

Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
Institut für Systemdynamik und Flugmechanik

## **Fähigkeiten zur Missionsdurchführung und Landmarkennavigation**

Rudolf Gregor

Vollständiger Abdruck der von  
der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
der Universität der Bundeswehr München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. R. Onken  
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. E.D. Dickmanns  
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. G. Färber

Die Dissertation wurde am 15.03.2002 bei der Universität  
der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, Werner-Heisenberg-Weg 39,  
eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
am 17.04.2002 angenommen.

Tag der Promotion: 12.09.2002



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik an der Universität der Bundeswehr München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. D. Dickmanns gebührt mein besonderer Dank für die Anregung zu dieser Arbeit, seine zahlreichen wertvollen Hinweise und die ausgezeichneten Rahmenbedingungen am Institut.

Ebenso möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Färber für die freundliche Übernahme des Koreferats bedanken.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Onken für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Für die vielfältige Unterstützung und die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen gerade in der Anfangsphase meiner Tätigkeit bin ich insbesondere meinen Kollegen vom "Tower-Team", namentlich S. Baten, Dr. M. Lützeler, Prof. Dr.-Ing N. Müller und V. von Holt zu Dank verpflichtet; außerdem danke ich S. Fürst, U. Hofmann, Dr. M. Maurer, Dr. K.-D. Otto, M. Pellkofer, Dr. A. Rieder und K.-H. Siedersberger für die gute Zusammenarbeit auch in schwierigen und stressigen Projektabschnitten.

Herrn Dr. M. Lützeler danke ich zudem für die gründliche Durchsicht des Manuskripts.

Den Mitarbeitern der Werkstatt, J. Hollmayer, E. Oestereicher und R. Stömmer, danke ich für die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Bei unserer guten Seele des Instituts, Frau M. Gabler, möchte ich mich für die Beschaffung der zahlreichen Literatur und die Bereitstellung der Betriebsmittel, insbesondere des Kaffees, recht herzlich bedanken.

IV

**Hanna, Lena und Birgit gewidmet**

# Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept zur Planung und Durchführung von komplexen Fahrmissionen eines autonomen Landfahrzeugs vorgestellt. Die explizite Repräsentation der einzelnen Fähigkeiten des Systems zur Wahrnehmung und Fortbewegung erlaubt zusammen mit einem Aktivierungs- und Kontrollmechanismus den effizienten Einsatz der Systemressourcen. Auf der Grundlage von Hintergrundwissen über das Operationsgebiet und die Leistungsfähigkeit der eigenen Fähigkeiten werden die langfristigen Aktionen geplant. Während der Missionsdurchführung werden die für den aktuellen Zeitpunkt geplanten Aktionen im System zur Verfügung gestellt. Eine Hierarchie von Entscheidungsinstanzen ist zuständig für die situationsgerechte Aktivierung der erforderlichen Fähigkeiten. Durch den ständigen Abgleich der resultierenden Fahrzeugbewegungen mit den geplanten Aktionen und durch die Positionsbestimmung an Landmarken wird der Fortschritt innerhalb der Mission auf mehreren zeitlichen und örtlichen Ebenen bestimmt. Nach Abschluß einer Fahrmission wird der Datengehalt der Hintergrundwissensbasen mit den gemachten *Erfahrungen* verglichen und bei Bedarf aktualisiert.

Das entwickelte Konzept wurde im autonomen Versuchsfahrzeug VAMORS realisiert und in verschiedenen Demoszenarien ausgiebig getestet. Im Rahmen einer zusammenhängenden Fahrmission konnten die Aufgaben *Navigation auf einem Wegenetz*, *Navigation im Gelände*, *Positionsbestimmung an Landmarken* und die Transition zwischen den Domänen *Straße* und *Gelände* in beiden Richtungen erfolgreich demonstriert werden.



# Inhaltsverzeichnis

|  |          |
|--|----------|
| <b>Kurzfassung</b>   | <b>V</b> |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Intelligenz und Autonomie bei Fahrzeugen? . . . . .          | 3        |
| 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung . . . . .                   | 4        |
| 1.3 Struktur der Arbeit . . . . .                                | 5        |
| <b>2 Stand der Technik</b>                                       | <b>7</b> |
| 2.1 Autonome und semiautonome Landfahrzeuge . . . . .            | 7        |
| 2.1.1 Amerikanische Gruppen . . . . .                            | 7        |
| 2.1.1.1 Carnegie Mellon University . . . . .                     | 8        |
| 2.1.1.2 National Institute of Standards and Technology . . . . . | 9        |
| 2.1.1.3 University of California, Berkeley . . . . .             | 9        |
| 2.1.2 Europäische Gruppen . . . . .                              | 9        |
| 2.1.2.1 IITB . . . . .   | 9        |
| 2.1.2.2 Daimler Benz . . . . .                                   | 10       |
| 2.1.2.3 Dornier . . . . .  | 11       |
| 2.1.2.4 Universität Parma . . . . .                              | 12       |
| 2.2 Missionsplanung und -durchführung . . . . .                  | 12       |
| 2.2.1 NIST . . . . .   | 12       |
| 2.2.2 Nichols Research Corporation . . . . .                     | 13       |
| 2.2.3 CMU . . . . .  | 13       |
| 2.3 Digitale Landkarten . . . . .                                | 14       |
| 2.4 Dynamisches Maschinelles Sehen am ISF . . . . .              | 16       |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.4.1    | Die Anfänge . . . . .                                   | 16        |
| 2.4.2    | Luft- und Raumfahrtanwendungen . . . . .                | 17        |
| 2.4.3    | Autonome Landfahrzeuge . . . . .                        | 18        |
| 2.4.4    | Landmarkennavigation . . . . .                          | 20        |
| 2.4.5    | Diskussion der Ergebnisse . . . . .                     | 20        |
| <b>3</b> | <b>Die 'EMS-Vision' Architektur</b>                     | <b>23</b> |
| 3.1      | Sensorkonzept für die visuelle Wahrnehmung . . . . .    | 23        |
| 3.2      | Wahrnehmungsarchitektur . . . . .                       | 25        |
| 3.2.1    | Zentrale Wissensrepräsentation . . . . .                | 25        |
| 3.2.2    | Der allgemeine Wahrnehmungsprozeß . . . . .             | 27        |
| 3.2.3    | Inertial-basierte Eigenzustandsschätzung . . . . .      | 28        |
| 3.2.4    | Wissensbasierte Planungskomponenten . . . . .           | 28        |
| 3.2.5    | Verhaltensentscheidung . . . . .                        | 28        |
| 3.2.6    | Funktionale Systemarchitektur . . . . .                 | 29        |
| 3.3      | Technische Umsetzung . . . . .                          | 31        |
| 3.3.1    | Das Rechnersystem . . . . .                             | 31        |
| 3.3.2    | Das Versuchsfahrzeug VaMoRs . . . . .                   | 33        |
| 3.3.3    | Das Sehsystem . . . . .                                 | 34        |
| 3.3.4    | Konventionelle Sensorik . . . . .                       | 35        |
| <b>4</b> | <b>Zentrale Systemsteuerung</b>                         | <b>37</b> |
| 4.1      | Administration des Rechnersystems . . . . .             | 37        |
| 4.2      | Die Repräsentation von Fähigkeiten . . . . .            | 39        |
| 4.2.1    | Die statische Repräsentation von Fähigkeiten . . . . .  | 39        |
| 4.2.2    | Die dynamische Repräsentation von Fähigkeiten . . . . . | 41        |
| 4.3      | Kontrollfluß im EMS-System . . . . .                    | 43        |
| 4.3.1    | Aktivierung der Fähigkeiten . . . . .                   | 43        |



|          |  |
|----------|--|
|          | IX   |
| 4.3.2    | Der Erkennungszustand der Objekte . . . . . 44                 |
| 4.3.3    | Die Bestimmung der Blickrichtung . . . . . 45                  |
| <b>5</b> | <b>Statisches Hintergrundwissen 49</b>                         |
| 5.1      | Das Umweltmodell . . . . . 49                                  |
| 5.1.1    | Lagemodellierung . . . . . 50                                  |
| 5.1.2    | Unstrukturiertes Gelände . . . . . 52                          |
| 5.1.3    | Straßen . . . . . 53   |
| 5.1.4    | Landmarken . . . . . 62  |
| 5.1.4.1  | Formmodellierung . . . . . 64                                  |
| 5.1.4.2  | Photometrische Eigenschaften . . . . . 68                      |
| 5.1.5    | Gültigkeit der Daten . . . . . 69                              |
| 5.2      | Die eigenen Fähigkeiten . . . . . 70                           |
| 5.3      | Die Aufbereitung des Wissens . . . . . 71                      |
| <b>6</b> | <b>Missionsplanung 81</b>                                      |
| 6.1      | Lokale Orientierung . . . . . 81                               |
| 6.2      | Die Routenplanung . . . . . 82                                 |
| 6.2.1    | Planung auf Wegenetzen . . . . . 82                            |
| 6.2.2    | Planung abseits befestigter Wege . . . . . 85                  |
| 6.3      | Die Erstellung des Missionsplans . . . . . 86                  |
| <b>7</b> | <b>Missionsdurchführung 91</b>                                 |
| 7.1      | Zeitliche Repräsentation des Missionsfortschritts . . . . . 91 |
| 7.2      | Örtliche Repräsentation des Missionsfortschritts . . . . . 93  |
| 7.3      | Abweichungen vom Plan . . . . . 96                             |
| 7.4      | Positionsbestimmung an Landmarken . . . . . 99                 |
| 7.4.1    | Positionsbestimmung an Abzweigen . . . . . 101                 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 7.4.1.1  | Bestimmung der Kovarianzmatrix . . . . .                 | 102        |
| 7.4.2    | Verifikation der Abzweighthypothese . . . . .            | 103        |
| 7.4.3    | Positionsbestimmung an Landmarken der Klasse 3 . . . . . | 104        |
| 7.4.3.1  | Bestimmung der Kovarianzmatrix . . . . .                 | 104        |
| 7.5      | Erweiterung der Wissensbasen . . . . .                   | 106        |
| 7.5.1    | Die eigenen Fähigkeiten . . . . .                        | 107        |
| 7.5.2    | Straßen . . . . .  | 108        |
| <b>8</b> | <b>Experimentelle Ergebnisse</b>                         | <b>113</b> |
| 8.1      | Erstellung der Wissensbasen . . . . .                    | 113        |
| 8.2      | Planung autonomer Missionen . . . . .                    | 113        |
| 8.3      | Der Missionsplan . . . . .                               | 114        |
| 8.4      | Kontrollfluß . . . . .                                   | 117        |
| 8.5      | Positionsbestimmung an Landmarken . . . . .              | 124        |
| <b>9</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                      | <b>129</b> |
|          | <b>Literatur</b>   | <b>131</b> |
| <b>A</b> | <b>Kinematische Begrenzung: Der Wendekreis</b>           | <b>141</b> |
| <b>B</b> | <b>Missionsdurchführung</b>                              | <b>143</b> |
| B.1      | Hintergrundwissensbasen . . . . .                        | 143        |
| B.2      | Missionsplan für eine komplexe Fahrmission . . . . .     | 144        |
| <b>C</b> | <b>Das gemittelte Krümmungsmodell</b>                    | <b>147</b> |
|          | <b>Liste der verwendeten Abkürzungen</b>                 | <b>151</b> |

# 1 Einleitung

Das Kraftfahrzeug ist bekanntlich des Deutschen liebstes Kind. Die ungebrochene Begeisterung für den Individualverkehr spiegelt sich daher auch in der Zulassungsstatistik wider. Mitte 1998 waren in der Bundesrepublik Deutschland 49,6 Millionen Kraftfahrzeuge zugelassen, davon entfielen 41,7 Millionen auf den Bereich der PKW. Die Beförderungsleistung im Gelegenheitsverkehr stieg zwischen 1994 und 2000 von 25,2 Milliarden Pkm (Personenkilometer) auf 25,8 Milliarden Pkm, das entspricht einer Zunahme von 2,5%.

Obwohl die Zahl der registrierten Verkehrsunfälle im gleichen Zeitraum sogar um 3,5% auf ca. 2,4 Millionen gestiegen ist, nahm die Zahl der getöteten Verkehrsteilnehmer um 30 % auf 7503 ab (Alle Zahlenangaben nach dem Statistischen Bundesamt<sup>1</sup>).

Die Automobilindustrie unternimmt große Anstrengungen, um sowohl die Anzahl von Verkehrsunfällen als auch deren Auswirkungen noch weiter zu verringern. Neben der weiteren Verbesserung der passiven Sicherheitseinrichtungen der Fahrzeuge, die das Verletzungsrisiko beim Unfall minimieren sollen, wurde gerade in den letzten Jahren verstärkt an Systemen gearbeitet, die an einer anderen Schwachstelle des Systems "Automobil" angreifen: dem Fahrer.

