \frac{\vec{L} \cdot \vec{T}}{|\vec{L}| \cdot |\vec{T}|} \quad (3.63)$$

Die Krümmung  $\kappa$  wird aus der Änderung des Tangentenvektors über die zurückgelegte Bogenlänge  $D$  ermittelt.

$$\kappa = \left| \frac{\partial \vec{T}}{\partial D} \right| \quad (3.64)$$

## 4 Sensordatenverarbeitung

Wird ein Fahrzeug durch ein Fahrerassistenzsystem autonom oder teilautonom durch den Straßenverkehr gesteuert, ist es auf Informationen über die Umgebung angewiesen. Diese Informationen müssen alle relevanten Daten aus dem Fahrzeugumfeld enthalten. Die Sensormodelle, wie sie in Kapitel 3 vorgestellt wurden, liefern, genau wie reale Sensoren, Messsignale, die weiter ausgewertet müssen. Von Interesse sind beispielsweise die Positionen und Geschwindigkeiten weiterer Verkehrsteilnehmer und Informationen über den Fahrbahnverlauf. Die beschriebenen Radar- und Lasersensoren liefern Messpunkte der Umgebung, die aus Abstandswerten und beim Radar auch aus Geschwindigkeitswerten bestehen. Aus diesen Rohdaten müssen Objekte ermittelt werden, die dann auf ihrer Trajektorie verfolgt werden.

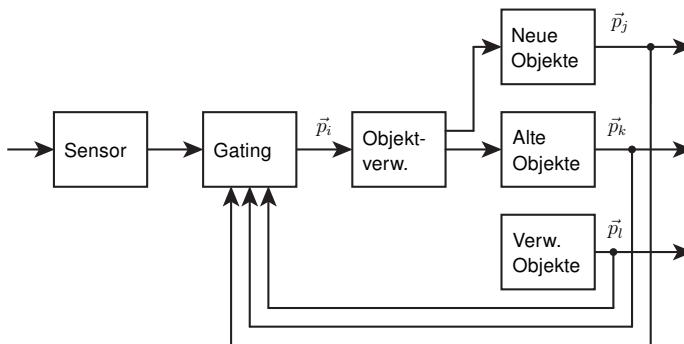


Bild 4.1: Struktur der Objekterkennung und Verfolgung

In Bild 4.1 ist die Gesamtstruktur zur Objekterkennung und Verfolgung dargestellt. Die Sensormodelle erfassen ihre Umgebung und geben ihre Messdaten in

Form von Abstands- und Geschwindigkeitswerten ab. Da die Sensoren an unterschiedlichen Positionen am Fahrzeug verbaut sind, müssen die Messwerte zunächst in ein gemeinsames Fahrzeugkoordinatensystem transformiert werden.

Es erfolgt eine Bewertung der neuen Messwerte anhand älterer Messdaten. So können ältere Objekte anhand neuer Daten wiedererkannt und weiter verfolgt werden, Objekte die neu in den Erfassungsbereich eintreten werden erfasst und Objekte, die nicht weiter durch Messdaten gestützt werden, verworfen werden. Diese Funktionen werden durch ein sogenanntes Gating und eine Objektverwaltung realisiert. Anschließend werden die Messdaten aller erkannten Objekte gefiltert, um das Messrauschen der Sensoren zu reduzieren. Dazu werden modellbasierte Filter eingesetzt.

Im folgenden Kapitel werden die notwendigen Verfahren zu diesem Thema näher erläutert. Eine praktische Anwendung zum Thema Sensordatenverarbeitung und Objekterkennung ist z.B. in [23] dargestellt.

## 4.1 Zielverfolgung

Aufgrund der zeitlichen Diskretisierung der Sensordaten ist es notwendig, die einzelnen Messdaten den verschiedenen Objekten zuzuordnen, damit diese während ihrer Bewegung durch den Erfassungsbereich des Sensors verfolgt werden können. Die unterschiedlichen Sensorsysteme zeichnen sich durch unterschiedliche Messparameter aus. Während die Messwerte eines Laserscanners aus zweidimensionalen Koordinaten bestehen, erfasst ein Radarsensor Abstände und Differenzgeschwindigkeiten.

Um ein Objekt wiederzuerkennen und zu verfolgen werden die Bewegungen der erkannten Objekte durch Modellannahmen geschätzt und anschließend durch Fensterfunktionen mit den neuen Messwerten verglichen (siehe Bild 4.2). Diese Fenster (engl. gates) beschreiben einen Unsicherheitsbereich, der durch Sensoreigenschaften festgelegt ist. Ihre Form kann kreis- bzw. elipsenförmig oder auch rechteckig sein. Kann ein Messwert einem vorhandenen Objekt nicht zugeordnet werden, so wird von der Objektverwaltung ein neues Objekt initialisiert. Wird ein Objekt nicht weiter durch Messwerte gestützt, muss es verworfen werden.

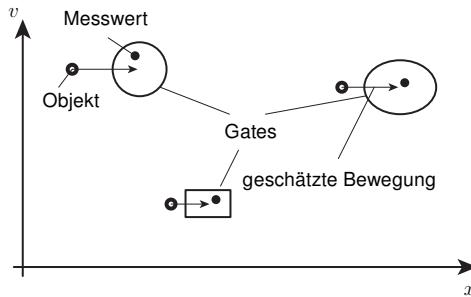


Bild 4.2: Fensterfunktionen zur Objektverfolgung

Dies kann entweder sofort geschehen oder die Objekthypothese wird für einen gewissen Zeitraum weiter aufrecht erhalten, um Messfehler zu überbrücken oder zwischen Erfassungsbereichen mehrerer Sensoren zu interpolieren.

## 4.2 Modelle

Zur Beschreibung der Dynamik eines beobachteten Systems werden Modelle eingesetzt. In Bild 4.3 ist das allgemeine diskrete Zustandsmodell eines linearen dynamischen Systems mit Systemrauschen und Messrauschen dargestellt. Die Zustandsgröße  $x(t)$  ändert sich hierbei in Abhängigkeit der Systemdynamik  $A$  und der Eingangsgröße  $u(t)$ . Durch das Prozessrauschen  $p(t)$  wird die Abweichung des Verhaltens zwischen idealisiertem Modell und realem Prozess berücksichtigt.

$$x(t+1) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + p(t) \quad (4.1)$$

Für nichtlineare Systeme wird die Änderung der Zustandsgröße durch die nichtlineare Funktion  $f$  beschrieben.

$$x(t+1) = f(x(t), u(t), p(t)) \quad (4.2)$$

Der Messvorgang wird durch die Matrix  $C$  beschrieben und stellt den physikalischen Erfassungsvorgang der Zustandsgrößen durch die Messgrößen  $y(t)$  dar. Das Messrauschen beschreibt die Größe  $q(t)$ .

$$y(t) = C \cdot x(t) + q(t) \quad (4.3)$$

Auch der Messvorgang kann Nichtlinearitäten unterworfen sein, die durch die Funktion  $h$  beschrieben werden.

$$y(t) = h(x(t), u(t), q(t)) \quad (4.4)$$

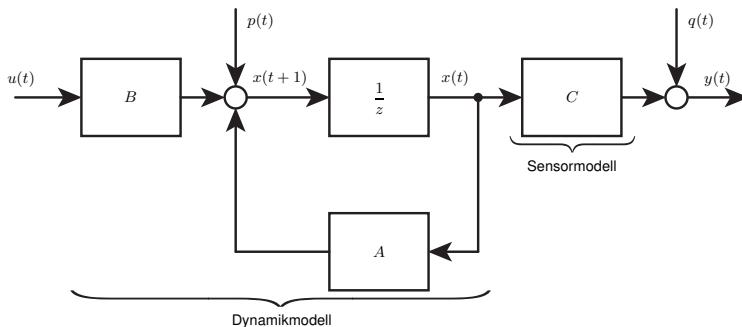


Bild 4.3: Zustandsraumdarstellung eines dynamischen Systems

#### 4.2.1 Dynamikmodelle

Bewegt sich ein Objekt im Erfassungsbereich eines Sensors, wird es während der Zielverfolgung durch ein Modell dargestellt. Dieses Modell kann, je nach Bedarf des Fahrerassistenzsystems und der Messwertgüte einfacher oder komplexerer Natur sein.

Einfache Modelle beschreiben die Objekte durch Bewegungsgleichungen erster oder zweiter Ordnung. Wird die Geschwindigkeit für einen Abtastschritt  $T$  konstant angenommen, ergibt sich der folgende Zusammenhang für Position und Geschwindigkeit. Die Störungen einer Beschleunigung  $a(t)$  werden durch die Matrix  $B$  berücksichtigt.

$$\begin{pmatrix} x(t+1) \\ v(t+1) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}_A \cdot \begin{pmatrix} x(t) \\ v(t) \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{2}T^2 \\ T \end{pmatrix}}_B \cdot a(t) \quad (4.5)$$

Beim Modell zweiter Ordnung ist die Beschleunigung ebenfalls eine Zustandsgröße, die durch die Bewegungsgleichung dargestellt wird. Die Änderung der Beschleunigung, der Ruck  $r(t)$  wirkt sich durch die Matrix  $B$  aus.

$$\begin{pmatrix} x(t+1) \\ v(t+1) \\ a(t+1) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_A \cdot \begin{pmatrix} x(t) \\ v(t) \\ a(t) \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{6}T^3 \\ \frac{1}{2}T^2 \\ T \end{pmatrix}}_B \cdot r(t) \quad (4.6)$$

In den beiden vorangegangenen Modellen wird die Bewegung des Objektes durch die unbekannte Größe  $a(t)$  bzw.  $r(t)$  bestimmt. Zur Verfolgung der Objekte werden für diese Werte statistische Verteilungen angenommen, die einem durchschnittlichen Fahrer im Straßenverkehr entsprechen und die physikalischen Eigenschaften eines Kraftfahrzeugs darstellen. Je nach Bedarf und Einsatzbereich können für die Objektbewegung auch komplexere Modelle zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens angesetzt werden. Im Straßenverkehr würde sich zum Beispiel das Einspurmodell anbieten, siehe hierzu Abschnitt 5.3.1.

### 4.2.2 Sensormodelle

Die Erfassung der Zustandsgrößen eines Systems durch einen physikalischen Sensor wird durch das Sensormodell beschrieben. Für einen umfelderfassenden Sensor sind vor allem die Position der umgebenden Objekte und deren Bewegung, die sich in Geschwindigkeit und Beschleunigung äußert, von Interesse. Die Bewegungsrichtung wird nur durch einen Winkel beschrieben, da sich die Fahrzeuge auf der Straße in einer Ebene befinden.

#### Radar

Der Radarsensor wurde bereits in Kapitel 3 vorgestellt. Aufgrund seines Funktionsprinzips kann ein Radarsensor nur den Abstand zu einem Objekt, den Winkel und die senkrechte Geschwindigkeitskomponente des Objektes erfassen. Dieser Zusammenhang ist in Bild 4.4 dargestellt.