B. Spiegel [91] bezeichnet den Menschen als "*Engpaßglied mit Schwachstellencharakteristik*", der nur über eine begrenzte Kanalkapazität bei der Verarbeitung von Information und bei der Koordination von Handlungen verfügt. Zudem kann es bei starken psychischen Belastungen vorkommen, daß die unter normalen Bedingungen sicher beherrschten Handlungsabläufe nicht mehr ausgeführt werden können. Dies zeigt sich z. B. dadurch, daß der durchschnittliche Autofahrer damit überfordert ist, gleichzeitig eine Vollbremsung und ein Ausweichmanöver durchzuführen, während beide Handlungen getrennt sehr gut beherrscht werden. Hier greift das Antiblockiersystem (ABS) ein, das bei einer Vollbremsung das Blockieren der Räder verhindert und dem Fahrer damit die volle Konzentration auf ein Ausweichmanöver ermöglicht.

Ein weiteres bekanntes Fehlverhalten des Menschen in Schrecksituationen wird durch den 1997 eingeführten Bremsassistenten kompensiert: bei einer Vollbremsung wird der maximale Bremsdruck nicht schnell genug aufgebaut und ein oft

---

<sup>1</sup>Quelle: Statistisches Bundesamt (2001), Statistik *Verkehr Aktuell*,  
[http://www.destatis.de/publi\\_d.htm](http://www.destatis.de/publi_d.htm)

entscheidendes Stück Bremsweg “verschenkt”. Das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) und die Antriebs-Schlupf-Regelung (ASR) vergrößern den Arbeitsbereich des Fahrzeugs, in dem es auch für einen untrainierten Fahrer beherrschbar bleibt.

Darüberhinaus gibt es bereits Assistenzsysteme, die den Fahrer in Standardsituationen von monotonen Tätigkeiten entlasten und dadurch die Streßbelastung mildern sollen. Typische Vertreter sind hier die ACC-Systeme (Adaptive Cruise Control), die bereits von verschiedenen Automobilherstellern serienmäßig angeboten werden. Diese Systeme greifen aktiv in die Aktuatorik ein und passen die Geschwindigkeit beim Auffahren auf das vorausfahrende Fahrzeug automatisch an. Warnsysteme lösen dagegen einen Alarm aus, wenn der Fahrer dabei ist, in eine gefährliche Situation zu geraten, z. B. beim Verlassen der eigenen Fahrspur. Solche Systeme werden ebenfalls bereits kommerziell angeboten, z. B. von den Firmen AssistWare<sup>2</sup> oder Odetics/Iteris<sup>3</sup>.

Die Hauptursachen für die Verkehrsunfälle stellen sich nach dem Statistischen Bundesamt [92] wie folgt dar:

*“Als Hauptursachen werden seit Jahren die “nicht angepasste Geschwindigkeit”, und die “Missachtung der Vorfahrt” festgestellt. Insbesondere bei schweren Unfällen spielt auch der “Alkoholeinfluss” eine deutliche Rolle. Einige Ursachen zeigen eine deutliche Alters- oder Geschlechterabhängigkeit. So werden “nicht angepasste Geschwindigkeit”, “Abstandsfehler” oder “Fehler beim Überholen” überdurchschnittlich jüngeren Fahrern vorgeworfen, während Abbiegefehler oder Vorfahrtsmissachtung mit steigendem Alter deutlich zunehmen. Frauen verursachen weniger häufig als Männer Unfälle durch “nicht angepasste Geschwindigkeit”, durch “Überholfehler” oder durch “Alkoholeinfluss”. Sie missachten aber viel öfter die Vorfahrt oder machen Fehler beim Abbiegen.”*

Bei der Problematik der “nicht angepaßten Geschwindigkeit” zeigt sich auch, daß der Mensch Risiken nicht immer richtig einzuschätzen vermag. Beispielsweise wird bei einer Reduktion der Sichtweite, sei es durch Nebel oder durch die Streckenführung (nicht einsehbare Kurve), die Geschwindigkeit zwar oft ein

---

<sup>2</sup> [www.assistware.com](http://www.assistware.com)

<sup>3</sup> [www.odetics-its.com](http://www.odetics-its.com)

wenig reduziert, aber nicht ausreichend, um innerhalb der Sichtweite<sup>4</sup> anhalten zu können. Dieses Phänomen bezeichnet B. Spiegel [91] als das Risikointegral:

*“Der Fahrer bildet, vereinfacht ausgedrückt, [unbewußt, Anm. des Autors] eine Art Mittelwert aus der Schwere des möglichen Ereignisses (das immerhin tödliche Folgen haben kann) und aus der Wahrscheinlichkeit seines Eintretens, die in der Tat nur gering ist.”*

Die Folgen derartigen Handelns können oft in der Zeitung nachgelesen werden, wie z. B. in der Süddeutschen Zeitung vom 14.01.2002:

***“Karambolage mit 28 Fahrzeugen***

*Zwei Tote und viele Verletzte bei schwerem Unfall auf der A9:  
Bei dichtem Nebel ... rasten ... 28 Fahrzeuge ineinander.”*

Obwohl der Mensch die meisten der derzeit verfügbaren technischen Systeme hinsichtlich seiner kognitiven Fähigkeiten und der Leistungsfähigkeit seiner Sinnesorgane weit in den Schatten stellt, zeigen die vorangegangenen Beispiele deutlich, daß sich für die Entwicklung neuer, komplexerer Fahrerunterstützungssysteme noch ein weites Tätigkeitsfeld auftut. Führt man die derzeit eingeschlagene Entwicklungsrichtung logisch weiter, so sieht S. Hahn [34] am Ende dieser Entwicklungshierarchie die “Intelligenten Fahrzeuge”.

Was aber ist ein “Intelligentes Fahrzeug”?

## 1.1 Intelligenz und Autonomie bei Fahrzeugen?

Mit der Fragestellung, was ein intelligentes Fahrzeug auszeichnet und welche Eigenschaften es haben sollte, haben sich Forscher in aller Welt auseinandergesetzt, ohne zu einer einheitlichen Begriffsdefinition zu gelangen. Dies scheiterte auch daran, daß bislang keine einheitliche Definition für den Begriff Intelligenz gefunden werden konnte (vergl. auch R. Brooks [10] oder M. Maurer [57], S. 36).

Ronald Arkin stellte in seinem Buch “Behavior-Based Robotics” [2] folgende, auf ein Fahrzeug ausgerichtete Definition für einen intelligenten Roboter auf:

---

<sup>4</sup>Nach §1 Abs. 3 StVO muß bei schmalen Straßen sogar mindestens innerhalb der Hälfte der übersehbaren Strecke angehalten werden können.

*“An intelligent robot is a machine able to extract information from its environment and use knowledge about its world to move safely in a meaningful and purposive manner”.*

Ein intelligentes Fahrzeug soll also in der Lage sein, die Umwelt über geeignete Sensorik wahrzunehmen und sich darin zielgerichtet und sicher fortzubewegen.

Gelingt dies ohne zusätzliche Hilfe von außen, spricht man auch von bordautonom. Daher werden in der technischen Fachliteratur derartige Systeme auch als *Autonome Fahrzeuge* bezeichnet.

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Einer der Pioniere der Entwicklung autonomer Straßenfahrzeuge ist das Institut für Systemdynamik und Flugmechanik (ISF) der Universität der Bundeswehr München (UniBwM). Seit 1978 wird hier Grundlagenforschung im Bereich der autonomen Fahrzeugführung durch Rechnersehen betrieben. Bis 1996 wurden im Bereich der Straßenfahrzeuge in verschiedenen Domänen beachtliche Resultate erzielt, so z. B. das autonome Fahren auf öffentlichen Autobahnen bis in hohe Geschwindigkeitsbereiche ( [19], [58] ) oder das Manövrieren auf engem Raum [64]. Die wesentliche Grundlage für diese Fähigkeiten bildete dabei der am ISF entwickelte Ansatz zur visuellen Erfassung der Umwelt. Zur Bildfolgenauswertung in Echtzeit (25Hz, PAL-Norm) werden generische Modelle verwendet, die sowohl die räumliche Gestalt (3D) eines Objekts als auch sein Bewegungsverhalten über der Zeit (1D) beschreiben (4D Ansatz nach E.D. Dickmanns [17]).

Alle diese Systeme waren speziell für einen Einsatzbereich und ein spezielles Fahrzeug konzipiert und optimiert. Für das Wahrnehmungssystem der dritten Generation, in dessen Rahmen diese Arbeit durchgeführt wurde, sollte von vornherein ein allgemeiner Ansatz entwickelt und auf einem heterogenen Mehrrechnersystem realisiert werden.

Die Zielsetzung dieser Arbeit war die Entwicklung von Methoden zur expliziten Repräsentation der Fähigkeiten des Systems bezüglich der Wahrnehmung und der Aktion. Auf dieser Repräsentation aufbauend sollte ein Aktivierungs- und Überwachungsmechanismus entwickelt werden, der es einer Hierarchie von Entscheidungsinstanzen möglich macht, gezielt einzelne Aktions- oder Wahrnehmungsaufgaben an dafür zuständige Experten zu verteilen. Durch diese Mechanismen würde eine harmonische Einbindung aller Systemkomponenten, vor

allem aber auch die Möglichkeit der automatischen Systemkonfiguration erzielt werden. Die Entscheidungsinstanzen selbst würden dadurch in die Lage versetzt, auf einen Wechsel der Situation durch die Aktivierung erforderlicher Fähigkeiten reagieren zu können. Damit sollte der Schritt von einem statisch vorkonfigurierten Nischensystem zu einem sich selbst an die herrschenden Umweltbedingungen adaptierenden System realisiert werden.

Für die Vorgabe der Ziele des Systems in einem globalen Missionskontext sollten im Rahmen dieser Arbeit die erforderlichen Komponenten zur Repräsentation von statischem Hintergrundwissen, sowohl über die Umwelt als auch über die Leistungsfähigkeit der eigenen Verhaltensfähigkeiten, und zur Planung komplexer Fahrmissionen in unterschiedlichen Domänen entwickelt werden. Bei der Durchführung von komplexen Fahrmissionen sollte der Fortschritt der Mission in geeigneter Weise bestimmt und durch einen ständigen Abgleich mit den eigenen Wahrnehmungen der Realität und darin vorkommenden Orientierungsmerkmalen, Landmarken genannt, bestimmt werden.

### 1.3 Struktur der Arbeit

In den folgenden Kapiteln wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System zur globalen Fahrzeugführung eines sehenden autonomen Fahrzeugs beschrieben.

Dazu wird zunächst im folgenden Kapitel ein Überblick über den Stand der Technik der Entwicklung autonomer Landfahrzeuge gegeben.

Kapitel 3 stellt das derzeit am Institut für Systemdynamik der Universität der Bundeswehr München entwickelte EMS-VISION System vor. Die darin beschriebenen Komponenten bilden den Rahmen für die vorliegende Arbeit.

Nach diesen Grundlagen werden in Kapitel 4 die entwickelten Mechanismen zur Repräsentation und Aktivierung von Fähigkeiten in einem heterogenen Mehrrechnersystem beschrieben.

In Kapitel 5 werden Datengehalt und Struktur der Hintergrundwissensbasen erläutert, auf deren Basis die in Kapitel 6 vorgestellte Planung autonomer Missionen erfolgt.

Die entwickelten Methoden zur Durchführung komplexer Fahrmissionen auf Wegenetzen und im freien Gelände werden in Kapitel 7 genauer beleuchtet.

Das achte Kapitel dokumentiert die Versuchsergebnisse, die mit diesem System im Rahmen autonomer Fahrmissionen erzielt wurden.

Der letzte Abschnitt enthält eine Zusammenfassung und schließt die Arbeit mit einem Ausblick ab.



## 2 Stand der Technik

Verglichen mit anderen wissenschaftlichen Arbeitsgebieten ist die Entwicklung autonomer mobiler Systeme (AMS) eine sehr junge Disziplin. Breit angelegte internationale Forschungsprojekte in den 80er und 90er Jahren haben dazu geführt, daß sich eine stetig wachsende Zahl von Forschern weltweit mit dieser Problematik auseinandersetzt. Unterstützt wurde diese Entwicklung durch die rasanten Entwicklungssprünge der Mikroprozessortechnologie, die nunmehr Millionen von Rechenoperationen pro Sekunde bei sehr kleiner Baugröße ermöglichen. Dadurch wurde es erst möglich, die erforderliche Rechenleistung für vielfältige Aufgaben auf einem Fahrzeug mit sich zu führen.