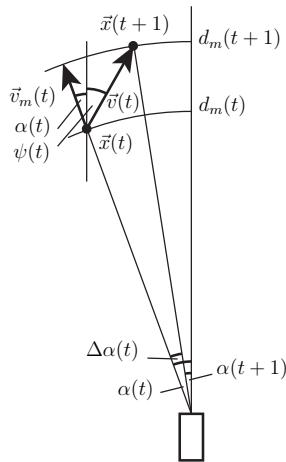


Bild 4.4: Erfassung von Abstand und Geschwindigkeit per Radar

Wird das Objekt durch die Zustandsgrößen Position:  $x(t)$  und  $y(t)$ , Geschwindigkeit:  $v(t)$  und die Bewegungsrichtung:  $\psi(t)$  beschrieben, so ergibt sich für die

Bewegung der folgende vereinfachte Zusammenhang.

$$x(t+1) = x(t) + T \cdot v(t) \cdot \cos(\psi(t) + T \cdot \dot{\psi}(t)) \quad (4.7)$$

$$y(t+1) = y(t) + T \cdot v(t) \cdot \sin(\psi(t) + T \cdot \dot{\psi}(t)) \quad (4.8)$$

$$v(t+1) = v(t) + T \cdot a(t) \quad (4.9)$$

$$\underbrace{\psi(t+1)}_{\vec{x}(t+1)} = \underbrace{\psi(t) + T \cdot \dot{\psi}(t)}_{f(x(t), u(t))} \quad (4.10)$$

Die Messgrößen des Radarsensors und die Zustandsgrößen weisen folgenden nicht-linearen Zusammenhang auf.

$$d_m(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (4.11)$$

$$\alpha_m(t) = \arcsin \left( \frac{y(t)}{\sqrt{x^2(t) + y^2(t)}} \right) \quad (4.12)$$

$$v_m(t) = v(t) \cdot \cos(\alpha_m(t) - \psi(t)) \quad (4.13)$$

## Laser

Ein Laserscanner erfasst ein Objekt über seine Konturen. Im Straßenverkehr ergibt sich daraus ein horizontaler Schnitt der umgebenden Fahrzeuge. Aus den Konturdaten werden Informationen zur Beschreibung der Fahrzeuggeometrie gewonnen. Dazu werden in einem Vorverarbeitungsschritt aus den Rohdaten drei Vektoren ermittelt, die drei Eckpunkte des erkannten Objekts beschreiben. Das sind die äußersten erfassten Punkte des Objektes links  $\vec{p}_l$  und rechts  $\vec{p}_r$  und der nahe gelegene Punkt  $\vec{p}_m$ . An diesen Punkten werden zwei Kanten gebildet. Aufgrund der Reflexionseigenschaften des Objektes muss es sich bei den ermittelten Koordinaten nicht um die realen Abmessungen handeln (siehe Bild 4.5).

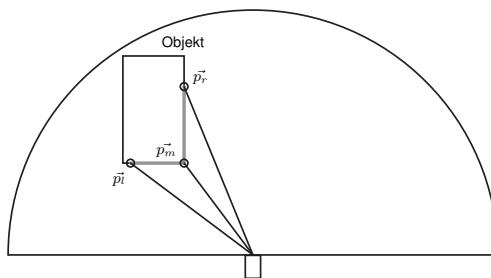


Bild 4.5: Erfassung von Objekten per Laser

Aus den Kanten des erfassten Objekts wird der geometrische Schwerpunkt ermittelt.

$$\vec{p}_o = \frac{1}{3} \cdot (\vec{p}_l + \vec{p}_r + \vec{p}_m) \quad (4.14)$$

### 4.3 Modellbasierte Filter

Der Erfassungsvorgang eines Objektes in der Umgebung unterliegt einigen Unsicherheiten. Diese Unsicherheiten sind zum einen im Rauschen des Sensors, bzw. einer unzureichenden Erfassung aller Zustandsgrößen begründet. Zum anderen unterliegt die Steuerung eines Fremdfahrzeugs im Verkehr den Entscheidungen eines anderen Fahrers, die nur bedingt vorhersagbar sind.

Anhand einfacher Modelle wird die Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer geschätzt. Dieser Schätzvorgang wird für gewöhnlich in zwei Schritte unterteilt und zwar in die Vorhersage der Bewegung anhand eines Prozessmodells und eine Korrektur des Vorhersagewerts anhand der aktuellen Messwerte. Die zu Grunde liegenden Modelle können sowohl linearer als auch nichtlinearer Art sein. Für lineare Modelle bietet das Kalmanfilter [24] eine optimale Lösung des Filterproblems. Für nichtlineare Prozesse gibt es Methoden zur Erweiterung des Kal-

manfilters [25] zum Extended Kalmanfilter und neue Verfahren, wie z.B. den Particlefiltern [26].

### 4.3.1 Kalmanfilter

Das Kalmanfilter ist eine Methode zur Schätzung der Zustandsgrößen eines dynamischen Systems. Dabei wird von einem linearen Prozessmodell ausgegangen, wie es in Bild 4.3 dargestellt ist. Für die Eigenschaften des Prozess- und des Messrauschens werden ebenfalls einige Annahmen getroffen. Die Werte sind gaußverteilt, mittelwertfrei und unkorreliert. Ihre statistischen Eigenschaften werden durch die Kovarianzmatrizen  $Q$  und  $R$  beschrieben.

$$E[p] = 0 \quad (4.15)$$

$$E[q] = 0 \quad (4.16)$$

$$E[p \cdot p^T] = Q \quad (4.17)$$

$$E[q \cdot q^T] = R \quad (4.18)$$

$$E[p \cdot q^T] = 0 \quad (4.19)$$

Das Filter besteht aus den zwei Stufen Vorhersage der Zustandsgrößen und Korrektur anhand neuer Messwerte. Nach der Initialisierung des Filters mit einem Startwert  $x(t_0)$  wird rekursiv der letzte Schätzwert  $\vec{x}'(t)$  durch die Systemgleichung  $A$  für einen Abtastschritt interpoliert. Der erwartete Messwert  $y^*(t+1)$  ergibt sich dann aus dem Sensormodell  $C$ .

$$\vec{x}^*(t+1) = A \cdot \vec{x}'(t) \quad (4.20)$$

$$\vec{y}^*(t+1) = C \cdot \vec{x}^*(t+1) \quad (4.21)$$

$$(4.22)$$

Zum Zeitpunkt  $t + 1$  wird der erwartete Messwert mit dem realen Messwert  $y(t + 1)$  verglichen. Die Differenz  $\nu(t + 1)$  beschreibt die Innovation, die das System während des letzten Zeitschritts erfahren hat. Die Ursachen hierfür sind sowohl das Messrauschen, als auch das Prozessrauschen. Anhand einer Verstärkermatrix  $K(t + 1)$  wird diese Innovation zur Korrektur des interpolierten Zustands genutzt.

$$\vec{\nu}(t + 1) = \vec{y}(t + 1) - \vec{y}^*(t + 1) \quad (4.23)$$

$$\vec{x}'(t + 1) = \vec{x}^*(t + 1) + K(t + 1) \cdot \vec{\nu}(t + 1) \quad (4.24)$$

Die Berechnung der Verstärkermatrix  $K(t)$  beruht auf einer Optimierung in Abhängigkeit der Kovarianzmatrizen  $Q$  und  $R$ . Auf die Herleitung der Berechnung soll hier verzichtet werden. Im Folgenden wird der Algorithmus zur Berechnung der Filtermatrix  $K$  beschrieben.

Die Matrix  $P(t)$  beschreibt die Kovarianz des Schätzfehlers. In Analogie zum Systemzustand selber wird auch der Schätzfehler für einen Zeitschritt in die Zukunft prädiziert.

$$P^*(t + 1) = A \cdot P(t) \cdot A^T + Q(t) \quad (4.25)$$

Der Messfehler kann analog behandelt werden. Durch die Matrix  $S(t)$  wird die Kovarianz der vorhergesagten Messgröße beschrieben. Sie kann auch als Innovation der Kovarianz des Schätzfehlers aufgefasst werden.

$$S(t + 1) = C \cdot P^*(t + 1) \cdot C^T + R(t + 1) \quad (4.26)$$

Die Verstärkermatrix  $K(t)$  ergibt sich aus  $P(t)$  und  $S(t)$  durch den folgenden

Zusammenhang (siehe [25]).

$$K(t+1) = P^*(t+1) \cdot C^T \cdot S^{-1}(t+1) \quad (4.27)$$

Anschließend erfolgt eine Korrektur der Kovarianz des Schätzfehlers anhand der neuen Verstärkermatrix.

$$P(t+1) = [I - K(t+1) \cdot C] \cdot P^*(t+1) \quad (4.28)$$

In Bild 4.6 ist die Struktur des Kalmanfilters dargestellt. Es entspricht in seiner Form einem Beobachter. Sind die beiden Kovarianzmatrizen  $Q$  und  $R$  zeitinvariant, so nähert sich die Lösung für die Verstärkermatrix  $K$  einem konstanten Wert an.

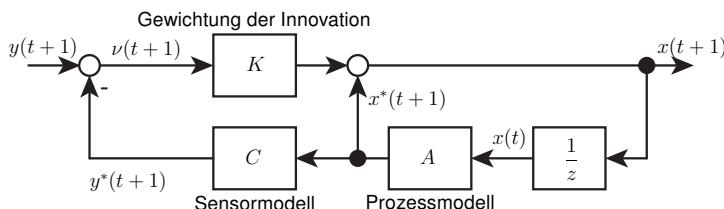


Bild 4.6: Aufbau des Kalmanfilters

In Bild 4.7 ist das Abstandssignal eines Radarsensors für eine Auffahrsituation dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das stark verausachte Signal (blau) in seinem Verlauf geglättet wird ohne eine große Phasenverschiebung aufzuweisen (rot), wie es beispielsweise bei einem einfachen Tiefpass der Fall wäre.

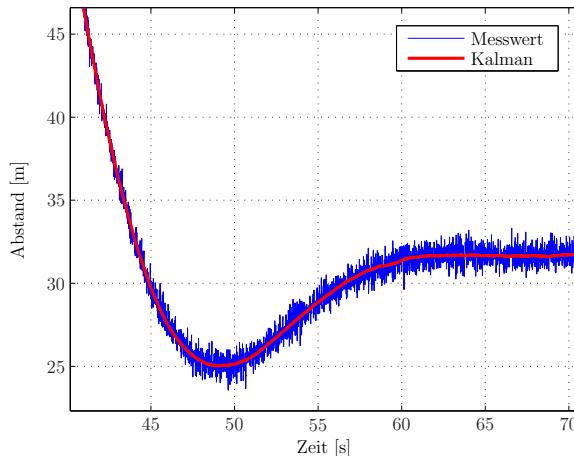


Bild 4.7: Vergleich gemessener und gefilterter Abstand

### 4.3.2 Erweitertes Kalmanfilter

Handelt es sich bei dem beobachteten Prozess um ein nichtlineares System, so kann das Kalmanfilter in seiner bisherigen Form nicht angewendet werden. Für das System liegt eine Beschreibung in der folgenden Form vor.

$$x(t+1) = f(x(t), u(t)) + p(t) \quad (4.29)$$

$$y(t) = h(x(t), u(t)) + q(t) \quad (4.30)$$

Zur Vorhersage des Schätzwertes  $\vec{x}^*(t+1)$  wird nun der nichtlineare Zusammenhang  $f$  genutzt. Zur Berechnung der Verstärkungsmatrix  $K(t)$  wird dieses Gleichungssystem im jeweiligen geschätzten Systemzustand  $x'(t)$  linearisiert, indem aus den Funktionen  $f$  und  $h$  die Jacobimatrizen gebildet werden. Zur genaueren Beschreibung des Filters sei auf [25] verwiesen.

$$A(t) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x'(t)} \quad (4.31)$$

$$C(t) = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=x^*(t+1)} \quad (4.32)$$

## 4.4 Zielauswahl

Die Funktionen zur Erkennung und Verfolgung von Hindernissen im Straßenverkehr erzeugen eine Liste der umgebenden Objekte. Die erzeugte Liste wird entweder an das Fahrerassistenzsystem übergeben, wie es beispielsweise beim Spurwechselassistenten der Fall ist. Oder es muss eine Auswahl der relevanten Hindernisobjekte, die dann dem Assistenzsystem zur Verfügung gestellt werden, erfolgen. Letzteres ist der Fall beim Abstandsregeltempomat. Hier ist es erforderlich, das Fahrzeug zu ermitteln, das auf der vorausliegenden Trajektorie das nächste Hindernis darstellen. Dazu wird die zukünftige Bahn des eigenen Fahrzeugs anhand eines Einspurmodells, wie es in Abschnitt 5.3.1 beschrieben wird, geschätzt. Mit Hilfe des Einspurmodells ergibt sich der Kurvenradius des Fahrzeugs aus der Änderung des Schwimmwinkels  $\beta$  und der Gierrate  $\dot{\psi}$  durch den folgenden Zusammenhang.

$$r = \frac{v}{\dot{\beta} + \dot{\psi}} \quad (4.33)$$

In Bild 4.8 sind die Zusammenhänge dargestellt. Um den Abstand des Hindernisses zur Trajektorie des Fahrzeugs zu errechnen, wird aus dem aktuell gefahrenen Kurvenradius  $r$  eine Kreisbahn gebildet und der Abstand des Hindernisses an der Stelle  $\vec{o}$  bestimmt.

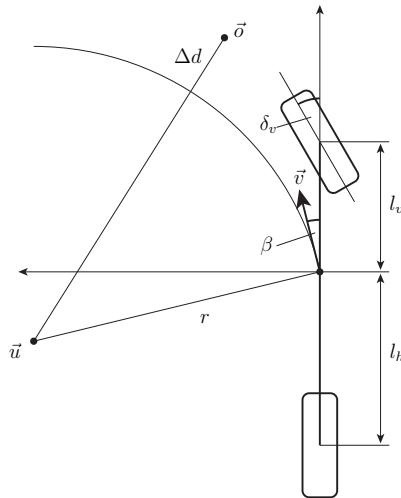


Bild 4.8: Ermittlung des Abstands eines Hindernisses zur Trajektorie

$$\vec{o} = \begin{pmatrix} o_x \\ o_y \end{pmatrix} \quad (4.34)$$

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -r \cdot \sin(\beta) \\ r \cdot \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

$$\Delta d = |\vec{o} - \vec{u}| - r \quad (4.36)$$

$$\Delta d = \sqrt{(o_x + r \cdot \sin(\beta))^2 + (o_y - r \cdot \cos(\beta))^2} - r \quad (4.37)$$

Liegt der Abstand zur Kreisbahn  $\Delta d$  innerhalb einer Toleranzschwelle wird das Objekt zu den relevanten Hindernissen hinzugefügt.

In Bild 4.9 ist die geschätzte Trajektorie des Fahrzeugs in der Simulationsumgebung visualisiert. Es ist ein Fahrzeug zu erkennen, das vom Algorithmus zur Zielauswahl als Hindernis erkannt wurde.

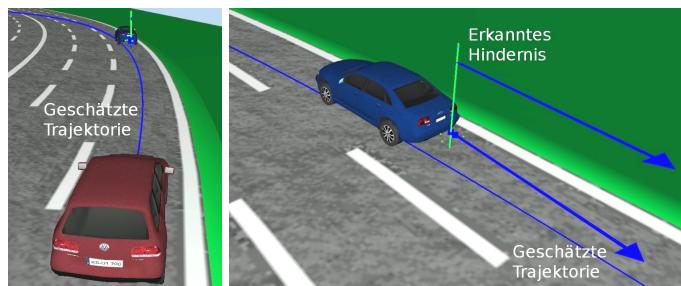


Bild 4.9: Ermittlung des Abstands eines Hindernisses zur Trajektorie

## 5 Fahrermodelle

Zum Entwurf neuer Systeme für den Verkehr, wie z.B. ein Verkehrsleitsystem oder ein Assistenzsystem zur Fahrzeugführung im Stau, ist es notwendig die Handlungsweise von Verkehrsteilnehmern näher zu betrachten. Mit Hilfe von Fahrermodellen wird versucht das Verhalten von Verkehrsteilnehmern zu untersuchen. Es existieren verschiedene Modelle, die unterschiedliche Aspekte des Fahrerverhaltens abbilden. Für Untersuchungen der Dynamik eines Fahrzeugs ist ein detailliertes Modell des Fahrers für das Lenkverhalten und die Geschwindigkeitsregelung notwendig. Der Fahrer muss das Fahrzeug reproduzierbar in definierte Dynamikbereiche bringen, um Untersuchungen vornehmen zu können. In [21] ist ein Verfahren beschrieben, um ein Fahrermodell mit Hilfe neuronaler Netze Geschwindigkeitsprofile geregelt nachfahren zu lassen. Diese Modelle dienen der Betrachtung individueller Fahrzeuge.

Ist für ein System das Verhalten mehrerer Fahrzeuge interessant, so muss die Interaktion der Fahrer untereinander nachgebildet werden. Ab einer gewissen Verkehrsdichte agieren Verkehrsteilnehmer nicht mehr individuell, sondern werden durch die umgebenden Fahrzeuge beeinflusst. Im direkten Umfeld muss der modellierte Fahrer geeignet auf seine Umgebung reagieren. Die Geschwindigkeit muss angepasst werden und Entscheidungen zum Kurs getroffen werden. Im weiteren Umfeld entstehen zusätzlich zur individuellen Interaktion Effekte, die sich aus dem Gruppenverhalten ergeben. In großen Fahrzeugkolonnen bilden sich Wellen und Stockungen aus.

Aufgrund der Komplexität des menschlichen Verhaltens im Verkehr werden makroskopische Ansätze zur Beschreibung des Gruppenverhaltens und mikroskopische Betrachtungen des einzelnen Fahrers unterschieden. In Bild 5.1 ist das Prinzip dieser Unterscheidung dargestellt. Modelle zur makroskopischen Betrachtung

zielen auf die Darstellung vieler Fahrzeuge ab und vernachlässigen die individuelle Genauigkeit einzelner Fahrer. Die Realitätsnähe ergibt sich aus dem Verhalten der gesamten Gruppe. Mikroskopische Modelle bilden die Interaktion zwischen individuellen Fahrern ab und sind nur für kleinere Gruppen gültig. Diese Modelle zielen nicht auf die Darstellung vieler Fahrzeuge ab.

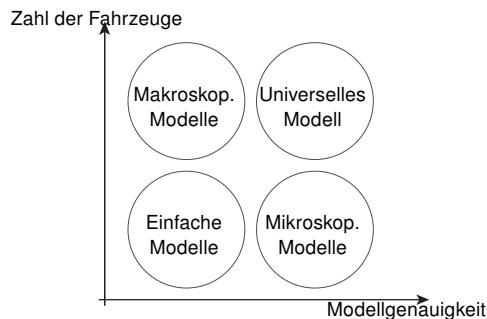


Bild 5.1: Fahrermodelle

## 5.1 Makroskopische Betrachtung

Aus makroskopischer Sicht wird der Verkehr anhand eines Ansatzes ähnlich der „Thermodynamik“ beschrieben. Es werden nicht einzelne Fahrzeuge dargestellt, sondern der Verkehr als eine Art Massenstrom modelliert. Die Fahrzeuge auf der Straße werden durch die beiden Zustandsgrößen Fahrzeugdichte [Fz/km] und Verkehrsstau [Fz/h] beschrieben.

In Bild 5.2 sind Trajektorien von Fahrzeugen dargestellt, die einem Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit folgen müssen. Diese Messungen entstammen einem komplexeren Modell, das in Abschnitt 5.5 genauer beschrieben wird. Es wurde der zurückgelegte Weg auf der Straße über der Zeit aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich nach anfänglicher Stabilität, Wellen durch die Kolonne bewegen, die letztendlich auch zu einem Stau führen. Bemerkenswert ist das Ergebnis von

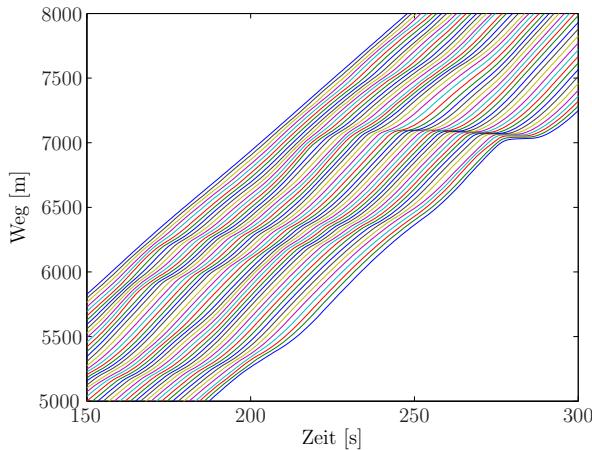


Bild 5.2: Wellen im dichten Verkehr

Untersuchungen [3], die belegen, dass es sich bei der Ausbreitungsgeschwindigkeit nahezu um eine Konstante handelt, die ca. 15 km/h beträgt.

Zur genaueren Beschreibung dieses Phänomens werden Stichproben der beiden Zustandsgrößen Fahrzeugdichte und Verkehrsfluss im sog. Fundamentaldiagramm dargestellt. Die Proben sammeln sich um einen Kurvenverlauf, der die Kapazität der Straße beschreibt. In Bild 5.3 ist ein typischer Verlauf im Fundamentaldiagramm dargestellt. Bei geringer Verkehrsfläche bildet sich auf der Straße ein freier Verkehrsfluss und den Fahrern wird ermöglicht mit frei wählbarer Geschwindigkeit zu fahren. Mit steigender Dichte werden die Fahrzeuge zunehmend in den Verkehrsfluss eingebunden und es wird ein maximaler Verkehrsfluss  $Q_{max}$  erreicht. Steigt die Dichte weiter, bilden sich in der Fahrzeugkolonne die ersten Wellen aus, die sich mit  $v_s$  entgegen der Fahrtrichtung ausbreiten.

### 5.1.1 Beispiel: Nagel-Schreckenberg-Modell

Beim Nagel-Schreckenberg-Modell handelt es sich um ein einfaches Modell zur Beschreibung großer Fahrzeugmengen. Das Modell [3] wurde von den Physikern

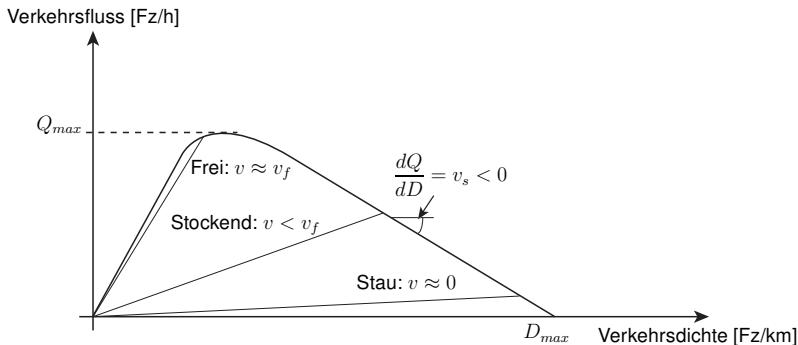


Bild 5.3: Fundamentaldiagramm

Kai Nagel und Michael Schreckenberg entwickeln und gibt für die Bewegung der Fahrzeuge einfache Regeln vor. Das mikroskopische Verhalten der einzelnen Verkehrsteilnehmer wird hierbei durch ein stark vereinfachtes Modell nachgebildet. Erst aus dem Gruppenverhalten entsteht ein realistisches Abbild des Straßenverkehrs. Es handelt sich dabei um ein diskretes Modell, das die Straße in räumliche Zellen unterteilt. Anhand der folgenden relativ einfachen Regeln wird das Verhalten der einzelnen Fahrer bestimmt.

- Die Geschwindigkeit wird erhöht, falls die Wunschgeschwindigkeit nicht erreicht ist.
- Die Geschwindigkeit wird dem Abstand zum Vordermann angepasst.
- Die Geschwindigkeit wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit  $p$  reduziert, um „Trödeln“ nachzubilden.
- Das Auto wird der Geschwindigkeit entsprechend vorwärts bewegt.