Einen Überblick über alle weltweit durchgeführten Forschungsarbeiten im Bereich autonomer mobiler Systeme zu geben, würde den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen. Daher beschränken sich die folgenden Ausführungen auf den Bereich der autonomen Landfahrzeuge, die für den Einsatz auf Wegenetzen und im Gelände bzw. in unstrukturierten Umgebungen konzipiert wurden.

Für einen umfassenden Überblick der Forschungsergebnisse im Bereich der autonomen Straßenfahrzeuge in den Jahren vor 1996 wird der Leser auf die Arbeiten von N. Müller [64] und C. Brüdigam [11] verwiesen. Den derzeitigen Stand der Technik der visuellen Straßenerkennung beschreibt M. Lützelner [54].

Im folgenden Abschnitt werden zunächst einige Arbeiten aus dem Bereich der autonomen Fahrzeugführung vorgestellt. In Abschnitt 2.2 werden dann einige Aktivitäten aus dem Bereich der Planung und Durchführung komplexerer Fahrmissionen beschrieben. Abschnitt 2.3 gibt einen Überblick über die etablierten Standards für digitale Karten.

### 2.1 Autonome und semiautonome Landfahrzeuge

#### 2.1.1 Amerikanische Gruppen

Im Jahre 1990 wurde vom Verteidigungsministerium (DOD) der USA das Unmanned Ground Vehicle Technology Enhancement and Exploitation Program (UGVTEE) ins Leben gerufen, dessen Zielsetzung die Entwicklung autonomer Kampffahrzeuge für den Einsatz im Gefechtsfeld des nächsten Jahrtausends ist.

Ursprünglich war das UGV-Programm [86] in zwei Kampagnen, Demo I und II, aufgeteilt. In der Demo I Phase, die 1992 abgeschlossen wurde, wurden verschiedene ferngesteuerte und begrenzt autonome Landfahrzeuge entwickelt. Das Ergebnis der Demo II Phase, die 1996 abgeschlossen wurde, waren Verfahren zur Missionsplanung und autonomen Navigation in weglosem Gelände und automatische Zielerkennungssysteme. Beteiligt waren dabei 8 Universitäten, 16 staatliche Einrichtungen und 12 Firmen. Das Demo III Programm wurde im Jahr 1997 ins Leben gerufen. Die Zielsetzung ist, die nötigen Fähigkeiten zur Wahrnehmung und Fahrzeugsteuerung sowie ein Mensch-Maschine-Interface zu entwickeln, die eine autonome Fahrt querfeldein mit bis zu 20 mph ( $\approx 32$  km/h) unter Überwachung durch einen Bediener erlauben [87].

#### **2.1.1.1 Carnegie Mellon University**

Das Robotikinstitut der Carnegie Mellon Universität (CMU) in Pittsburgh zählt zu den Pionieren der Entwicklung autonomer Fahrzeuge, sowohl für den Einsatz auf gut strukturierten Straßen als auch im freien Gelände. Erste Erfahrungen wurden Mitte der 80er Jahre mit dem "Navigation Laboratory I" (Navlab I) genannten Fahrzeug, einem Chevrolet Kastenwagen, gesammelt. Mittlerweile wurden insgesamt 10 Fahrzeuge (bis Navlab 10) ausgerüstet. Als Bildverarbeitungssysteme zur Straßenerkennung wurde zunächst ALVINN (Autonomous Land Vehicle In a Neural Network) [72] entwickelt. Auf der Basis von ALVINN wurde auch die Thematik der Abzweigerkennung untersucht [46]. Im Jahre 1995 wurde der neuronale Ansatz zugunsten von RALPH [73] (Rapidly Adapting Lateral Position Handler) aufgegeben. Mit Navlab 5 wurde im Sommer 1995 eine Langstreckenfahrt, "No-Hands-Across-America" durchgeführt, bei der eine Strecke von knapp 4500 km zu 98,1 % mit automatischer Querführung zurückgelegt werden konnte. Als Navigationssystem wurde das 1995 vorgestellte PANS System (Portable Advanced Navigation Support) [45] eingesetzt. PANS ist eine in sich abgeschlossene Einheit, die als Basisrechner ein Laptop benutzt, in das über Adapterkarten Sensordaten eingelesen werden können. Als Sensorik sind eine Videokamera, ein DGPS-Empfänger, ein Kreisel und ein Lenkwinkelsensor enthalten. Zwischen den mit 1 Hz eingelesenen DGPS-Daten wird die Positionsschätzung durch Interpolation auf Basis der Kreiseldaten bestimmt. Als Hintergrundwissensspeicher wird eine Straßenkarte eingesetzt. PANS und RALPH sind mittlerweile kommerziell verfügbar [96].

### 2.1.1.2 National Institute of Standards and Technology

Am “National Institute of Standards and Technology” (NIST) wurden mit einem umgerüsteten “High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle” (HMMWV) Versuche zur Fahrzeugführung durch Rechnersehen durchgeführt. Die ersten Arbeiten konzentrierten sich dabei auf das Straßenfahren. Dabei konnte auch unter widrigen Bedingungen automatische Querführung auf markierten, hindernisfreien Straßen gezeigt werden [47]. Für das Querfeldein-Fahren wurden im Rahmen von Demo III A ebenfalls mit dem HMMWV Fahrten im Gelände, mit positiven Hindernissen wie Bäumen und Gebüsch, mit bis zu 35 km/h gezeigt [14].

### 2.1.1.3 University of California, Berkeley

Taylor et al. stellen in [94] ein Verfahren zur visuellen Straßenerkennung vor. Als Sensoren werden 2 monochrome Kameras in Stereoanordnung verwendet. Auf Basis dieser Straßenerkennung entwarf und realisierte J. Köseckà einen Querregler [51]. In Fahrversuchen auf einem Highway konnte automatische Querführung mit Geschwindigkeiten bis 90 mph ( $\approx 145$  km/h) erreicht werden.

## 2.1.2 Europäische Gruppen

### 2.1.2.1 IITB

Das Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB) in Karlsruhe betreibt mehrere Versuchsfahrzeuge [67] zur Entwicklung und Erprobung von Algorithmen für die Navigation auf Wegenetzen. Als Sensorik sind zum einen drei CCD-Kameras, die in festem Winkel zueinander montiert sind, fest ins Fahrzeug eingebaut. Als Meßwerte stehen außerdem die Fahrzeuggeschwindigkeit und der gestellte Lenkwinkel zur Verfügung. Für die globale Navigation auf Wegenetzen höherer Ordnung wird ein handelsübliches Travelpilot Navigationssystem der Firma Bosch-Blaupunkt eingesetzt. Dieses stellt das Hintergrundwissen über das öffentliche Wegenetz zur Verfügung. Neben dem statischen Wissen über das Wegenetz, wie z.B. die Abgangswinkel von Querstraßen, bestimmt der Travelpilot während der Fahrt als dynamische Größe den Abstand zur nächsten Kreuzung. Das Planen von Routen ist ebenso möglich, wie die Überwachung der Fahrzeugbewegungen und dynamische Rou-

tenneuplanung. Der Travelpilot benötigt dazu als zusätzliche Sensorik einen GPS-Empfänger und einen Kreisel. Die Voraussetzung für den Einsatz des Travelpilot ist, daß sich das Fahrzeug auf einer in der Datenbasis enthaltenen Straße befindet. Die neuesten Arbeiten mit dem Versuchsfahrzeug DARVIN beschäftigen sich mit der autonomen Navigation auf Wegenetzen im Innenstadtbereich ([38], [37]). Aus der kommerziellen Karte des Navigationssystems werden eine oder mehrere Hypothesen für die Geometrie der Straße abgeleitet. Zur Positionsbestimmung wird hier ein DGPS-Empfänger eingesetzt. Nach einer manuellen Initialisierungsphase, bei der durch einen vom Fahrer durchgeführten Abbiegevorgang die initiale Positionsschätzung verfeinert wird ("snap on the map"), können die Straßenränder direkt ohne Detektionsphase im Bild verfolgt werden. Während der Fahrt übernimmt der Benutzer die Aufgabe der Verhaltensentscheidung und globalen Navigation: das Signal, ob und in welche Richtung an einem Abzweig abgebogen werden soll, wird durch Betätigung des Blinkers gegeben. Das System ist auf exaktes Kartenmaterial und eine akkurate Bestimmung der Eigenposition angewiesen.

#### 2.1.2.2 Daimler Benz

Daimler Benz beschritt gleichzeitig verschiedene Wege der Entwicklung autonomer und teilautonomer Fahrzeuge. Im Rahmen des Forschungsprojektes PROMETHEUS wurden mehrere Fahrzeuge für unterschiedliche Zielsetzungen ausgerüstet. An der Entwicklung der autonomen Fahrzeuge **VI**sion **T**echnology **A**pplication (VITA) I & II waren mehrere Institute beteiligt. Die elementaren Funktionen zur Erkennung des Straßenverlaufs und von Fremdfahrzeugen wurden vom ISF zur Verfügung gestellt. Ein Modul zur Situationsanalyse wurde an der Fakultät für Informatik der UniBwM entwickelt. Zusätzlich waren das IITB in Karlsruhe und das Institut für Neuroinformatik an der Ruhr Universität Bochum beteiligt. Daneben arbeitete Daimler Benz mit einer eigenen Forschungsgruppe an einem eigenständigen autonomen Fahrzeug **Optically S**teered **C**ar (OSCAR). Der Fahrbahnverlauf und der Eigenzustand relativ zur Straße werden durch ein Bildverarbeitungssystem nach dem 4D-Ansatz [17] geschätzt und zur Fahrzeugregelung verwendet. Als Bildverarbeitungssystem wird ein Transputercluster eingesetzt. Als ein Ableger des autonomen Systems wurde mit OSCAR ein Lenkassistent erprobt [26]. Dazu werden die geschätzten Zustandsgrößen benutzt, um das manuell gesteuerte Fahrzeug durch kleine Lenkkorrekturen von maximal  $\pm 0,25^\circ$  in der Mitte der Fahrspur zu halten. Der Fahrer ist somit

von der ständigen Korrektur kleiner lateraler Ablagen zur Fahrspurmitte befreit und kann sich voll auf die Längsführung und die globale Fahrzeugführung konzentrieren. Das System wurde erfolgreich auf Autobahnen getestet. Auf der Grundlage dieser Arbeiten wurde bei der Firma Odetics/Iteris, USA, ein Warnsystem vor unbeabsichtigtem Verlassen der Fahrbahn (“lane departure warning system”) entwickelt. Dieses wird seit dem Jahr 2000 in den LKW der Firma Freightliner in den USA eingesetzt.

Für die Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten von Bildverarbeitung im Bereich der Nutzfahrzeuge wurde das Anwendungsgebiet “Truck Platooning” [24] untersucht. Dabei folgen mehrere fahrerlose LKW einem vorausfahrenden, durch einen Menschen gesteuerten LKW. Die Fahrzeuge sind mit einer Videokamera ausgerüstet, die Bestimmung der Relativlage zum vorausfahrenden Fahrzeug erfolgt durch Bildverarbeitung. Zur Kompensation der Totzeiten bei der Abstandsschätzung durch Bildverarbeitung werden aktuelle Meßwerte über die Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung über eine Funkstrecke an die folgenden Fahrzeuge verschickt. Das System wurde im Simulationskreis mit 4 Fahrzeugen und auf der Autobahn mit dem Versuchsfahrzeug OTTO getestet. Die neuesten Arbeiten beschäftigen sich mit UTA (Urban Traffic Assistant), einem Fahrerassistenzsystem für den innerstädtischen Bereich [25] und der Fusion von visueller Fahrbahnerkennung und Fremdfahrzeugdetektion und -tracking via Radar [106].

### 2.1.2.3 Dornier

Dornier ist seit mehr als 10 Jahren in Deutschland im militärischen Bereich in der Entwicklung autonomer Fahrzeuge aktiv. Im **PR**ogramm **I**ntelligenter **M**obiler **U**nbemannter **S**ysteme (PRIMUS) konnte in mehreren Projektphasen ein steter Zuwachs an Funktionalität erzielt werden. In der aktuellen Phase PRIMUS C wurde ein militärisches Kettenfahrzeug vom Typ Wiesel 2 ausgerüstet. Für das Straßenfahren wurde ein Sichtsystem der UniBwM, bestehend aus einer Zwei-Achsen-Kameraplattform und einer 3-Chip Farbkamera, integriert. Das Modul zur Straßen- und Konturerkennung wurde von der UniBwM entwickelt [56]. Für die Hinderniserkennung beim Querfeldein-Fahren wird eine 4Hz **E**ntfernungs-**B**ild-**K**amera (EBK) eingesetzt. Das Fahrzeug wird von einem Bediener in einer Kontrollstation überwacht und bedient. Das Fahrzeug kann in unterschiedlichen Domänen eingesetzt werden, der Domänenwechsel jedoch muß manuell vom Bediener eingeleitet werden. Je ein Modul ist für die lokale und

globale Navigation zuständig. Die Planungsergebnisse werden dann gemeinsam von einer übergeordneten Instanz (Arbiter<sup>1</sup>) für die Generierung der Fahrkommandos ausgewertet. Die globale Routenplanung im Gelände basiert auf dem  $D^*$ -Algorithmus [93]. Einen Überblick über die Systemarchitektur gibt [85].