Dieses Modell mit einfachen Regeln liefert für das Verhalten von Fahrern im Stau relativ gute Ergebnisse und ist in der Lage, das Phänomen des „Staus aus dem Nichts“ zu beschreiben. Der Stau entsteht durch den beschriebenen „Trödelfaktor“ und ist ab einer gewissen Verkehrsdichte unvermeidlich. In den Trajektorien der Fahrzeuge im Stau sind im Zustandsraum Wellenfunktionen zu beobachten,

die sich entgegen der Fahrtrichtung bewegen. Das beschriebene Modell wird zur Durchführung von Verkehrsprognosen genutzt oder zur Planung neuer Straßenverläufe. Als Beispiel für ein weiterführendes Modell sei hier das Modell von Wiedemann [4] genannt, auf das in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen wird.

## 5.2 Mikroskopische Betrachtung

Ein Ziel des DECOS-Projektes ist die Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen im Straßenverkehr. Dazu ist es notwendig, das Verhalten der Verkehrsteilnehmer detaillierter zu beschreiben, als es das Verfahren im vorausgegangenen Abschnitt kann. Es ist eine korrekte Abbildung des Verhaltens eines einzelnen Fahrers gefordert, um seine Interaktion mit dem Fahrzeug, der Straße und den übrigen Verkehrsteilnehmern zu untersuchen. Die einzelnen Fahrer sollen ein individuelles Verhalten aufweisen, das sich durch Beschleunigungs- und Bremsmanöver äußert und sie sollen ebenfalls auf andere Verkehrsteilnehmer reagieren. Außerdem soll das Fahrzeug in der Spur gehalten werden, um das Lenkverhalten nachzubilden und so auch Überholmanöver zu ermöglichen. Die zu untersuchenden Vorgänge finden in einem Zeitraum von wenigen Sekunden bis einigen Minuten statt. Während dieser Zeit sollen die sich die Fahrer autonom im Verkehr bewegen. Aus diesen Anforderungen wurde ein Fahrermodell entwickelt, das im Folgenden vorgestellt wird.

Häufig wird die Strategie des Fahrers in drei Ebenen unterteilt, die sein Verhalten im Verkehr beschreiben und die sich auch im Modell wiederfinden.

**Stabilisieren:** Der Fahrer stabilisiert das Fahrzeug während der Fahrt, um Grenzsituationen zu vermeiden, wie z.B. hohe Querbeschleunigungen oder Schleudern.

**Bahnführung:** Das Fahrzeug wird auf der gewünschten Trajektorie im Verkehr geführt, indem die Geschwindigkeit geregelt, Abstände eingehalten und die Spur gehalten werden.

---

**Navigation:** Hier fallen strategische Entscheidungen. Es wird die zukünftige Route im Straßennetz geplant und die vorausliegende Bahn, wie z.B. Spurwechsel und Überholvorgänge, festgelegt.

Zum Test von Fahrerassistenzsystemen und zur Untersuchung der Auswirkungen auf den Straßenverkehr ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Modelle der Fahrer, die im Folgenden aufgeführt werden.

**Erfassen:** Ein menschlicher Fahrer erfasst seine Umwelt im Verkehr nahezu vollständig visuell. Der optische Erfassungsvorgang über das Auge bestimmt die Qualität der Informationen über das Umfeld. Es muss sowohl die räumliche Erfassung als auch die zeitliche Wahrnehmung berücksichtigt werden, da ein Mensch nur einen begrenzten Wahrnehmungsbereich und eine gewisse Reaktionszeit aufweist.

**Situation auswerten:** Aus den Informationen, die ein Fahrer aus seiner Umgebung gewinnt, wird das Bild einer Verkehrssituation gebildet. Diese Situation beschreibt das Umfeld, in dem der Fahrer sich bewegt. Interessante Größen sind die Abstände zu den übrigen Verkehrsteilnehmern und die Relativgeschwindigkeiten. Zusätzliche Informationen beschreiben die eigene Position auf der Straße.

**Entscheiden:** Aufgrund der Umgebungsinformationen trifft der Fahrer Entscheidungen, die sein weiteres Handeln beschreiben. Verschiedene Ziele bestimmen seine Aktionen. Zum einen möchte der Fahrer sicher und komfortabel reisen und zum anderen zügig vorankommen. Basierend auf persönlichen Präferenzen werden Geschwindigkeit und Spurwechsel geplant.

**Fahrzeugführung:** Die Regelung des Fahrzeugs umfasst die Maßnahmen des Fahrers, seine gewählten Fahrmanöver durchzuführen, wie z.B. das Halten der Geschwindigkeit oder das Wechseln der Spur, aber auch unterbewusste Aktionen, wie die Folgefahrt oder das Spurhalten.

## 5.3 Fahrzeugmodell

Im Folgenden Abschnitt wird ein Modell zur Beschreibung der Längs- und Querdynamik beschrieben. Mittels dieses Fahrzeugmodells bewegt sich das Fahrermodell im Straßenverkehr.

### 5.3.1 Querdynamik

Zur Beschreibung der Fahrzeugquerdynamik wird das Einspurmodell verwendet. In diesem Modell wird der vierrädrige PKW auf ein zweirädriges Fahrzeug, wie in Bild 5.4 dargestellt, reduziert.

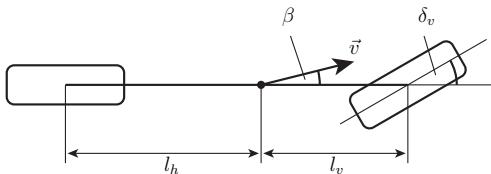


Bild 5.4: Einspurmodell

Zur mathematischen Beschreibung werden die Kräftegleichungen in x- und in y-Richtung und die Momentengleichung um die Hochachse aufgestellt. Das Fahrzeug fährt dabei eine Kurve mit dem Kurvenradius  $\rho$ . Auf die Räder wirken die Umfangskräfte  $F_{xv}$  und  $F_{xh}$ , die Querkräfte  $F_{yv}$  und  $F_{yh}$  und auf den Fahrzeugaufbau der Luftwiderstand  $F_{lx}$  und der Seitenwind  $F_{ly}$  mit dem Versatz  $e_{sp}$  zum Schwerpunkt. Zusammen mit der Zentripetalkraft und der Trägheit ergeben sich folgende Zusammenhänge.

$$m \frac{v^2}{\rho} \sin(\beta) - m \dot{v} \cos(\beta) + F_{xh} - F_{lx} + F_{xv} \cos(\delta_v) - F_{yv} \sin(\delta_v) = 0 \quad (5.1)$$

$$m \frac{v^2}{\rho} \cos(\beta) + m \dot{v} \sin(\beta) - F_{yh} - F_{ly} - F_{xv} \sin(\delta_v) - F_{yv} \cos(\delta_v) = 0 \quad (5.2)$$

$$J_z \ddot{\psi} - (F_{yv} \cos(\delta_v) + F_{xv} \sin(\delta_v)) l_v + F_{yh} l_h - F_{ly} e_{sp} = 0 \quad (5.3)$$

Um diese Gleichungen zu linearisieren werden einige Vereinfachungen getroffen. Die Querkräfte auf die Reifen  $F_{yv}$  und  $F_{yh}$  sind abhängig vom sog. Schräglaufwinkel, der die Abweichung der Bewegungsrichtung des Reifens von seiner Längsachse beschreibt. Der Zusammenhang zwischen Querkraft und Schräglaufwinkel ist von sehr komplexer Natur, da ein Reifen durch seinen flexiblen Aufbau schwierig zu beschreiben ist. In Kennlinien ist allerdings für kleine Winkel ein linearer Zusammenhang zu erkennen, der durch die Seitenkraftbeiwerte  $c_{\alpha v}$  und  $c_{\alpha h}$  beschrieben wird.

$$F_{yv} = c_{\alpha v} \alpha_v \quad (5.4)$$

$$F_{yh} = c_{\alpha h} \alpha_h \quad (5.5)$$

Die Schräglaufwinkel vorne und hinten können für kleine Winkel durch geometrische Zusammenhänge dargestellt werden.

$$\alpha_v = -\beta + l_h \frac{\dot{\psi}}{v} \quad (5.6)$$

$$\alpha_h = -\beta - l_v \frac{\dot{\psi}}{v} + \delta_v \quad (5.7)$$

Die Krümmung  $\rho$  kann durch den folgenden Zusammenhang ersetzt werden.

$$\frac{v^2}{\rho} = v \cdot (\dot{\beta} + \dot{\psi}) \quad (5.8)$$

Mit Hilfe dieser Vereinfachungen ergibt sich ein linearer Zusammenhang, der in Zustandsform ausgedrückt werden kann. Gleichung (5.9) beschreibt die Längsdynamik, während Gleichung (5.10) die Querdynamik in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Lenkwinkels beschreiben. Die geometrischen Zusammenhänge für die Winkel  $\beta$  und  $\delta_v$  werden dabei durch folgende Annahmen vereinfacht:

$\sin(\beta) \approx \beta$  und  $\cos(\beta) \approx 1$ , für kleine Winkel. Der Seitenwind wird vernachlässigt.

$$m\dot{v} = F_{xv} + F_{xh} - F_{lx} \quad (5.9)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\beta} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{c_{\alpha h} + c_{\alpha v}}{mv} & \frac{c_{\alpha h}l_h - c_{\alpha v}l_v}{mv^2} - 1 \\ \frac{-c_{\alpha v}l_v + c_{\alpha h}l_h}{J_z} & \frac{-c_{\alpha v}l_v^2 - c_{\alpha h}l_h^2}{J_z} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{c_{\alpha v}}{mv} \\ \frac{c_{\alpha v}l_v}{J_z} \end{pmatrix} \cdot \delta_v \quad (5.10)$$

Es ist zu erkennen, dass dieses Modell für geringe Geschwindigkeiten und den Stillstand numerische Instabilitäten aufweist. Aus dem Grund wird für geringe Geschwindigkeiten, auf ein kinematisches Modell zurückgegriffen. Dieses Modell beruht auf den folgenden vereinfachenden Annahmen.

$$\beta = \delta_v \cdot \frac{l_h}{l_v + l_h} \quad (5.11)$$

$$\dot{\psi} = v \cdot \frac{\sin(\delta_v)}{l_v + l_h} \quad (5.12)$$

### 5.3.2 Längsdynamik

Das Modell der Längsdynamik ist in Bild 5.5 dargestellt. Der Motor wird durch eine laufzeitbehaftete Strecke erster Ordnung nachgebildet und erzeugt aus dem angeforderten Wunschmoment  $M_{\text{sol}}$  das Motormoment. Der Antriebsstrang besteht aus dem Getriebe mit der Übersetzung  $\ddot{u}_{\text{Getr}}$ , der Kupplung, der Achse und den Reifen und wird vereinfacht durch ein schwingungsfähiges System zweiter Ordnung dargestellt. Die resultierende Antriebskraft bewegt das Fahrzeug vorwärts. Die Fahrwiderstände bestehend aus Luftwiderstand und Reibungseffekten werden im Block „Längsdynamik“ berücksichtigt.

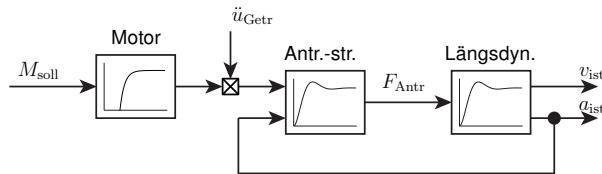


Bild 5.5: Modellierung der Längsdynamik

## 5.4 Wahrnehmung

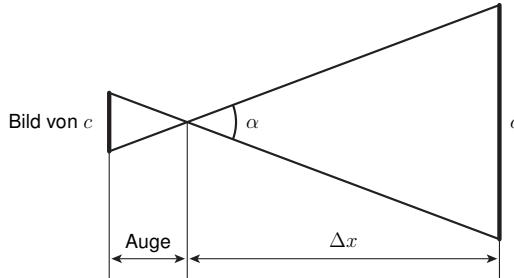


Bild 5.6: Wahrnehmung von Relativbewegungen

Entscheidend für das Verhalten des Fahrers ist ein Modell, das die Wahrnehmung des Fahrers beschreibt. Für das Folgeverhalten ist das Einschätzen des Abstands und der Differenzgeschwindigkeit anderer Verkehrsteilnehmer maßgeblich. In [4] wird ein Modell für die Erfassung von Objekten durch das menschliche Auge vorgestellt, das im Folgenden näher erläutert wird. Es geht auf mehrere Untersuchungen zurück, die bereits in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts begonnen haben. In Bild 5.6 ist dargestellt, wie ein Objekt, das sich im Verkehr bewegt, vom Auge erfasst wird. Das Objekt wird dabei vereinfacht durch die Breite  $c$  abstrahiert. Für den Winkel  $\alpha$ , der das Verhältnis von Objektbreite zu Entfernung angibt, ergibt sich der folgende Zusammenhang.