#### 2.1.2.4 Universität Parma

An der Universität Parma wird ein autonomes Straßenfahrzeug, ARGO, entwickelt. Das entwickelte Bildverarbeitungssystem GOLD (**G**eneric **O**bstacle and **L**ane **D**etection) [7] verwendet zwei S/W CCD Kameras, die in Stereoanordnung jeweils neben den A-Säulen des Fahrzeugs montiert sind, wodurch eine sehr große Stereobasis erreicht wurde. Die Algorithmen wurden zunächst auf Spezialhardware realisiert, konnten aber auch auf ein Standard PC-System mit einem 200 MHz Intel Pentium MMX Prozessor portiert werden [8]. Zum Erreichen der vollen Performance war dazu eine hardwarenahe Programmierung nötig. Als Fahrmanöver werden Spurfolgen und Spurwechsel beherrscht. Mit diesem Fahrzeug wurde im Juni 1998 eine Langstreckenfahrt in Anlehnung an die "Mille Miglia" durchgeführt [9].

## 2.2 Missionsplanung und -durchführung

### 2.2.1 NIST

Im Rahmen des UGV Projekts wurden vom NIST zwei verschiedene Module zur Missionsplanung entwickelt [3]: das "Tier 1" Modul wird auf der Fahrzeugebene eingesetzt, um Trajektorien durch wegloses Gelände zu planen. Der Zeithorizont für die Planung ist dabei kürzer als eine Stunde. Als Hintergrundwissensbasis können DTED-Daten aller Auflösungsstufen verwendet werden. Das "Tier 2" Modul ist für die Planung von Missionen für mehrere Fahrzeuge über einen größeren Zeithorizont von einem Kommandostand aus konzipiert. Eine dreidimensionale Außensichtsimulation mit Anzeige der Standorte der verschiedenen Fahrzeuge verleiht dem Operateur einen Überblick über das Szenario. Die eingesetzten Fahrzeuge sind mit einem Inertialsensorkpaket und einem DGPS-Empfänger für den genauen militärischen P-Code ausgestattet. Die Fusion beider Datenquellen bildet die Grundlage für die hochgenaue Navigation entlang

---

<sup>1</sup>engl.: Schiedsrichter

einer durch die Missionsplanung vorgegebenen ortsfesten Trajektorie. Das neueste Verfahren zur Trajektorienplanung und Hindernisvermeidung wird in [52] beschrieben. Dabei werden erstmals Klothoiden zur Beschreibung der möglichen Fahrzeugtrajektorien verwendet. In [60] beschreiben die Autoren das mögliche Aufgabenspektrum eines Aufklärungstrupps aus mehreren Fahrzeugen (scout platoon) und stellen eine hierarchische Untergliederung einer Mission von der obersten Schicht, dem platoon-level, bis zur untersten Schicht, dem servo-level gemäß dem Schichtenmodell der 4D/RCS-Referenzarchitektur [1] vor.

### 2.2.2 Nichols Research Corporation

In [53] stellen die Autoren eine im Rahmen des UGV-Programms durchgeführte Machbarkeitsstudie vor, deren Zielsetzung ein System zur vollautonomen Navigation auf Wegenetzen war. Ein GPS-Empfänger für den genaueren, dem Militär vorbehaltenen, P-Code diente zur Positionsbestimmung. Dabei durfte ein Positionsfehler von 10 m nicht überschritten werden. Als Hintergrundwissenbasis wurden gescannte Landkarten verwendet. Zur Routenplanung auf dem Wegenetz wurde ein Adaptives Neuronales Netz in Kombination mit heuristischen Suchverfahren eingesetzt. Als Eingangsgrößen für die Planung mußten Anfangs- und Zielpunkt der Mission durch einen Bediener vorgegeben werden. Der Algorithmus konnte dann auf dieser Grundlage den kürzesten Weg zum Ziel planen. Ein zentrales Modul, der *Mission Supervisor* (als intelligenter Zustandsautomat realisiert), ist für die Zusammenschau der Daten verantwortlich. Es wertet die Ergebnisse der Missionsplanung und die Daten der Subsysteme aus, steuert die Komponenten zur Bildverarbeitung und Navigation und entscheidet, ob eine Kreuzung erkannt wurde oder nicht. Bei erkannten Abweichungen vom Plan wird das Fahrzeug gestoppt. Ab einer fest einkodierten Entfernung von 25 Metern vor dem Abzweig (dieser Wert wurde in Versuchsreihen ermittelt) wird die Abzweigerkennung aktiviert. Eine Berücksichtigung der Unsicherheit der Positionsschätzung findet nicht statt.

### 2.2.3 CMU

Für die Wissensrepräsentation und Ablaufsteuerung autonomer Missionen wurden "Annotated maps" eingeführt [36]. Für eine geplante Fahrmission werden dazu diejenigen Positionen in der Karte, an denen vom System jeweils Aktionen ausgeführt werden sollen, mit den dazu erforderlichen Daten als Anmerkungen

versehen. Bei Erreichen der Position werden dann die entsprechenden Aktionen der einzelnen Module eingeleitet.

Neben der Forschungstätigkeit im Bereich autonomer Straßenfahrzeuge arbeitet eine zweite Forschungsgruppe an der Missionsplanung abseits befestigter Straßen. Als Planungsalgorithmus für die Wegeplanung in teilweise unbekanntem Gelände wurde 1994 der D\*-Algorithmus vorgestellt [93]. Eine erweiterte Version des D\*-Algorithmus wird im Navigationssystem GRAMMPS [12] verwendet. GRAMMPS wurde zur Missionsplanung für mehrere Fahrzeuge konzipiert. Dabei tauschen die beteiligten Fahrzeuge Daten über den lokalen Umweltbereich aus, in dem sie sich gerade befinden, um sich so gegenseitig mit zusätzlichen Informationen über das Operationsgebiet zu versorgen. Das zusätzliche Wissen wird benutzt, um On-Line während der Fahrt die günstigste Trajektorie neu zu planen. Einen kritischen Faktor stellen dabei die durch die Kommunikation bedingten Latenzzeiten dar.

Für die Auswahl eines Verhaltensmusters wurde die DAMN-Architektur (Distributed Architecture for Mobile Navigation) entwickelt. Dabei wird der mögliche Bereich der Aktuatoren quantisiert (z. B. für die Lenkung in: stark links, links, gerade, rechts, stark rechts). Alle Wahrnehmungs- und Planungsmodule geben ein Votum für die erforderliche Aktion ab. Die Aktion mit den meisten Stimmen wird von einem Arbiter aktiviert.

Die Leistungsfähigkeit von Navigationshilfen für Fahrzeuge hängt zusätzlich in hohem Maße von der Verfügbarkeit von Hintergrundwissen über das vorgesehene Operationsgebiet ab. Dieses Hintergrundwissen liegt in Form digitaler Karten vor.

## 2.3 Digitale Landkarten

Je nach Verwendungszweck können die gebräuchlichen Kartenformate in zwei Kategorien eingeteilt werden. Im militärischen Bereich konzentrieren sich die Forschungsaktivitäten derzeit auf die Entwicklung von Funktionalitäten für den Einsatz im Gefechtsfeld (“Battlefield Technology”). Daher spielt die Navigation auf Wegenetzen gegenüber der Navigation abseits befestigter Wege lediglich eine untergeordnete Rolle<sup>2</sup>. Um entsprechendes Hintergrundwissen zur Verfügung stellen zu können, konzentrieren sich auch die entsprechenden Behörden, wie

---

<sup>2</sup>Obwohl Untersuchungen gezeigt haben, daß der Großteil der Truppenbewegungen auf der Straße erfolgt.



z.B. die US-amerikanische Defense Mapping Agency (DMA) darauf, digitales Kartenmaterial als Navigationsunterstützung für das freie Gelände zur Verfügung zu stellen. Der von der DMA angebotene Datenbestand, der für den Bereich der Bundesrepublik vom Amt für militärisches Geowesen (AMilGeo) verwaltet wird, umfaßt zwei Bereiche: im Digital Terrain Elevation Data (DTED) Standard wird die Form des Bodenprofils modelliert. Die Oberflächenform des kartographierten Bereiches wird dazu mit einem äquidistanten Gitternetz nachgebildet. Die Koordinaten der einzelnen Knotenpunkte des Netzwerkes werden mit Längen-, Breitengrad und Höhe über dem Referenzellipsoid im WGS 84 (World Geodetic System of 1984) Referenzsystem angegeben. Die DTED Daten sind in unterschiedlichen Genauigkeitsstufen erhältlich. In der größten Auflösung (Level 1), für die der größte Datenbestand erhältlich ist, werden die einzelnen Knotenpunkte im Abstand von 90m x 60m (geographische Breite x Länge) angeordnet. In der Auflösungsstufe "Level 2", die nur noch eingeschränkt verfügbar ist, wird eine Kantenlänge von 30m x 20m verwendet. Im UGV Projekt (siehe 2.1.1) werden für die Pfadplanung bereits hochgenaue DTED Daten eingesetzt, deren Knotenpunkte im Meterabstand angeordnet sind. In dieser Auflösung sind jedoch erst einige militärische Testgelände erfaßt.

Im Digital Feature Analysis Data (DFAD) Standard werden statische Objekte auf der Oberfläche erfaßt. Diese werden in drei Kategorien eingeteilt: als Point Features werden Objekte mit geringer räumlicher Ausdehnung modelliert. Die Objekte selbst werden in verschiedene Objektklassen eingeteilt. Formparameter beschreiben die Objektgröße, die Position wird analog zum DTED Standard als Längen-, Breitengrad und Höhe über dem Referenzellipsoid im WGS 84 Referenzsystem angegeben. Objekte größerer räumlicher Ausdehnung werden entweder durch Areal Features oder durch Line Features beschrieben. Areal Features umfassen größere Bereiche, wie z.B. Waldstücke oder Fabrikgelände; sie werden als geschlossene Polygonzüge mit konstanter Höhe modelliert. Line Features beschreiben Objekte, die nur in einer Richtung ausgedehnt sind; sie sind in verschiedene Klassen, wie z.B. Flußläufe, Straßen, Eisenbahnlinien und Stromleitungen, eingeteilt. Ihr Verlauf wird durch offene Polygonzüge beschrieben. Die im DFAD Standard abgelegten Informationen über Straßen enthalten keine Verbindungslogik, sie können darum nicht als Grundlage zur Routenplanung auf dem Straßennetz dienen. Daher ist die Verwendung dieses Standards als Grundlage zur Navigation auf Wegenetzen nicht möglich.

Im Gegensatz zum militärischen Bereich war die zivile Kartographie von Anfang an auf die Belange der rechnergestützten Navigation im Fahrzeug ausgerichtet.

Für die digitalen Navigationskarten (DNK) im Vektorformat haben sich international vier Standards etabliert [13]:

1. Der DRM (Digital Road Map) Standard, den die Japan Digital Road Map Association (JDRMA), ein Konsortium von 82 japanischen Firmen, entwickelte.
2. Die EtakMap der US-Amerikanischen Firma Etak Corporation, die bereits vor 15 Jahren mit der Erstellung hochgenauer digitaler Straßenkarten für den Bereich der USA begonnen hat.
3. Der NavTech Standard der Firma Navigation Technologies.
4. der Geographic Data File (GDF) Standard, der in der Version 1.0 im Rahmen des Eureka Projekts Digital Electronic Mapping of European Territory (DEMETER) von Philips und Bosch-Blaupunkt entwickelt und im Rahmen der Task Force European Digital Road Map (TFEDRM) überarbeitet wurde.

Gerade im europäischen Bereich hat sich der GDF Standard durchgesetzt. Die primäre Zielsetzung bei der Entwicklung des GDF war es, eine allgemeine Beschreibungsform oder Sprache für die in unterschiedlichen Anwendungen benötigten Daten zu definieren. Dadurch werden sämtliche Einträge der Karte exakt und einheitlich beschrieben. Für den Einsatz im Fahrzeug, wo unter anderem auch auf beschränkte Ressourcen geachtet werden muß, greifen die Hersteller zwar auf denselben Datenbestand zurück, benutzen aber jeweils ein auf ihr System maßgeschneidertes, meist komprimiertes Datenformat. Eine detaillierte Übersicht über den GDF und die geplanten Erweiterungen für die nächste Generation von Fahrerassistenzsystemen gibt M. Schraut [83].

## **2.4 Dynamisches Maschinelles Sehen am ISF**

### **2.4.1 Die Anfänge**

Am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik (ISF) der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) arbeitet man seit fast 20 Jahren am dynamischen maschinellen Sehen. Die stark von der Systemdynamik geprägte Methodik der Verwendung von räumlich-zeitlichen Modellen zur Beschreibung von Objekten, in späteren Jahren als 4D-Ansatz [17] bezeichnet, wurde von H.G. Meiss-

ner [59] erstmals genutzt, um ein auf einem kleinen Elektrowagen angebrachtes invertiertes Pendel durch Bildverarbeitung gestützt zu balancieren. Als Bildverarbeitungssystem wurde dazu das am Institut für Meßtechnik der UniBwM entwickelte “**Bildvorverarbeitungssystem 1**” (BVV 1) eingesetzt.

## 2.4.2 Luft- und Raumfahrtanwendungen

H.J. Wünsche nutzte den Versuchsaufbau des Stab-Wagen-Systems zunächst zum Vergleich der bis dato verwendeten Beobachter-Technik mit rekursiven Schätzverfahren [102]; für die Lageregelung eines Satelliten setzte er erstmals ein Erweitertes Kalman-Filter [29] als Schätzprozeß ein [103]. Parallel zu diesen Arbeiten wurde der Ansatz von G. Eberl [22] im Simulationskreis mit dem **Dreiaachsen-Bewegungs-Simulator** (DBS) für den automatischen sichtgeregelten Landeanflug eines Flugzeuges erprobt. Diese Arbeiten wurden von R. Schell [78] weitergeführt und durch die zusätzliche Auswertung von Inertialsensorik konnten auch starke Störungen wie Seitenwind oder Böen kompensiert werden. Der praktische Nachweis der Leistungsfähigkeit des Ansatzes konnte 1991 in realen Landeanflügen mit dem Versuchsflugzeug Do 128 der TU-Braunschweig geführt werden. In den folgenden Jahren wurde dieser Ansatz weiter ausgebaut (siehe [27, 28]) und in weiteren Flugkampagnen sowohl in der Do 128 als auch im Versuchsflugzeug ATTAS des DLR verifiziert.

Die mittlerweile gestiegene Rechenleistung erlaubte es S. Werner [100], ein maschinelles Wahrnehmungssystem für den bordautonomen automatischen Hubschrauberflug zu entwickeln; mit ihm war es möglich, im DBS-Simulationskreis in der Umgebung des Flughafens Braunschweig kleinere Missionen vollautonom durchzuführen. Das Wahrnehmungssystem basierte auf der Arbeit von D. Dickmanns [15], der ein Rahmensystem mit einer einheitlichen Verarbeitungs- und Repräsentationsstruktur für die visuelle Wahrnehmung unterschiedlicher Objektklassen entwickelte.

Eines der aufsehenerregendsten Projekte war zweifellos das während der D2-Spacelab Mission in Zusammenarbeit mit der DLR und der Fakultät für Informatik an der UniBwM durchgeführte ROTEX<sup>3</sup> Experiment. Dabei wurde ein in der Raumfähre Columbia freifliegendes Objekt visuell verfolgt und durch einen Roboterarm gegriffen. Die Rechner zur Bildfolgenauswertung befanden sich dabei in der Leitstelle in Oberpfaffenhofen. Der 4D Ansatz war durch seine

---

<sup>3</sup>**RO**boter-**T**echnologie-**EX**periment ROTEX,  
siehe auch <http://www.robotic.dlr.de/TELEROBOTICS/rotex.html>

internen Modellvorstellungen in der Lage, die durch die Kommunikationswege bedingten Totzeiten von unidirektional  $\approx 3$  Sekunden zu kompensieren (siehe Ch. Fagerer [23]).

Im Rahmen des Projekts "Crew Assistant Military Aircraft" (CAMA) wurden von A. Schubert Algorithmen zur visuellen Bestimmung der Blickrichtung des Piloten während des Fluges entwickelt. Diese Informationen dienen als Eingangsdaten für das am ISF (Prof. Onken) entwickelte Assistenzsystem.

### 2.4.3 Autonome Landfahrzeuge

Mitte der 80er Jahre wurde mit der Entwicklung autonomer Straßenfahrzeuge begonnen. Aufgrund der geringen Rechenleistung der zur Verfügung stehenden Bildverarbeitungssysteme wurde die Domäne Autobahn wegen der eingeschränkten Objektvielfalt und der klaren Strukturierung der vorkommenden Objekte als Zielgebiet für die ersten Systeme gewählt. Nach der Erprobung der Fahrzeugregelung im Simulationskreis wurde für die praktische Realisierung ein LKW (VAMORS für **V**ersuchsfahrzeug für **a**utonome **M**obilität und **R**echnersehen) beschafft und den Erfordernissen entsprechend umgerüstet (siehe 3.3.2). Erste Ergebnisse wurden von A. Zapp [104] erzielt, der auf einem für den allgemeinen Verkehr noch nicht freigegebenen Autobahnabschnitt Fahrten mit automatischer Längs- und Querführung bis zur bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von 96 km/h durchführen konnte. In der Arbeit von B. Mysliwetz [66] wurde das von E.D. Dickmanns [16] entwickelte gemittelte Klothoidenmodell für die robuste optische Erfassung des Fahrspurverlaufs und die Schätzung der Fahrzeugrelativlage eingeführt. Zusätzlich wurde die Modellierung der Straße um den vertikalen Verlauf erweitert. In den folgenden Jahren wurden die Arbeiten am ISF im Rahmen des EUREKA Verbundprojektes PROMETHEUS<sup>4</sup> [98] auf einem sehr breiten Spektrum von Anwendungen erfolgreich weitergeführt.

Bei der Fahrzeugführung konnte C. Brüdigam [11] aufgrund der gestiegenen Rechenleistung den Zustandsregler für die Querführung so erweitern, daß die Berechnung des Reglervektors nunmehr in Echtzeit erfolgte. Zusätzlich entwickelte er ein autonomes Spurwechselmanöver.

Erste Arbeiten zur Erkennung von Fremdfahrzeugen wurden von Th. Chris-

---

<sup>4</sup>Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety.

tians [20] durchgeführt. J. Schick [79] führte für die Klassifizierung von Fremdfahrzeugen generische Formmodelle zur geometrischen Beschreibung verschiedener Fahrzeugklassen ein. Diese Arbeiten wurden von V. von Holt [97] weitergeführt. M. Schmid [81] entwickelte in seiner Arbeit Methoden zur Entdeckung teilweise verdeckter Fahrzeuge. Dabei beschränkte er sich auf die Fahrzeugklasse LKW, für die er als Modellierung ein einfaches Quadermodell wählte. In seiner Arbeit konnte er nachweisen, daß bei Schrägansichten die Raumdiagonale als signifikantes Merkmal verwendet werden kann. W. Kinzel [49] erarbeitete die Grundlagen für die Erkennung von Fußgängern; für einen Einsatz auf dem realen Versuchsträger reichte jedoch die zur Verfügung stehende Rechenleistung bei weitem nicht aus.

Bei der PROMETHEUS Abschlußdemonstration im Herbst 1994 in Paris konnte der mittlerweile neu ausgerüstete zweite Versuchsträger, ein PKW (VAMP für **V**ersuchsfahrzeug für **a**utonome **M**obilität durch Rechnersehen im **P**KW) [19] autonom im öffentlichen 3-spurigen Straßenverkehr der Autoroute A1 nach Lille teilnehmen. Dabei wurde der Eigenzustand relativ zur Straße (siehe R. Behringer [6]) und zu jeweils max. 5 Fremdfahrzeugen in der vorderen und hinteren Hemisphäre geschätzt (siehe F. Thomanek [95]). Damit konnten auch Spurwechsel, nach der Freigabe durch den Bediener, vollautonom demonstriert werden. Während sich die Arbeiten im Rahmen des PROMETHEUS Projekts auf die Domäne Autobahn konzentrierten, wurden parallel dazu mit VAMoRS Verfahren zur autonomen Navigation auf Wegenetzen und Straßen niederer Ordnung untersucht. Die von Ch. Hock [39] (siehe auch Abschnitt 2.4.4) an einem autonomen Fahrzeug für den industriellen Bereich erzielten Erkenntnisse im Bereich der wissensbasierten Fahrzeugführung wurden überarbeitet und für den Bereich der Straßenfahrzeuge erweitert. Damit wurde die Fahrzeugführungsaufgabe erstmals in einen globalen Missionskontext gestellt. N. Müller [64] realisierte in seiner Arbeit vollautonome Abbiegemanöver in Querstraßen und legte damit den Grundstein für die autonome Navigation auf Wegenetzen. In Verbindung mit der Fähigkeit, das vertikale Bodenprofil vor dem Fahrzeug zu erkennen [63] wurde damit die Grundlage für das autonome Navigieren auf Straßen niederer Ordnung geschaffen. Dabei wurde eine 2-Achsen Kameraplattform zur aktiven Blickrichtungssteuerung (siehe J. Schiehlen [80]) zur Fixierung der relevanten Merkmale im Bild erfolgreich eingesetzt.

#### 2.4.4 Landmarkennavigation

Die Ausgangsbasis für die vorliegende Arbeit stellte das von Ch. Hock entwickelte System zur wissensbasierten Fahrzeugführung dar. Darin wurde zunächst in Zusammenarbeit mit einem industriellen Forschungsinstitut<sup>5</sup> ein Gesamtsystem für die Automatisierung von Flurförderfahrzeugen im industriellen Bereich konzipiert und auf dem Versuchsträger ATHENE verifiziert. Dieses System umfaßte eine globale Bahnplanung, eine Ablaufsteuerung für die Durchführung des Plans und die Fahrzeugregelung. Die visuelle Bestimmung der Eigenposition erfolgte an einfachen künstlichen Landmarken.

Bei der Integration des Systems in das Versuchsfahrzeug VAMORS wurde die wissensbasierte Planungskomponente stark erweitert und die Ablaufsteuerung an die vorhandene Fahrzeugführung angepaßt. Als Planungsgrundlage diente eine topologische Straßenkarte mit zweidimensionaler geometrischer Modellierung und Referenzen auf Elemente einer Landmarkenkarte. Als Wahrnehmungsprozeß zur visuellen Landmarkennavigation wurde eine adaptierte Version des von F. Thomanek entwickelten Systems übernommen. Für die visuelle Erkennung der Merkmale von Landmarken wurde ein Satz vordefinierter Masken verwendet. Der Aufbau der Planungskomponente ist in [30] dargestellt.

#### 2.4.5 Diskussion der Ergebnisse

Das zentrale Element aller aufgeführten Arbeiten bildete stets der 4D Ansatz, dessen Leistungsfähigkeit im Laufe der Jahre in immer anspruchsvolleren Anwendungen eindrucksvoll aufgezeigt werden konnte.

Als besondere Demonstration der erreichten Robustheit und Einsatzreife des Systems gilt sicherlich die Langstreckenfahrt von München nach Odense [58], die mit VaMP zu 95% vollautonom und mit Geschwindigkeiten bis zu 180 km/h zurückgelegt wurde. Bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge zeichnete sich nach der Abschlußdemonstration des PROMETHEUS-Projekts ab, daß auf der Basis der verwendeten Hardware keine signifikante Steigerung der Leistungsfähigkeit mehr zu erwarten war. Zwar wurden in den bearbeiteten Teildisziplinen Objekterkennung (Straßen und Fremdfahrzeuge) und Fahrzeugführung bereits Höchstleistungen erzielt, jedoch waren die einzelnen Systemkomponenten, bedingt durch die eingesetzte Rechnerarchitektur mit vergleichsweise geringer Rechenleistung pro Prozessor, stets klar von einander abgegrenzt und im System

---

<sup>5</sup>der TZN Forschungs- und Entwicklungszentrum Unterlüß GmbH

---

nur lose miteinander gekoppelt. Die Erkennungsprozesse waren speziell für eine einzige Aufgabe, die Erkennung genau einer Klasse von Objekten, konzipiert und entwickelt. Für den Einsatz in unterschiedlichen Domänen wurden die Module vor dem Start von Hand parametrisiert bzw. optimiert; eine Steuerung zur Laufzeit war nicht möglich. Gerade die Arbeiten von N. Müller zeigten auf, daß für die Handhabung komplexerer Szenarien ein höherer Grad an Flexibilität und vor allem eine engere Verkopplung der einzelnen Systemkomponenten erforderlich war.