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{c}{2\Delta x} \quad (5.13)$$

$$\Rightarrow \alpha \approx \frac{c}{\Delta x} \quad (5.14)$$

(5.15)

Eine Änderung der Entfernung  $\Delta x$  verursacht die folgende Winkeländerung:

$$\frac{d\alpha}{d\Delta x} = \frac{-c}{\Delta x^2} \quad (5.16)$$

Geschwindigkeiten des Objektes äußern sich in einer Änderung des Winkels um  $d\alpha$ . Für Differenzgeschwindigkeiten  $\Delta v$  ergibt sich:

$$d\Delta x = \Delta v dt \quad (5.17)$$

$$d\alpha = \frac{-cd\Delta x}{\Delta x^2} \quad (5.18)$$

$$d\alpha = \frac{-c\Delta v dt}{\Delta x^2} \quad (5.19)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{-c\Delta v}{\Delta x^2} \quad (5.20)$$

Untersuchungen zeigen, dass sich der Grenzwert der Wahrnehmbarkeit von  $\frac{d\alpha}{dt}$  zwischen  $3 \cdot 10^{-4}$  und  $10 \cdot 10^{-4}$  rad/sec bewegt. Ein menschlicher Fahrer ist also nicht in der Lage, Relativgeschwindigkeiten wahrzunehmen, die sich durch Winkeländerungen unter diesem Wert ausdrücken. Die beschriebenen Wahrnehmungsschwellen sind zudem abhängig vom Vorzeichen der Differenzgeschwindigkeit. Beobachtungen zeigen, dass Fahrer auf einen abnehmenden Abstand eher reagieren als auf einen Zunehmenden. Das erklärt sich zum einen aus den geometrischen Abhängigkeiten in Bild 5.6 und zum anderen aus psychologischen Gründen, da ein abnehmender Abstand auch eine Gefahr bedeuten kann.

Es sei darauf hingewiesen, dass diese Modellvorstellung nur für den mittleren

Entfernungsbereich von einigen Metern bis einigen Hundert Metern gültig ist und im Nahbereich, im Fernbereich oder unter einem anderen Sichtwinkel andere Mechanismen zur Geschwindigkeitswahrnehmung hinzukommen.

## 5.5 Folgeverhalten

In [4] wird ein Modell für das Folgeverhalten hergeleitet. Es beruht auf einer Gleichung, zur Beschreibung der Beschleunigung in Abhängigkeit von der Differenzgeschwindigkeit  $\Delta v$  und dem Abstand  $\Delta x$ . Diese Gleichung wird Fahrzeugfolgegleichung genannt.

$$a(t) = \lambda \cdot v(t)^m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x^l} \quad (5.21)$$

Untersuchungen zeigen, dass die Parameter  $m = 0$  und  $l = 2$  gute Übereinstimmungen mit dem realen Folgeverhalten zeigen. In dieser vereinfachten Form ist zu erkennen, dass sich die Beschleunigung proportional zur Wahrnehmung der Geschwindigkeit verhält, siehe Gleichung (5.20).

$$a(t) = \lambda \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x^2} \quad (5.22)$$

Werden die beschriebenen Wahrnehmungsgrenzen aus Abschnitt 5.4 im Zustandsdiagramm eingetragen, ergeben sich Kurvenverläufe, wie sie in Bild 5.7 skizziert sind. Die Kurven  $\Delta x_{op}$  und  $\Delta x_{cl}$  beschreiben die Wahrnehmungsschwelle für geringe Geschwindigkeitsdifferenzen bei kleinen Abständen. In [4] werden weitere Grenzen angegeben, die das Verhalten bei größeren Abständen und im Nahbereich beschreiben. Durch  $\Delta x_{sd}$  wird die Wahrnehmungsschwelle bei großen Abständen beschrieben. Überschreitet der Abstand eine Schwelle  $\Delta x_{kg}$  liegt keine Beeinflussung durch das andere Fahrzeug mehr vor. Durch die Parameter  $\Delta x_{fu}$  und  $\Delta x_{fo}$  wird das Schätzvermögen des Fahrers angegeben. Sie begrenzen den

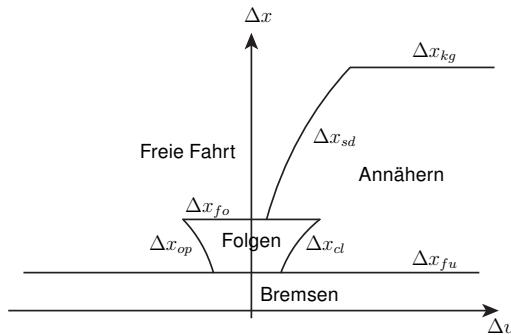


Bild 5.7: Zustandsdiagramm für das Folgemodell nach [4]

Bereich, in dem der Fahrer in den unbewussten Folgebereich gerät. Zur genauen Parametrierung dieser Werte sei auf [4] verwiesen.

Im Zustandsdiagramm ergeben sich somit vier Bereiche, die vereinfacht das Handeln eines Fahrers beschreiben.

**Freie Fahrt:** Der Fahrer fährt entsprechend seiner Wunschgeschwindigkeit, oder passt seine Geschwindigkeit den gesetzlichen Vorgaben bzw. den Straßen- und Sichtverhältnissen an. Im Modell wird dieses Verhalten durch einen einfachen Regler realisiert. Andere Modelle berücksichtigen hier weitere Effekte wie Unaufmerksamkeiten oder überhöhte Geschwindigkeiten. Diese Effekte sind aber stochastischer Natur und für die hier vorgestellten Untersuchungen nicht interessant.

**Annähern:** Nähert sich der Fahrer einem vorausfahrenden Fahrzeug auf der Straße, so beginnt er, seine Geschwindigkeit zu reduzieren, um die Relativgeschwindigkeit zu verringern und einen Sicherheitsabstand einzustellen. Die Beschleunigung ergibt sich aus dem Bemühen des Fahrers, den Sicherheitsabstand  $\Delta x_{fu}$  einzustellen und wird durch den folgenden Zusammenhang beschrieben. Der Beschleunigungswert wird auf einen Maximalwert begrenzt, der die Eigenschaften des Fahrzeugs widerspiegelt. Im Gegensatz

zum später beschriebenen „Bremsen“ handelt es sich hier um eine kontrollierte Verzögerung.

$$a = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta v^2}{\Delta x - \Delta x_{fu}} \quad (5.23)$$

**Folgen:** Im Bereich kleiner Abstände und geringer Relativgeschwindigkeiten befindet sich der Fahrer im Zustand des unbewussten Folgens. Differenzgeschwindigkeiten werden nur bei Überschreiten der Schwellwerte wahrgenommen. Dementsprechend ergibt sich die Beschleunigung während der Folgefahrt aus dem letzten Gaspedalwert des Fahrers beim Überschreiten der Wahrnehmungsschwelle. Es ergibt sich dadurch ein pendelnder Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die Zykluslänge liegt laut [4] zwischen 6 und 12 Sekunden.

**Bremsen:** Bei Unterschreiten eines Sicherheitsabstandes  $\Delta x_{fu}$  wird durch ein Bremsmanöver wieder ein größerer Abstand eingestellt. Dieses Bremsen ist eher unkontrolliert und die Verzögerung entspricht einer kurzen Betätigung der Bremse.

In Bild 5.8 ist die Trajektorie eines Fahrers dargestellt, der sich einem vorausfahrenden Fahrzeug nähert. Es ist zu erkennen, dass sich nach dem Annäherungsvorgang ein Grenzzyklus für den Abstand einstellt.

## 5.6 Spurhalteverhalten

Der Fahrer gewinnt während der Fahrt auf der Straße Informationen über seine Position in der Fahrspur. In der Simulationsumgebung wird diese Position aus den Fahrzeugkoordinaten  $\vec{p}$  (siehe Abschnitt 3.1), der Fahrzeugausrichtung  $\psi$  und dem Modell der Straße errechnet[11]. Das ist zum Einen der Abstand zur Mittellinie bzw. die Abweichung von der Mitte der Fahrspur, zum Anderen die Ausrichtung des Fahrzeugs im Bezug auf die Straße.

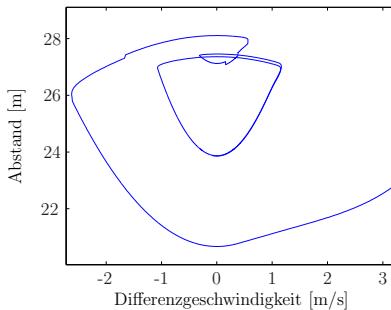


Bild 5.8: Trajektorie während einer Folgefahrt

Das Prinzip der Regelung ist in Bild 5.9 dargestellt. Der gewählte Abstand zur Mittellinie  $o_{\text{soll}}$  wird mit dem aktuellen Abstand  $o_{\text{ist}}$  verglichen. Durch diesen Vergleich wird das Bestreben beschrieben, das Fahrzeug in der Spurmitte zu halten. Als Regler wurde ein PI-Regler ausgewählt, der dem intuitiven Verhalten des Fahrers entsprechen soll. Auf Fehler im Spurabstand wird mit einem abstandsproportionalen Korrekturwert und einem langsamen integrierenden Verhalten reagiert.

Zusätzlich erfolgt am Reglerausgang eine Vorsteuerung des Winkels  $\Delta\psi$  zwischen Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeugs und der Richtung der Straße. Diese Vorsteuerung stellt das Bemühen dar, das Fahrzeug parallel zur Spur zu führen.

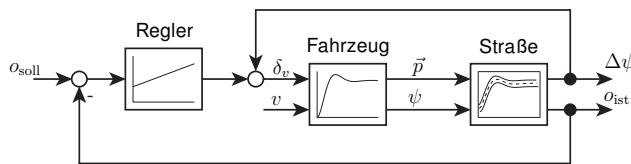


Bild 5.9: Spurregelung des Fahrermodells

In Bild 5.10 ist der Verlauf des Lenkwinkels während eines Spurwechsels dargestellt.

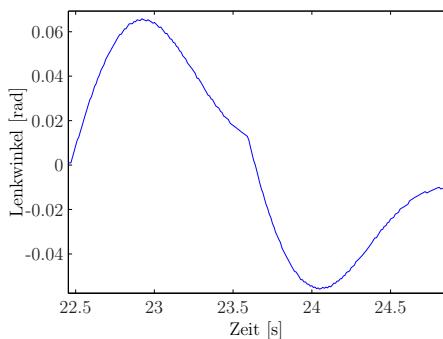


Bild 5.10: Lenkwinkelverlauf während eines Spurwechsels

## 5.7 Überholverhalten

Auf mehrspurigen Straßen ist die Nachbildung des Überholverhaltens eines Fahrers sehr wichtig für die realistische Darstellung des Straßenverkehrs. Während ein Fahrer auf einspurigen Straßen gezwungen ist, dem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen, kann er auf einer mehrspurigen Straße die für ihn günstigste Fahrspur wählen. Bevor es jedoch zu einem Spurwechsel kommt, muss sich der Fahrer auf Grund seiner Umgebungsinformationen dazu entschließen, dass er auf seiner jetzigen Spur nicht mit der gewünschten Geschwindigkeit vorankommt. Zusätzlich muss die Situation auf den Nachbarspuren einen Spurwechsel innerhalb gewisser Sicherheitsgrenzen erlauben. In Bild 5.11 ist die umgebende Situation um ein Fahrzeug dargestellt. Die anderen Verkehrsteilnehmer werden dabei durch Abstände und Differenzgeschwindigkeiten beschrieben.

Vereinfacht betrachtet ist ein Fahrer unzufrieden, falls er auf der aktuellen Spur seine Wunschgeschwindigkeit nicht erreichen kann und möchte die Spur wechseln. In der Realität äußert sich dieser Wunsch durch ein komplexes strategisches Verhalten, da der Fahrer vorausschauend fährt und unter Umständen bereits weit im Voraus Entscheidungen trifft, die sein Vorankommen begünstigen.

Zur Beschreibung des Überholverhaltens im Fahrermodell wird der Prozess der Entscheidungsfindung in zwei Schritte unterteilt. Zum Einen muss der Fahrer

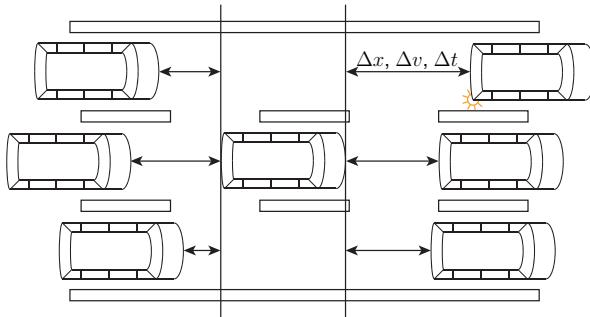


Bild 5.11: Situation im Fahrerumfeld

zu dem Wunsch kommen seine Spur zu wechseln. Dazu wird die umgebende Verkehrssituation analysiert.

Um in dem Fahrer den Wunsch zum Überholen zu wecken, wird das bisherige Modell um weitere Grenzen erweitert. In Bild 5.12 ist das erweiterte Zustandsdiagramm dargestellt.

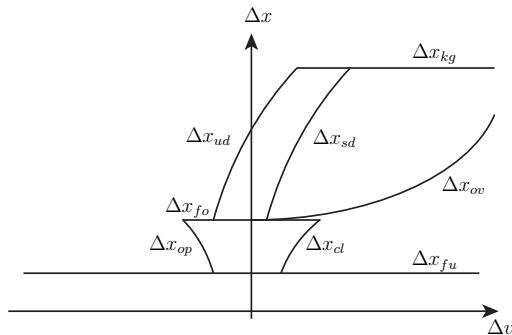


Bild 5.12: Erweiterung des Folgemodells nach Wiedemann

Die Grenze  $\Delta x_{ud}$  beschreibt einen Bereich, in dem der Fahrer zwar noch frei fährt, aber bereits unzufrieden ist mit seiner aktuellen Fahrspur, da er sich ei-

nem langsamer fahrenden Hindernis nähert. Die Grenze  $\Delta x_{ud}$  existiert ebenfalls für negative Differenzgeschwindigkeiten. Durch diese Kennlinie wird eine gewisse Ungeduld nachgebildet, das vorausfahrende Fahrzeug zu überholen, um schneller die eigene Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Dementsprechend ändert sich sein weiteres Verhalten während des Annäherungsvorgangs, da sein Handeln auf den bevorstehenden Spurwechsel hinzielt. Wichtig für die Entscheidung sind die Abstände und Differenzgeschwindigkeiten auf der Zielspur. Zur Intention des Fahrers zu Überholen müssen zusätzlich die folgenden Bedingungen erfüllt sein<sup>1</sup>, die den Wünschen des Fahrers und den Bedingungen auf der benachbarten Fahrspur entsprechen:

Die aktuelle Geschwindigkeit liegt unter der Wunschgeschwindigkeit:

$$v < 0,95 \cdot v_{soll} \quad (5.24)$$

Der Abstand zum voraus fahrenden Fahrzeug liegt unter der Tolernzschwelle  $\Delta x_{ud}$ :

$$\Delta x_f < \Delta x_{ud} \quad (5.25)$$

Ein auf der linken Spur folgendes Fahrzeug nähert sich, kann aber noch mit einer zumutbaren Verzögerung  $a_{gr}$  verzögern:

$$\Delta v_{rl} > 0 \text{ und } \Delta x_{rl} > 0,5 \frac{\Delta v_{rl}^2}{a_{gr}} + \Delta x_{fo} \quad (5.26)$$

Oder der Abstand vergrößert sich und liegt unter der Schwelle  $\Delta x_{fo}$ :

$$\Delta v_{rl} < 0 \text{ und } \Delta x_{rl} > \Delta x_{fo} \quad (5.27)$$

Sind die vorausgehenden Bedingungen erfüllt, führt die zusätzliche Grenze  $\Delta x_{ud}$  dazu, dass der Fahrer seinen üblichen Annäherungsvorgang nicht durchführt und sich mit unveränderter Geschwindigkeit nähert.

<sup>1</sup> Indizierung:

$f$  = front

$r$  = rear

$fl$  = front left

$rr$  = rear right

etc.

Nach dem Annäherungsvorgang mit dem Ziel des Spurwechsels wird vor dem eigentlichen Lenkmanöver überprüft, ob der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug auf der linken Spur dem Sicherheitsbedürfniss des Fahrers entspricht.

$$\Delta x_{fl} > \Delta x_{fu} \quad (5.28)$$

Erst bei Unterschreiten des Sicherheitsabstandes, der durch die Bremsparabel  $\Delta x_{ov}$  beschrieben wird, beginnt der Überholvorgang oder ein Bremsvorgang wird eingeleitet, falls ein Überholen nicht möglich ist.

$$\Delta x_f < \Delta x_{ov} \quad (5.29)$$

Zu Beginn des Überholvorgangs wird der Fahrtrichtungsanzeiger (Blinker) gesetzt, um den anderen Fahrern den Spurwechsel anzukündigen. Der Spurwechsel wird durch Setzen einer neuen Sollspur eingeleitet und durch den Spurregler aus Abschnitt 5.6 ausgeführt.

Mit Hilfe des Blinkers kann auch auf Fahrzeuge reagiert werden, die im Begriff sind, die Spur zu wechseln. Bei einem blinkenden Fahrzeug wird mit einem baldigen Spurwechsel gerechnet und aus dem Grund wird es bei der Berechnung der Sicherheitsabstände und Geschwindigkeitsdifferenzen sowohl auf der aktuellen Spur wie auch auf seiner Zielspur angenommen.

Da es einem Fahrzeug auf der Autobahn verboten ist rechts zu überholen, reagieren die Fahrermodelle ebenfalls auf Fahrzeuge auf den linken Spuren und leiten gegebenenfalls ein Überholmanöver ein.

## 6 Anwendung

In diesem Kapitel werden die praktischen Anwendungen beschrieben, die während der Projektlaufzeit realisiert wurden. Für das DECOS-Projekt und für industrielle Anwendungen wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, die einen umfangreichen Test von Fahrerassistenzsystemen ermöglicht. Diese Umgebung beinhaltet komplexe Modelle des Testfahrzeugs, des Verkehrs und der Umfeldsensorik. Die Implementierung beruht auf einem modularen Ansatz, um eine flexible Anbindung verschiedener Systeme und eine schnelle Änderung der getesteten Szenarien und Sensorkonfigurationen zu gestatten.

### 6.1 Implementierung der Simulationsumgebung

Die vorgestellten neuen Fahrerassistenzsysteme beobachten ihre Umgebung und das Testfahrzeug mit einer Vielzahl an Sensoren und greifen in viele Fahrfunktionen ein. Aufgrund dessen kommt es zu einem hohen Datenaufkommen, das in der Simulationsumgebung geeignet behandelt werden muss. Es wurde deshalb eine modulare Struktur entworfen, wie sie in Bild 6.1 dargestellt ist. Das Bild zeigt die verschiedenen Möglichkeiten, die sich durch die erstellte Simulationsumgebung ergeben. Die Daten der Sensormodelle können durch die beschriebenen Tracking-Verfahren aus Kapitel 4 ausgewertet werden. Zusätzlich ist der Rahmen geschaffen worden, die Daten der verschiedenen Sensoren zu fusionieren, um verlässlichere Daten der Umgebung aus verschiedenen Sensoren zu gewinnen. Das Thema der Datenfusion ist nicht Teil dieser Arbeit.

Die einzelnen Module wurden in der Programmiersprache C++ [28] implementiert. Dadurch ist es möglich, verschiedene Sensorkonfigurationen und Methoden zur Sensordatenauswertung zu einer Struktur zusammenzufügen. Es wurden

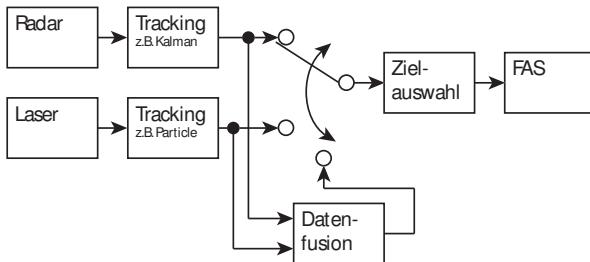


Bild 6.1: Struktur der Sensorauswertung

grundlegende Formate definiert, denen die Modelle der Sensoren und der Sensordatenverarbeitung entsprechen müssen. Von diesen grundlegenden Modellen werden die einzelnen spezifischen Modelle abgeleitet, so dass in der Simulation z.B. das Modell eines Radarsensors durch einen Laserscanner ersetzt werden kann. Die erzeugten Sensordaten können dann von den Algorithmen zur Zielverfolgung weiterverarbeitet werden. Anschließend ist es möglich, aus den Sensordaten die relevanten Zielobjekte für das Fahrerassistenzsystem auszuwählen.

### 6.1.1 SiL-Simulation

Während der Entwicklung ist es von Vorteil, neue Funktionen in einer Softwareumgebung zu testen, die eine einfache Anwendung erlaubt und alle Prozessgrößen zur Beobachtung zur Verfügung stellt. Dazu wurde eine sog. SiL-Umgebung (siehe Abschnitt 2.1) erstellt, mit der die neuen Module in Form von Quelltext oder als Simulink-Modell in die virtuelle Umwelt eingebunden werden können[11]. Aufgrund der Modularität der einzelnen Module und der Portabilität der Implementierung ist eine hohe Durchgängigkeit entstanden, die eine schnelle Portierung der Simulationsumgebung vom PC auf den HiL-Simulator gestattet.

Die Struktur der SiL-Umgebung ist in Bild 6.2 dargestellt. Auf dem PC wurde ein Server implementiert, der alle Zustandsgrößen der Simulation in einer Datenbank verwaltet. Die simulierten Fahrzeuge können visualisiert werden und weitere Simulationsmodule über eine Programmierschnittstelle angebunden werden.

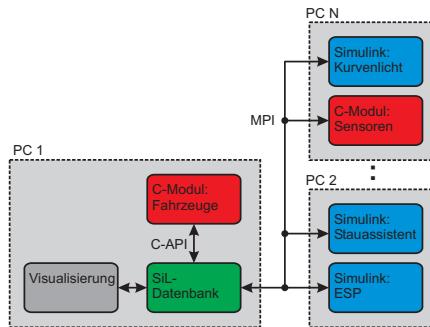


Bild 6.2: Struktur der SiL-Umgebung

Die zu testenden Assistenzsysteme werden in Simulink implementiert und über eine Netzwerkschnittstelle in die Simulation eingebunden. Diese Netzwerkschnittstelle erlaubt die verteilte Implementierung einer Simulation und wird über das Netzwerkprotokol MPI (Message Passing Interface) realisiert.