Außerdem wurden die bislang verwendeten Rechnersysteme vom Hersteller nicht weiter unterstützt und die Weiterentwicklung eingestellt.

Im Jahr 1996 wurden daher am ISF die Weichen für eine völlig neue Systemarchitektur gestellt. Diese wird in Kapitel 3 vorgestellt.





## 3 Die 'EMS-Vision' Architektur

Bei der Auslegung der neuen Wahrnehmungsarchitektur unter Berücksichtigung der bis dato gewonnenen Erkenntnisse schälten sich mehrere Faktoren heraus, die für die Erreichung eines neuen Leistungsstandes erforderlich schienen:

- Entwicklung allgemeiner Erkennungsprozesse für die Handhabung unterschiedlicher Objektklassen, basierend auf einer
- einheitlichen Repräsentation für alle Objektklassen und einer
- zentralen Wissensrepräsentation.
- Stärkere Verkopplung der einzelnen Systemkomponenten.
- Einführung überlagerter Entscheidungsebenen zur Erreichung situationsgerechten Verhaltens.
- Explizite Repräsentation der Fähigkeiten und Ressourcen des Systems.
- Entwicklung von Mechanismen zur gezielten Steuerung der Fähigkeiten durch die Entscheidungsebenen.

Aus diesem Anforderungskatalog heraus entstand die neue Systemarchitektur EMS-Vision. Die Bezeichnung **EMS** leitet sich aus drei grundlegenden Eigenschaften des Systems ab: die Auswertung der Sensorsignale der Kameras wird mit Hilfe von rekursiven Schätzverfahren erwartungsbasiert durchgeführt, wobei Form- und Bewegungsmodelle zur Anwendung kommen. Dabei wird ein neues **multifokales** Sensorkonzept verwendet, um die Vorteile eines breiten Gesichtsfeldes mit denen einer hohen Auflösung im zentralen Sehbereich zu kombinieren. Durch die Überlappung der Sichtbereiche mehrerer Kameras ist auch eine Stereoauswertung möglich. Taucht ein neues Objekt im peripheren Gesichtsfeld auf, so wird durch eine sehr schnelle Blickzuwendung, **Sakkade** genannt, das Fahrzeugauge MARVEYE so ausgerichtet, daß dieses Objekt voll im Blickfeld der hochauflösenden Kameras liegt und innerhalb weniger Zyklen analysiert werden kann. Nach Abschluß der Analyse kann die Aufmerksamkeit wieder auf andere Bereiche gerichtet werden.

### 3.1 Sensorkonzept für die visuelle Wahrnehmung

In der PROMETHEUS-Projektphase wurde eine bifokale Kameraanordnung, aus einer Weitwinkelkamera mit 7.5 mm Brennweite für den Nahbereich und

einer Telekamera mit 24 mm Brennweite für den Fernbereich bestehend, eingesetzt. Im Nahbereich ergab sich damit ein Gesichtsfeld (field of view, f.o.v.) von  $46^\circ$ . Wegen des geringeren Datenaufkommens wurden ausschließlich monochrome Kameras eingesetzt. Während der intensiven Testphase kristallisierten sich mehrere Schwachstellen heraus:

1. Das Gesichtsfeld im Nahbereich ist nicht ausreichend, um beispielsweise dicht vor dem Fahrzeug einscherende Fremdfahrzeuge rechtzeitig wahrzunehmen.
2. Die Sichtweite der Telekamera ist für bestimmte Anwendungsfälle, wie z. B. beim Fahren mit Geschwindigkeiten über 130 km/h oder für die Landmarkennavigation, zu gering.
3. Im Baustellenbereich ist eine Farbbildauswertung nötig, um gelbe und weiße Spurmarkierungen voneinander unterscheiden zu können.

Für das EMS-System wurde daher eine völlig neuartige Kameraanordnung geschaffen: das Multifokale aktive / reaktive Fahrzeugauge (**V**ehicle **e**ye) **MAR-VEYE**. Es besteht aus bis zu 4 CCD-Kameras, die mit einer speziellen Leichtbauhalterung auf der am ISF entwickelten Kameraplattform montiert sind. Für die Erfassung der näheren Fahrzeugumgebung werden zwei  $1/2''$  S/W-Kameras eingesetzt. Diese können, je nach Aufgabenstellung, in einer parallelen oder leicht divergenten Anordnung montiert werden. Die parallele Anordnung ermöglicht durch die breite Überlappung der beiden Sichtbereiche eine Stereoauswertung über einen größeren Sichtbereich. Dies wird für Fahrten auf Straßen niederer Ordnung und im Gelände verwendet, um die dreidimensionale Oberflächenstruktur der geplanten Trajektorie des Fahrzeugs auf ihre Befahrbarkeit zu überprüfen (siehe Siedersberger et al. [90]). Dazu müssen die Trajektorien voll im Stereobereich liegen. Für diesen Einsatzzweck werden Objektive mit 16mm Brennweite zur Erzielung der nötigen Tiefenauflösung eingesetzt. Die divergente Anordnung, bei der die optischen Achsen der Kameras in der Horizontalen um  $46^\circ$  gegeneinander verdreht sind, ermöglicht aufgrund des bei Verwendung von Objektiven mit 6mm Brennweite auf  $\approx 105^\circ$  angestiegenen Gesichtsfeldes die frühzeitige Erkennung von überholenden Fremdfahrzeugen auf Autobahnen (siehe A. Rieder [77]); bei der Navigation auf Wegenetzen ist ein großes Gesichtsfeld im Nahbereich von Vorteil für die Straßenerkennung. Eine 3-Chip Farbkamera mit einem milden Teleobjektiv von 24 mm Brennweite wird zur Objekterkennung im mittleren Entfernungsbereich verwendet. Eine starke Telekamera mit 50 – 75 mm Brennweite ermöglicht es, Objekte in großer Entfernung zu erkennen. Gegenüber der bifokalen Kameraanordnung (mit monochromen Kameras)

ergibt sich allerdings ein erheblich höheres Datenaufkommen<sup>1</sup>.

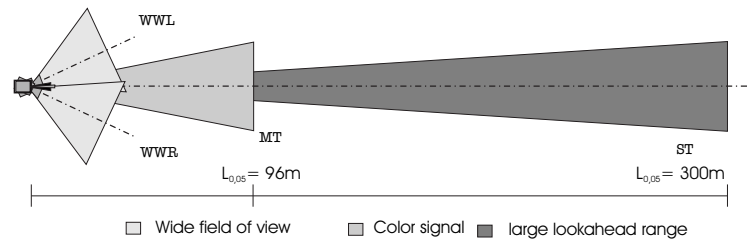


Abb. 3.1: Konzept der MarVEye Konfiguration (aus [54])

Abbildung 3.1 zeigt die Auslegung des MARVEYE Konzepts. Der für jede Kamera angegebene Wert  $L_{0.05}$  spezifiziert jeweils die Entfernung, bei der ein Objekt von  $0.05m = 5cm$  Breite bei der Projektion ins Bild auf genau 1 Pixel abgebildet wird. Damit bildet sich z. B. eine Fahrbahnmarkierung von  $15cm$  Breite bei der Projektion ins Bild auf genau 3 Pixel ab und kann somit noch visuell gut wahrgenommen werden.

Im folgenden Abschnitt wird die Zielsetzung für die neue Wahrnehmungsarchitektur dargestellt.

## 3.2 Wahrnehmungsarchitektur

In den früheren Systemen am ISF wurde ein Großteil der Kommunikation zwischen einzelnen Systemkomponenten direkt über proprietäre Schnittstellen durchgeführt. Für die lose Verkopplung funktionaler Einheiten zur Demonstration von Einzelfunktionalitäten war dies ausreichend. Zur Realisierung eines autonomen Systems mit eigenen Entscheidungsinstanzen ist jedoch eine komplexere Wissenrepräsentation erforderlich.

Ein entscheidendes Element für den Übergang zu einem flexiblen und autonomen System stellt daher die zentrale Wissensrepräsentation dar.

### 3.2.1 Zentrale Wissensrepräsentation

Die zentrale Wissensrepräsentation im EMS-VISION SYSTEM ist objektorientiert angelegt. Neben den internen Vorstellungen des Wahrnehmungssystems

<sup>1</sup>Für eine detaillierte Analyse des Datenaufkommens wird auf die Dissertation von M. Lützel [54] verwiesen

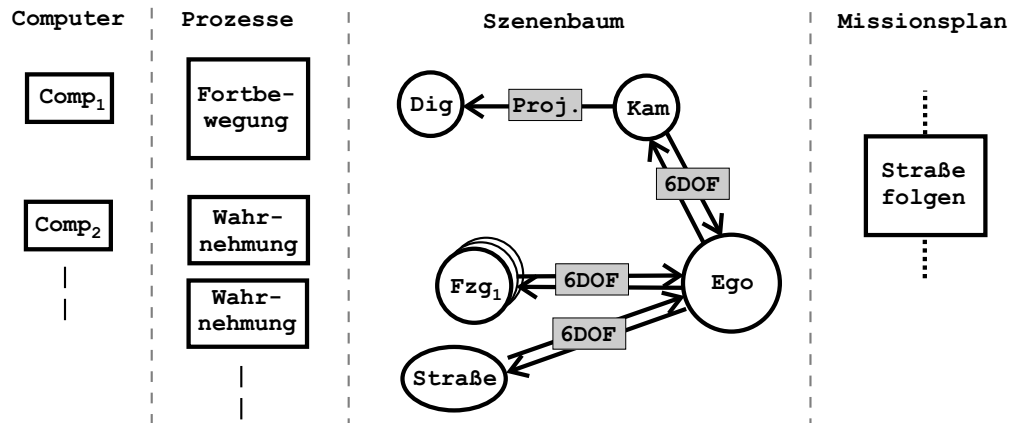


Abb. 3.2: Wissensrepräsentation

über die Umwelt und die darin enthaltenen Objekte und Subjekte<sup>2</sup> enthält sie auch Informationen über den eigenen Systemzustand und die verfügbaren Ressourcen. Zu diesem Zweck wurde sie aus 4 unterschiedlichen Bereichen aufgebaut:

**Jeder Rechner**, der im System verfügbar ist, wird durch ein Computer-Objekt repräsentiert (siehe Abbildung 3.2, linke Spalte). Diese Objekte stellen Informationen, wie z. B. über die dort verfügbaren Ressourcen oder die momentane Recherauslastung, zur Verfügung.

**Jeder Prozeß** (im Sinne der Informatik) im System wird durch ein Prozeß-Objekt repräsentiert (siehe Abbildung 3.2, 2. Spalte v.l.). Diese dienen zur Punkt-zu-Punkt Kommunikation zwischen einzelnen Prozessen.

**Alle physikalischen Objekte**, die in der Szene vorhanden sind, werden in der **Dynamischen-Objektdaten-Basis (DOB)** repräsentiert (Abbildung 3.2, 3. Spalte v.l., zeigt eine vereinfachte Version des Szenenbaums). Wie von D. Dickmanns [15] vorgeschlagen, ist diese baumartig organisiert. Die einzelnen Knoten des Szenenbaums repräsentieren physikalische Objekte (bzw. die Koordinatensysteme, in denen die Objekte beschrieben werden) und virtuelle Koordinatensysteme, die der Szenenbeschreibung dienen. Die Knoten enthalten Informationen über die repräsentierten Objekte, wie z. B. Form- und Dynamikmodelle und stellen Methoden für den Zugriff auf diese Daten zur Verfügung. Durch die Verwendung homogener Koordinaten zur Beschreibung von Relativlagen lassen sich die Transformationen zwischen den einzelnen Koordinatensystemen (sowohl Translation als auch

<sup>2</sup>Für eine detaillierte Beschreibung der Unterscheidung zwischen Subjekt und Objekt wird der Leser auf E.D. Dickmanns [18] verwiesen.

Rotation) durch Multiplikation mit  $4 * 4$  **H**omogenen **T**ransformations-**M**atrizen (**HTM**<sup>3</sup>) darstellen. **HTMs** können sowohl für die Darstellung von Relativlagen (**6DOF**) zwischen physikalischen Objekten als auch für die Perspektivische Projektion (**Proj.**) nach dem Lochkameramodell verwendet werden. Jeder Knoten stellt Methoden für die Berechnung der HTM zu seinem Vater-Knoten (und vice versa) zur Verfügung. Durch dieses generalisierte Verarbeitungsschema lassen sich die Transformationen zwischen beliebigen Knoten effizient berechnen und mehrere Transformationsschritte zu einer Transformationsmatrix zusammenfassen; eine Einschränkung ergibt sich allerdings bei der Perspektivischen Projektion: da diese nicht invertierbar ist, kann die Transformation nur unidirektional angegeben werden.

**Der Missionsplan** (Abbildung 3.2, rechte Spalte) enthält die Beschreibung der aktuellen Mission; er ist als sequentielle Liste von Missionselementen angelegt. Diese enthalten neben Aufgaben für die Fortbewegung auch Referenzen auf Einträge in den statischen Wissensbasen über erwartete Objekte.

Alle Objekte innerhalb der Wissensrepräsentation können durch einen eindeutigen Bezeichner identifiziert werden.

Für jede Objektklasse innerhalb der Wissensrepräsentation existiert ein spezialisierter Prozeß, der Experte, der die Datenfelder der zugehörigen Objekte mit Informationen speist.

### 3.2.2 Der allgemeine Wahrnehmungsprozeß

Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, waren während des Projekts PROMETHEUS spezialisierte Wahrnehmungsmodule für unterschiedliche Aufgabenbereiche entstanden. Obwohl diese jeweils im Kern auf dem 4D-Ansatz basierten, waren es völlig eigenständige, auf die jeweilige Problemstellung hin optimierte Entwicklungen. Für die geplante Erhöhung der Erkennungsleistung im EMS-VISION SYSTEM sollte ein anderer Weg beschrritten werden. Als Ausgangsbasis diente dabei ein von D. Dickmanns [15] entwickeltes "Rahmensystem für die visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer", das ein generalisiertes und einheitliches Verarbeitungsschema für die zyklische Wiedererkennung von Objekten unterschiedlichster Klassen vorstellte. Der daraus

---

<sup>3</sup>eine Einführung in Homogene Koordinaten wird z. B. von R. Paul [70] gegeben.

entstandene allgemeine Wahrnehmungsprozeß wird sowohl für die Erkennung von Landmarken (siehe Abschnitt 7.4) als auch für die Straßenerkennung (vgl. M. Lützeler [54]) genutzt.

### 3.2.3 Inertial-basierte Eigenzustandsschätzung

Für die Schätzung des Eigenzustands werden im Modul *IbSE* Sensordaten der Inertialsensorik, Odometrie und des GPS-Empfängers in einem Kalman-Filter verarbeitet. Der Grundansatz geht auf den von S. Werner [100] entwickelten Starrkörperschätzer zurück. Als Erweiterung wurde von K.-H. Siedersberger [89] eine Schnittstelle eingeführt, durch die zusätzlich Meßwerte über die Relativlage zu Landmarken eingespeist werden können. Dadurch kann eine Kompensation von Drift-Effekten erzielt und eine verbesserte Eigenzustandsschätzung erreicht werden.

### 3.2.4 Wissensbasierte Planungskomponenten

Zielgerichtetes autonomes Handeln setzt eine Planungskomponente voraus, die aus abstrakten Zielvorgaben wie z. B. "Fahre von hier zum Punkt X" unter Auswertung von Hintergrundwissen über das Operationsgebiet und die eigenen verfügbaren Fähigkeiten einen Plan für die Bewältigung der gestellten Aufgabe ausarbeiten kann. Dieser Plan ist in geeigneter Weise in Einzelelemente zu untergliedern und situationsgerecht als Teilaufgaben dem System bekannt zu geben. Aus dieser Ebene heraus kann außerdem die Instanziierung von Hypothesen über erwartete Objekte, wie z. B. Landmarken, erfolgen.

### 3.2.5 Verhaltensentscheidung

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zu früheren Systemen ist, daß die einzelnen Fähigkeiten zur Wahrnehmung und Fortbewegung im EMS-VISION SYSTEM auftragsorientiert arbeiten. Die situationsgerechte Aktivierung der einzelnen Fähigkeiten erfolgt durch die Verhaltensentscheidung. Dabei wurde eine funktionale Aufteilung in die Fähigkeiten der Fortbewegung und der Wahrnehmung getroffen. Die Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung, *Behavior Decision for Locomotion (BDL)*, aktiviert diejenigen Fähigkeiten, die zur Bewältigung der gestellten Fortbewegungsaufgabe am besten geeignet sind. Die Verhaltensentscheidung für die Wahrnehmung, *Behavior Decision for Gaze*  $\mathcal{E}$

*Attention (BDGA)*, ist für die Aktivierung von Wahrnehmungsfähigkeiten und die Bestimmung einer geeigneten Strategie für die aktive Blickrichtungssteuerung zuständig. Die Vorgabe der Ziele für und die Lösung von Konflikten zwischen BDGA und BDL erfolgt durch die Zentrale Entscheidungsinstanz *Central Decision (CD)*. Die Entscheidungsinstanzen des EMS-VISION-Systems sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

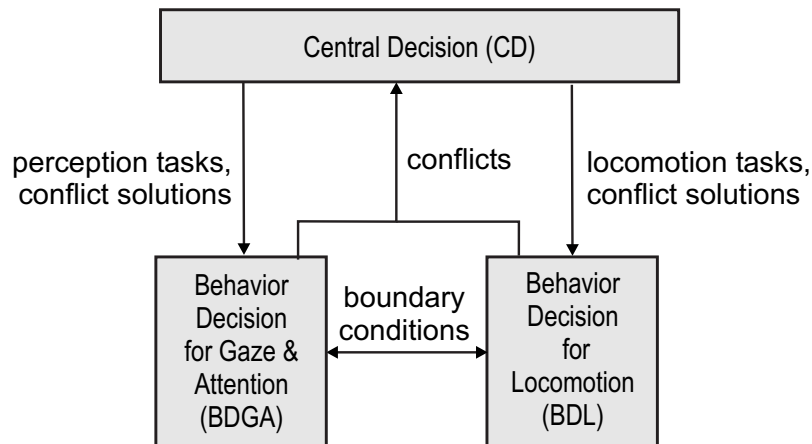


Abb. 3.3: Die Entscheidungsinstanzen des EMS-VISION-Systems (nach [57])

*CD* fungiert als Schnittstelle des Systems nach außen. Zielvorgaben durch den Bediener erfolgen direkt an *CD*; *CD* generiert daraus einen Planungsauftrag für die wissensbasierten Planungskomponenten und begutachtet die Ergebnisse der Planung. Zur Ausführung eines akzeptierten Plans werden die einzelnen Teilaufgaben an *BDGA* und *BDL* weitergereicht.

Erfolgen keine Zielvorgaben, kann *CD* selbständig einzelne Systemkomponenten aktivieren, z. B. um gespeicherte Daten aus früheren Missionen zu analysieren um das Hintergrundwissen zu aktualisieren und zu erweitern (siehe Abschnitt 7.5) oder zur Beobachtung der Umgebung im Stand.

### 3.2.6 Funktionale Systemarchitektur

Für die Darstellung der funktionalen Zusammenhänge und Abläufe wurde das EMS-VISION-System von M. Maurer [57] in 4 Ebenen unterteilt (siehe Abbildung 3.4):

- hardwarespezifische Ebene,
- 4-D Ebene,

- regelbasierte Ebene,
- wissensbasierte Ebene.

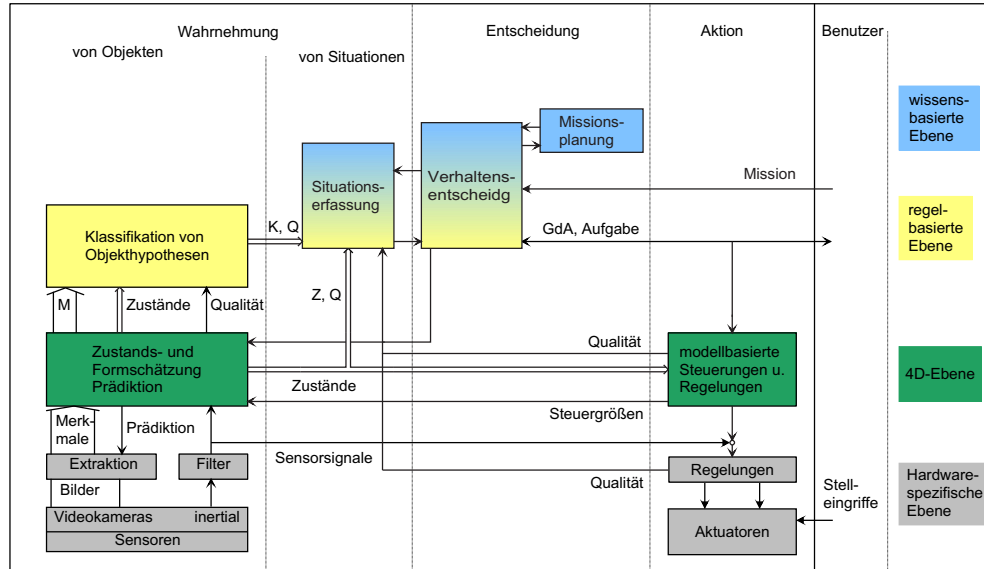


Abb. 3.4: Hierarchie der EMS-Funktionalitäten nach [57]

Die hardware-spezifische Ebene bildet die Basis der EMS-Hierarchie und umfasst neben der eigentlichen Hardware auch alle diejenigen Programme, die direkt mit dieser interagieren und speziell dafür angepaßt werden müssen.

Auf der 4D-Ebene läuft zum einen die erwartungsbasierte Auswertung der eintreffenden Sensorsignale mittels rekursiver Schätzverfahren gemäß dem 4D-Ansatz ab (Fähigkeiten zur Wahrnehmung, linke Seite). Die Schätzergebnisse dienen als Eingangsgrößen für die auf dieser Ebene angelagerten modellbasierten Regelungen und Steuerungen (Fähigkeiten zur Aktion, rechte Seite). Daraus werden Führungsgrößen für die in der hardware-spezifischen Ebene angesiedelten Regler generiert.

In der regelbasierten Ebene erfolgt die Zusammenschau der in der 4D-Ebene gewonnenen Informationen mit den eigenen Zielvorstellungen. Nach der Analyse der Situation erfolgt die Parametrisierung und Aktivierung einzelner Fähigkeiten der 4D-Ebene durch die Verhaltensentscheidung.

In der wissensbasierten Ebene sind diejenigen Komponenten angeordnet, die auf Hintergrundwissen, das z. B. in Form digitaler Karten vorliegt, zurückgreifen. In dieser Ebene werden die mittel- und langfristigen Pläne für die regelbasierte Ebene generiert.



## 3.3 Technische Umsetzung

### 3.3.1 Das Rechnersystem

In der ersten Planungsphase des EMS-Projekts wurde zunächst eine Marktuntersuchung durchgeführt, um ein geeignetes neues Rechnersystem zu finden. Dabei stellte sich heraus, daß die gängigen Personal Computer (PC) mittlerweile eine Leistungsfähigkeit erreicht hatten, die bis dato extrem teuren Spezialsystemen vorbehalten war; mit einem Prototypen-System konnte nachgewiesen werden, daß die Realisierung eines Echtzeit-Wahrnehmungssystems für autonome Fahrzeuge auf dieser Hardwarebasis möglich ist [31]. Für die Verwendung sprachen auch die günstigen Prognosen bezüglich der Kontinuität der Entwicklung und der stetigen Steigerung der Rechenleistung<sup>4</sup>. Letztendlich wurde die Intel-basierte PC-Schiene als künftiges Zielsystem ausgewählt. Eine detailliertere Beschreibung der Entscheidungskriterien wird in der Dissertation von A. Rieder [77] gegeben.

Das EMS-VISION System wurde auf einem heterogenen Rechnerverbund aus Transputern und PCs realisiert. In Abbildung 3.5 ist das im Versuchsfahrzeug VaMoRs eingerüstete Gesamtsystem abgebildet. Als Rechner für das Fahrzeug-Subsystem wird in beiden Versuchsfahrzeugen ein Transputernetzwerk eingesetzt, das die Aufgaben der Regelung des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung und der Kommunikation zwischen dem Fahrzeugrechner und dem Hostsystem übernimmt.

Für diesen Zweck sind Transputer wegen ihrer hohen Kommunikationsbandbreite und ihrer Robustheit ganz besonders geeignet. Darüber hinaus werden diese RISC-Prozessoren auch harten Echtzeitanforderungen, wie sie bei der Fahrzeugregelung vorliegen, durch die beiden integrierten Timer, einen in Hardware realisierten Scheduler und die Parallelrechnerarchitektur gerecht. Neben der Fahrzeugregelung übernimmt der Fahrzeugrechner auch das Einlesen der von der Fahrzeugsensorik gelieferten Daten. Der Datenaustausch zwischen dem Fahrzeugrechner und dem Hostsystem wird durch eine Linkkommunikation (RS422) realisiert. Die für die Fahrzeugregelung notwendigen Führungsgrößen und die Sensordaten werden bidirektional über denselben Link mit einer Frequenz von

---

<sup>4</sup>Die 1965 von Gordon Moore [62] prognostizierte Verdopplung der Anzahl von Transistoren und damit der Rechenleistung pro Chip alle 18 bis 24 Monate ist als "Moore's law" bekannt; Bis zum Erreichen der physikalischen Grenzen der Miniaturisierung, mittlerweile für das Jahr 2017 vorausgesagt, wird dieses Gesetz auch noch Gültigkeit haben.