### 6.1.2 HiL-Simulation

Die im DECOS-Projekt entwickelten und implementierten Assistenzsysteme wurden auf einer Prototypenhardware implementiert (siehe Abschnitt 6.2). Um die Hardware in Echtzeit zu betreiben, wurde die vorgestellte Simulationsumgebung auf einen HiL-Simulator portiert. Es handelt sich dabei um einen leistungsstarken Rechner, der mit einem Echtzeitbetriebssystem ausgerüstet ist. Er verfügt über verschiedene Schnittstellen zum Anschluss von Komponenten aus dem Automobilbereich. Die Versuchshardware wird über eine CAN-Schnittstelle angegeschlossen. In Bild 6.3 ist die Struktur des Prüfstandes dargestellt.

Der PC zur Visualisierung der Simulationsdaten ist in diesem Fall über eine Netzwerkschnittstelle mit dem Echtzeitrechner verbunden. Die SiL-Datenbank wird über diese Schnittstelle mit der Datenbank des HiL-Rechners synchronisiert, um die Visualisierung zu steuern und Messwerte darzustellen.

In Bild 6.4 ist ein Foto des Prüfstands zu sehen. Das Testfahrzeug kann sowohl

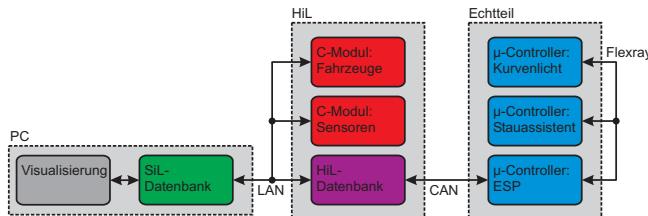


Bild 6.3: Struktur der HiL-Umgebung

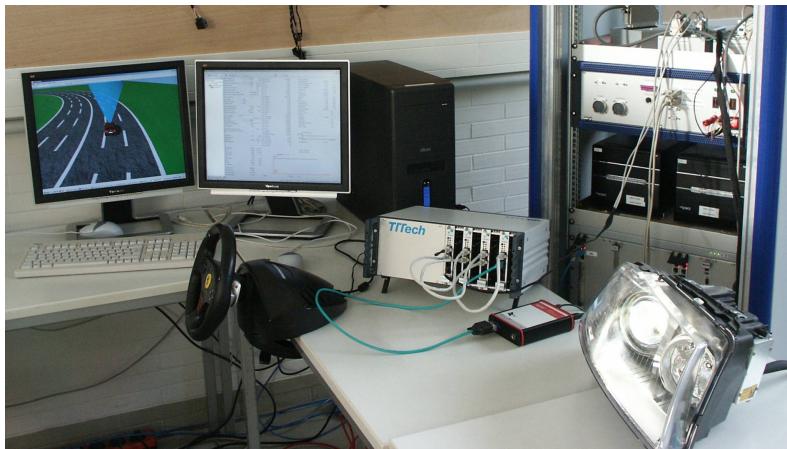


Bild 6.4: Prüfstand mit HiL, DECOs-Hardware und Scheinwerfer

von einem Fahrermodell gesteuert werden, als auch manuell über ein Lenkrad durch den Verkehr gesteuert werden. An die CAN-Schnittstelle des Rechners sind die Prototypenhardware und ein adaptives Kurvenlicht angeschlossen.

## 6.2 Implementierung der DECOs-Funktionen

Auf Basis der im DECOs-Projekt erarbeiteten Grundlagen, die in Abschnitt 2.4 beschrieben werden, erfolgte eine praktische Implementierung, siehe [29]. Die Ziel-

plattform ist ein Verbund von Rechnern, die über einen Flexray-Bus miteinander verbunden sind. In Bild 6.5 ist ein Foto der Hardware zu sehen. Der Verbund besteht aus vier Rechnern, die mit leistungsstarken TriCore-Prozessoren ausgerüstet sind.



Bild 6.5: Rechencluster mit Flexrayschnittstelle

Die Werkzeuge, die im DECOS-Projekt entwickelt wurden, trennen den Entwurf der Funktionen, die Architektur der Zielhardware und die Verteilung der Anwendungen in einem Verbund von Steuergeräten. Die Modelle der Steuer- und Regelalgorithmen werden im Simulink oder UML erstellt und es wird anschließend automatisiert verifizierter Funktionscode erzeugt. Die Eigenschaften der Hardware werden getrennt davon konfiguriert. Im einem dritten Werkzeug werden die Funktionen definiert, in denen die erzeugten Algorithmen eingebettet werden. Es werden ebenfalls Schnittstellen festgelegt, über die mit anderen Funktionen Daten ausgetauscht werden. Zudem können einzelne Funktionen aus Sicherheitsgründen redundant ausgeführt werden. Der Prozess der Verteilung der Anwendungen und der Festlegung der Kommunikationswege erfolgt automatisiert anhand von diversen Optimierungskriterien.

Zur Demonstration der entwickelten Technologien wurde mit den neuen Entwicklungswerkzeugen eine verteilte Architektur mit verschiedenen Assistenzfunktionen entworfen, so wie sie in Bild 6.6 dargestellt ist.

## 6.3 Test von FAS

Im Folgenden werden Ergebnisse von Untersuchungen an den Fahrerassistenzsystemen vorgestellt. Es wurden Verkehrssituationen nachgestellt, in denen das

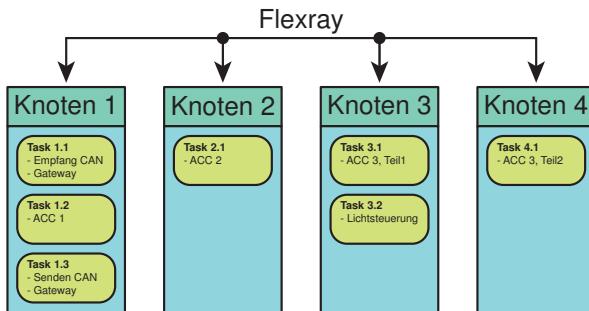


Bild 6.6: Partitionierung der Assistenzsysteme

entsprechende Fahrerassistenzsystem seine Funktion unter Beweis stellen musste. Hiermit sollen die Möglichkeiten aufgezeigt werden, die sich durch die erstellte Simulationsumgebung ergeben. Im Projekt DECOs wurden mehrere Validierungsziele verfolgt. Neben dem eigentlichen Testen der Funktionalität sollen die Effekte durch die Verteilung, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben untersucht werden. Des Weiteren soll die Robustheit des Systems, die sich durch eine redundante Implementierung ergibt, nachgewiesen werden.

### 6.3.1 Abstandsregeltempomat, ACC

Bei dem getesteten Abstandsregeltempomaten handelt es sich um einen Prototypen zur Längsführung eines Fahrzeug im Geschwindigkeitsbereich 0...180 km/h. Er ermöglicht zusätzlich ein automatisches Wiederanfahren, nachdem das Fahrzeug zum Stehen gekommen ist. Das System arbeitet mit einem Fernbereichsradarsensor, der die in Tabelle 3.2 aufgeführten Eigenschaften besitzt. Der Sensor ist am Fahrzeug in der vorderen Stoßstange montiert.

Um die Vorteile einer redundanten Implementierung aufzuzeigen, wurde das ACC-System in dreifacher Ausführung, also doppelter Redundanz, auf dem Cluster implementiert, wie in Bild 6.6 dargestellt. Eine Implementierung des ACC wurde auf zwei Rechner verteilt. Mit Hilfe eines einfachen Vergleichs wird die Konsistenz der ACC-Daten überprüft. Stimmen zwei von drei Signalen überein

wird das berechnete Ausgangssignal akzeptiert und an das Motorsteuergerät, bzw. das simulierte Fahrzeug, weitergeleitet. Diese Methode ist die einfachste Möglichkeit einer Plausibilisierung der Steuersignale. In einer praktischen Implementierung wären Mehr Maßnahmen zur Plausibilisierung notwendig, um alle Fehlerquellen abzudecken. Anbieten würden sich hier ebenfalls ein Vergleich der Eingangsdaten, Zeitstempel der Signale oder errechnete Checksummen.

In Bild 6.7 ist der Verlauf des errechneten Solldrehmoments dargestellt. Das Fahrzeug befindet sich in einer Stop&Go-Situation. Nach einem kurzen Abtrennen einer ACC-Version vom Gesamtsystem im zweiten Beschleunigungsvorgang ist zu erkennen, wie sich das Ausgangssignal wieder dem Verlauf der beiden verbliebenen ACC-Versionen anpasst. Zur Verdeutlichung ist in grün das „sync“-Signal dargestellt, dass die Zahl der abweichenden ACC-Signale anzeigt und die Weiterleitung des Gesamtsignals an den Aktor, in diesem Fall das Motorsteuergerät, freigibt.

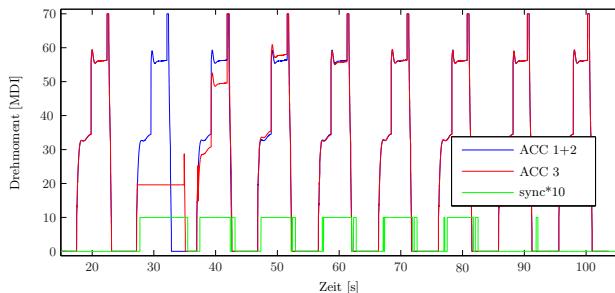


Bild 6.7: Synchronisieren eines redundanten ACC

In Bild 6.8 ist der Ausfall zweier redundanter ACC-Versionen dargestellt. Nach Ausfall des ersten ACC-Systems kann immer noch ein eindeutiger Wert ermittelt werden. Nach Ausfall des zweiten Systems sind die Daten inkonsistent und der verbliebene Regler wird vom Motor getrennt. Im Anschluss übernimmt der Fahrer, bzw. das Fahrermodell wieder die Kontrolle über das Fahrzeug.

Zur Untersuchung des Systemverhaltens wurde das simulierte Testfahrzeug mit dem ACC ausgerüstet und verschiedenen Verkehrssituationen ausgesetzt. In der

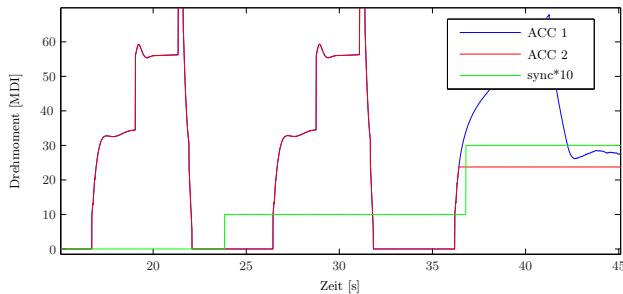
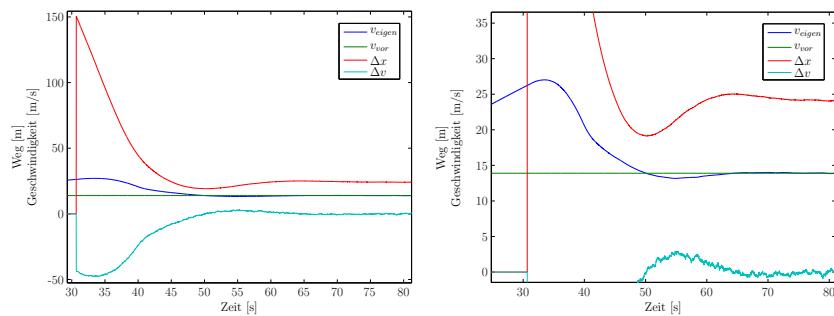


Bild 6.8: Ausfall zweier ACC-Versionen

ersten Situation fährt das Fahrzeug auf ein langsameres Hindernis auf. Der Verlauf von Geschwindigkeit, Abstand und Differenzgeschwindigkeit ist in Bild 6.9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Abstand ein Minimum von ca. 19m durchläuft und sich dann auf einen konstanten Abstand von ca. 24m einpendelt. Bei einer Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs von 50km/h entspricht der empfohlene Sicherheitsabstand ca. 15m, der hier auch eingehalten wird.

Bild 6.9: Auffahrsituation  $v = 50\text{km/h}$ , rechts: vergrößerter Ausschnitt

In Bild 6.10 ist der Verlauf für die gleiche Situation bei der Geschwindigkeit  $v = 100\text{km/h}$  dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der Abstand diesmal aperiodisch einem Wert von ca. 40m nähert. Der vom Gesetzgeber geforderte Abstand beträgt bei  $v = 100\text{km/h}$  für Autobahnfahrten 50m, die Grenze für eine

Geldstrafe liegt bei 25m.

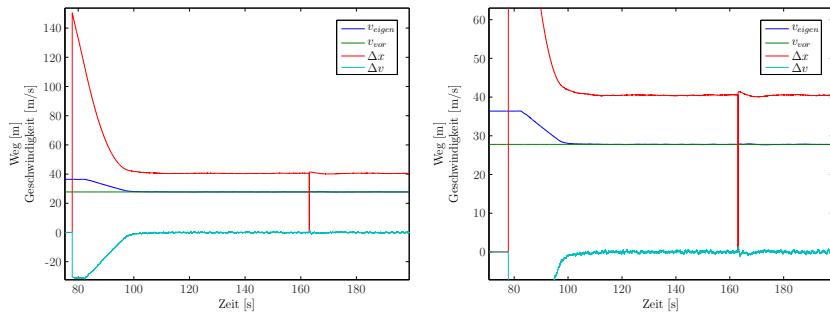


Bild 6.10: Auffahrsituation  $v = 100\text{km/h}$ , rechts: vergrößerter Ausschnitt

Die Robustheit des Systems ist vor allen Dingen in kurvigen Straßenverläufen gefordert. Dazu wurden Testläufe auf einen nahezu kreisförmigen Straßenverlauf durchgeführt. In Bild 6.11 ist der Verlauf des Abstands und der Differenzgeschwindigkeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass auf Grund des Kurvenradius das Ziel ständig den Erfassungsbereich des Radarsensors verlässt und so eine Dauerschwingung zustande kommt. Ebenfalls lässt sich erkennen, dass nach Verlust des Zielobjekts nicht sofort ein abrupter Beschleunigungsvorgang beginnt. Dieser Effekt kann den implementierten Komfortfunktionen des ACC zugeschrieben werden.

Durch weitere geeignete Maßnahmen könnte dieses Schwingungsverhalten reduziert werden, indem z.B. das erfasste Objekt nach Verlassen des Erfassungsbereichs als Objekthypothese für einen gewissen Zeitraum weiterverfolgt wird. In Bild 6.12 ist die Problematik dieser Auffahrsituation in der Kurve noch einmal anschaulich dargestellt.

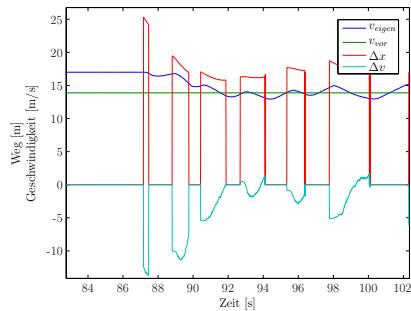


Bild 6.11: Auffahrsituation, Kreisfahrt  $v = 50\text{km/h}$

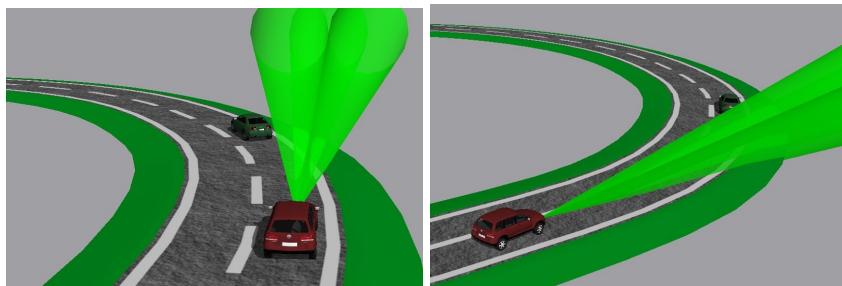


Bild 6.12: Auffahrsituation

## 7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein neues Konzept zum Test von neuen Assistenzsystemen vorgestellt. Die in Kapitel 1 vorgestellten Systeme können in der erstellten Simulationsumgebung in einem Umfang getestet werden, wie es andere Testumgebungen nicht ermöglichen.

In Kapitel 2 werden die Entwicklungsmethoden vorgestellt, die neue Funktionalitäten durchlaufen, bis sie Einzug in die Serienfahrzeuge halten. Der Trend geht dabei in Richtung hoher Durchgängigkeit von den ersten Ideen bis zur Produktreihe. Hierzu sind Werkzeuge notwendig, neue Systeme schnell und einfach definieren und implementieren zu können. Schon die ersten Modelle der Systeme werden dabei durch Simulationen erprobt. Die vorgestellte Simulationsumgebung ist in der Lage, den Entwicklungsprozess vom ersten Modellentwurf bis zum Serientest zu begleiten. Die Umgebung kann als reine Softwareumgebung für Simulationen genutzt werden. Matlab/Simulink hat sich hierbei in der Industrie als ein Quasistandard etabliert. Durch die Implementierung der Simulationsumgebung auf einem HiL-System können die Systemfunktionen im Abschluss der Entwicklung ebenfalls in der Serienvariante getestet und validiert werden.

In Kapitel 3 werden Sensormodelle vorgestellt, die sich so in keiner Simulationsumgebung finden. Aus den beschriebenen Erfassungsmechanismen werden Modelle abgeleitet die alle relevanten Umgebungseinflüsse nachbilden können, wie z.B. Wanken und Nicken des Fahrzeugs oder die Überdeckung mehrerer Hindernisse, wie andere Fahrzeuge, die Straße oder andere Objekte am Straßenrand. Ein Fahrzeug, das sich in dieser Simulationsumgebung bewegt kann jetzt mit den Assistenzsystemen und den Sensormodellen ausgerüstet werden. Zur Anregung dieses Gesamtsystems sind nun Umgebungsbedingungen notwendig, die einem

realistischen Verkehr entsprechen. Aus diesem Grund werden in Kapitel 5 Fahrermodelle für das Folgeverhalten vorgestellt. Diese wurden um Regeln für die Querföhrung und das Überholverhalten ergänzt. So kann das System in seinen Auswirkungen auf den Straßenverkehr getestet werden.

Die ersten Untersuchungen in Kapitel 6 zeigen die Mächtigkeit des Systems auf. Es ist eine sichere Erprobung von Fahrerassistenzsystemen ermöglicht worden. Durch die umfangreiche Simulationsumgebung wird eine große Testabdeckung geboten. Ohne die Notwendigkeit von praktischen Tests mit Testfahrzeugen und Testfahrern ist es möglich auch die komplexesten Situationen sicher und reproduzierbar nachzustellen.

---

## Literatur

- [1] Die Bundesregierung, „Unfallverhütungsbericht Straßenverkehr 2004/2005“, *Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung*.
- [2] Statistisches Bundesamt, *Verkehr, Verkehrsunfälle 2002*, Fachserie 8/ Reihe 7.
- [3] Kai Nagel und Michael Schreckenberg, „A cellular automaton model for freeway traffic“, *J. Phys. I France* 2 (1992) 2221-2229.
- [4] Rainer Wiedemann, „Simulation des Straßenverkehrsflusses“, *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe*, Heft 8, 1974.
- [5] heise Autos, „My Car is my Castle - Verkehrsoziologische Anmerkungen zur Aggression im Verkehr“, <http://www.heise.de/autos/artikel/s/3944>.
- [6] Julien H. Simon, „Learning to drive with Advanced Driver Assistance Systems. Empirical studies of an online tutor and a personalised warning display on the effects of learnability and the acquisition of skill.“, Dissertation, Technischen Universität Chemnitz.
- [7] Gerald Meier, „Automatische Fahrzeuglängsführung mittels Trajektorien-Folgeregelung“, VDI Berichte Nr. 1828, 2004.
- [8] „Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - Autoreg 2006“, 3. Fachtagung Wiesloch, 7. und 8. März 2006, VDI-Berichte 1931.
- [9] Dietmar Kant, „DECOS Deliverable 5.1.1 – Simulation platform for automotive driver assistance and collision warning and avoidance systems“, Mai 2005.
- [10] Christian O. Schmidt, „Hardware-in-the-Loop gestützte Entwicklungsplattform für Fahrerassistenzsysteme - Analyse und Generierung kritischer Verkehrsszenarien“, Universität Kassel, Diss., 2010.
- [11] Carsten Schmidt, „Hardware-in-the-Loop-gestützte Entwicklungsplattform für Fahrerassistenzsysteme - Modellierung und Visualisierung des Fahrzeugfeldes“, Universität Kassel, Diss., 2011.
- [12] Verburg, Dirk J.; Van der Knaap, Albert C. M.; Ploeg, Jeroen: „Vehil“, IEEE Intelligent Vehicle Symposium IV02, Versailles, 18. - 20. Juni 2002.

- [13] Bernhard Schick, Rolf Büttner, Klaus Baltruschat, Günther Meier, Heiko Jakob, „Bewertung der Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen bei aktivem Bremseingriff“, Automobiltechnische Zeitschrift, ATZ, Mai 2007.
- [14] heise Autos, „Virtuelle Entwicklung am Beispiel der C-Klasse“, <http://www.heise.de/autos/artikel/s/4208>.
- [15] Tomas Akenine-Möller, Eric Haines, „Real-Time Rendering“, A K Peters, Natick, Massachusetts, 2002.
- [16] James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, John F. Hughes, „Computer Graphics Principles and Practice“, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [17] Merrill I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGraw-Hill Book Company, 1970.
- [18] Klaus Kark, *Antennen und Strahlungsfelder*, Vieweg, 2006.
- [19] Werner Gerlitzki, *Die Radargleichung Ableitung, Parameter, Formen, Beispiele*, AEG-Telefunken, 1984.
- [20] Wilhelm Lehfeld, *Ultraschall*, Vogel-Verlag, 1973.
- [21] M. Ayeb, H. Theuerkauf, D. Lichtenthaler, N. Schuck, *Neuro-Fahrer: Geregeltes Nachfahren von Fahrgeschwindigkeitsprofilen mit dynamischen neuro-nalen Netzen*, in der Reihe VDI-Berichte, Band Nr. 1672, S. 677 ff, April 2002
- [22] Jack Kinney, *Motor Mania*, Walt Disney Productions, 30. Juni 1950.
- [23] Jan-Carsten Becker, *Fusion der Daten der objekterkennenden Sensoren eines autonomen Straßenfahrzeuges*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 948, VDI Verlag, 2002.
- [24] R. E. Kalman, “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”, *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, 82 (Series D): 35-45, 1960.
- [25] Yaakov Bar-Shalom, Xiao-Rong Li, *Estimation and Tracking: Principles, Techniques, and Software*, Artech House, 1993.
- [26] Rudolph van der Merwe, Arnaud Doucet, Nando de Freitas, Eric Wan, “The unscented particle filter”, *Technical Report CUED/F-IXFEXG/TR 380*, August 16, 2000.
- [27] Kai Müller, *Entwurf robuster Regelungen*, B.G. Teubner Stuttgart, 2002.
- [28] Bjarne Stroustrup, *The C++ programming language*, Addison-Wesley-Longman, 2006.

- [29] Klaus Simon, „Portierung eines Fahrerassistenzsystems auf einen Rechen-Cluster“, Universität Kassel, Diplomarbeit, 2007.
- [30] Kay Fürstenberg, Klaus Dietmayer, „Fahrzeugumfelderfassung mit mehrzeiligen Laserscannern“, Technisches Messen 71 (2004) 3, Oldenbourg Verlag

ISBN 978-3-86219-266-3