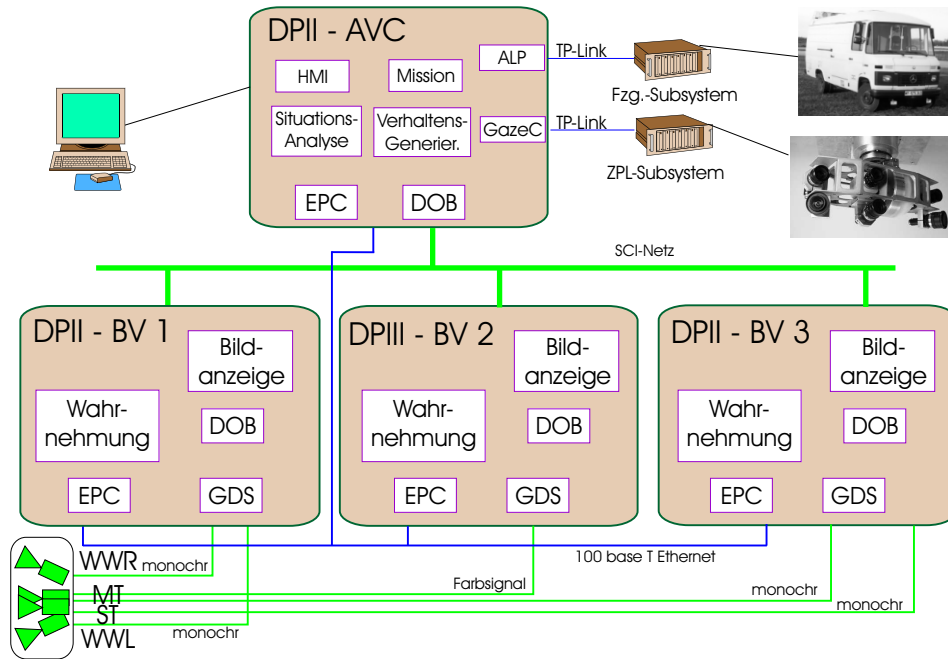


Abb. 3.5: Das Rechnersystem (aus [54])

25 Hz gesandt. Das Hostsystem besteht aus einem Netz von 4 PCs, die unter dem Betriebssystem Windows NT 4.0 betrieben werden. Diese Rechner sind über **F**ast **E**thernet (FE) (theoretische Bandbreite: 100Mbit/s) für die Systemadministration und ein **S**calable **C**oherent **I**nterface Network (SCI) (theoretische Bandbreite: 85MByte/s<sup>5</sup>) zur breitbandigen Kommunikation im Echtzeit-Betrieb vernetzt. Derzeit werden Rechner mit jeweils zwei Pentium II bzw. Pentium III Prozessoren eingesetzt. Drei PCs sind mit Bilddigitalisierungskarten (IMPs der Firma Imaging Technology) ausgerüstet, die jeweils bis zu 3 Bildströme digitalisieren können. Diese Rechner werden als “Eingebettetes System” ohne Bedienerkonsole betrieben. Dazu wurde von S. Baten ein eigenes Dienstprogramm, “Embedded PC Demon” (EPC, siehe auch [4]), entwickelt, das die Administration und das gezielte Starten von Programmen auf Rechnern ohne Bedienerkonsole über das Fast Ethernet ermöglicht. Der kontinuierliche Einzug der Bildsignale wird durch den **G**rab **D**evice **S**erver (GDS) im Videotakt von 25 Hz durchgeführt. Der Datentransfer von den Wahrnehmungsprozessen zur DOB über Shared Memory und der Datenaustausch zwischen den einzelnen Instanzen der DOB auf den unterschiedlichen Rechnern über das SCI erfolgen jeweils im Systemtakt von 25 Hz. Daraus werden die Führungs-

<sup>5</sup>Quelle: <http://www.dolphinics.com/point.html>

größen für die Eigenbewegung des Fahrzeugs und die Blickrichtung bestimmt und an die Subsysteme weitergeleitet. Ein Rechner mit Bedienerkonsole bildet sowohl die Mensch-Maschine Schnittstelle als auch den Gateway zum Transputernetz. Auf diesem Rechner sind zum einen diejenigen Prozesse angesiedelt, die nicht im Videozyklus betrieben werden müssen. Zum anderen werden in diesem Rechner auch die Schnittstellenkarten zur Kommunikation mit dem Transputersubsystem betrieben, um die verbleibende Kommunikationsbandbreite der Bildverarbeitungs-Rechner, die durch den Datentransfer der Bilddaten bereits erheblich herabgesetzt ist, nicht zusätzlich zu belasten. Die Daten des GPS-Empfängers werden über eine RS 232 Schnittstelle an diesem Rechner mit 1 Hz eingelesen. Als Rechnersystem für die Blickrichtungsregelung stehen derzeit zwei alternative Systeme zur Verfügung. Im Versuchsfahrzeug VaMoRs wurde das bereits im Vorgängersystem eingesetzte Transputernetz, das auch in Abbildung 3.5 dargestellt ist, beibehalten. Für das Versuchsfahrzeug VaMP wird, um auch hier von der kostengünstigeren off-the-shelf Hardware profitieren zu können, ein Industrie-PC für die Regelung der Blickrichtung verwendet. Als CPU wird hier ein Intel 80486 Prozessor eingesetzt, der über den im IPC-Bereich üblichen AT96-Bus auf die A/D-Wandler zugreift. Bei der Wahl des Kommunikationsmediums zum Hostsystem stehen bei der IPC-Lösung zwei Möglichkeiten zur Wahl: alternativ zum Transputerlink kann eine CAN-Bus Schnittstelle verwendet werden, die als Vorteil das Auslösen eines Interrupts beim Eintreffen eines Datenpakets bietet. Damit können Laufzeitverluste, die beim zyklischen Überprüfen des Transputerlinks auf eingetroffene Daten ("Polling") entstehen, vermieden werden. Über diesen Kanal werden mit 25 Hz Informationen über den Status, die Winkellagen und die Drehgeschwindigkeiten der Zweiachsen-Plattform an den PC-seitigen Prozeß Gaze Control (GazeC) gesandt.

### 3.3.2 Das Versuchsfahrzeug VaMoRs

Das unter dem Akronym VaMoRs bekannte **V**ersuchsfahrzeug zur **a**utonomem **M**obilität und **R**echnersehen (Abbildung 3.6) basiert auf einem handelsüblichen Daimler Benz Kastenwagen vom Typ 508D mit Servolenkung und 4-Gang Automatikgetriebe. Diverse Umbauten mußten durchgeführt werden, um das Fahrzeug an die Anforderungen eines "rollenden Labors" anzupassen. Im Fahrzeuginneren wurde ein Arbeitsplatz mit einem Arbeitstisch eingerichtet. Zur Unterbringung der Rechnerausstattung stehen drei 19" Racks zur Verfügung. Zur Stromversorgung der Rechner dient ein im Fahrzeugheck eingebautes, von



Abb. 3.6: Das Versuchsfahrzeug VaMoRs

einem Dieselmotor angetriebenes Stromaggregat mit 10kVA Leistung, das ein Bordnetz mit 220V Einphasen-Wechselspannung versorgt. Der Einbau von zusätzlicher Aktuatorik ermöglicht es, Gas, Bremse und Lenkung sowie Blinker, Licht, Scheibenwischer und Hupe vom Rechner aus anzusteuern (für Details über die Umrüstung von VaMoRs siehe Zinkl [105]).

### 3.3.3 Das Sehsystem

Gemäß der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Konzeption erfolgte die technische Realisierung des neuen Fahrzeugauges MARVEYE. Abbildung 3.7 zeigt die derzeit im Versuchsfahrzeug VaMoRs eingerüstete Konfiguration. Um die Domänen “Fahren auf Wegenetzen”, für die eine divergente Anordnung der Weitwinkelkameras vorgesehen ist, und “Fahren im Gelände” (mit paralleler Anordnung) in einer zusammenhängenden Mission handhaben zu können, wurde die MARVEYE Konfiguration um ein zusätzliches Kamerapaar ergänzt. Die Kameras sind zur aktiven Blickrichtungssteuerung auf die am Institut entwickelte 2-Achsen-Kameraplattform montiert.

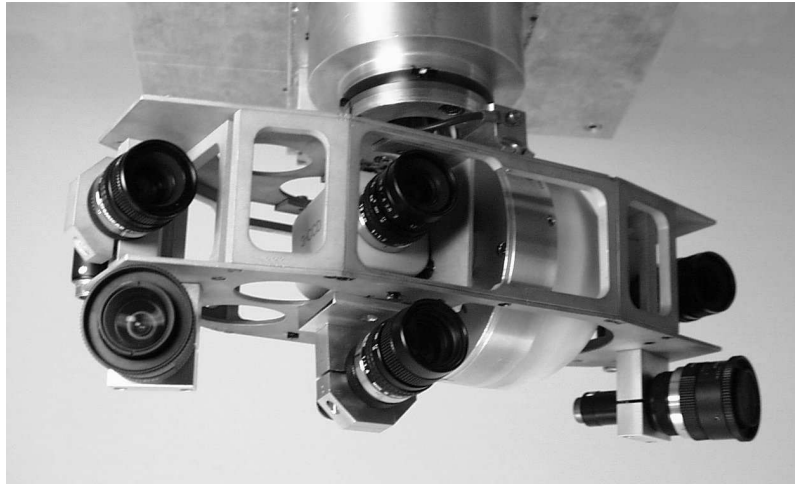


Abb. 3.7: Technische Realisierung von MarVEye mit zusätzlichem Stereopaar

### 3.3.4 Konventionelle Sensorik

Der zweite Bereich der Sensorik umfaßt das Messen von Betriebszuständen: Zur Weg- und Geschwindigkeitsmessung wird ein inkrementeller Drehwinkelmeßgeber, der am linken Vorderrad montiert ist, eingesetzt. Für die Messung des Lenkwinkels wird ein Potentiometer verwendet, das direkt am Achsschenkel des linken Vorderrades befestigt ist. Zur Messung der Beschleunigungen in Richtung der Hauptachsen des fahrzeugfesten Koordinatensystems und der Winkelgeschwindigkeiten um die Hauptachsen ist ein Inertialsensorkpaket installiert. Zusätzlich wurde ein "TRIMBLE LASSEN SK-8" 8-Kanal-GPS-Empfänger [84] in das Fahrzeug integriert, der für die globale Positionsbestimmung verwendet wird. Für die Vermessung und Kartographierung des Versuchsgeländes wird zusätzlich ein Langwellen-Empfänger für den Empfang von Korrekturdaten (Differential GPS) verwendet. Dadurch läßt sich im Raum München<sup>6</sup> eine Positionsgenauigkeit von  $\sigma \approx 3$  Metern erreichen. Das Korrektursignal kann flächendeckend in ganz Deutschland empfangen werden. Während einer autonomen Fahrt wird die Fahrzeugsteuerung vollständig von der Fahrzeugführungssoftware übernommen; sie kann jedoch jederzeit vom Bediener durch Drücken der Notaus-Taste oder durch Betätigen der Bremse abgebrochen werden. Eine detailliertere Beschreibung der eingebauten konventionellen Sensorik ist bei N. Müller [64] zu finden.

<sup>6</sup>Die erzielbare Genauigkeit ist dabei direkt von der Entfernung zum Standort des Senders in Mainflingen bei Frankfurt abhängig.



## 4 Zentrale Systemsteuerung

In Kapitel 3 wurde vorgestellt, worauf das Charakteristikum “erwartungsba-  
siert” des EMS-VISION-Systems primär beruht. Im folgenden Kapitel wird eine  
neue, zentrale Komponente beschrieben, die das gezielte, d.h. “erwartungsba-  
sierte” Aktivieren einzelner Fähigkeiten ermöglicht. Dies verleiht dem EMS-  
System, verglichen mit den Vorgängersystemen, einen höheren Grad an Flexi-  
bilität und erlaubt die automatische dynamische Konfiguration des Systems zur  
Laufzeit.

### 4.1 Administration des Rechnersystems

Wie in Abbildung 3.5 angedeutet, wurde EMS-VISION als Multi-Prozeß-System  
ausgelegt. Dies ist zum einen durch die entwickelte Mehrrechnerarchitektur be-  
dingt; darüber hinaus bietet ein solches Konzept gegenüber einer rein sequen-  
ziellen Datenverarbeitung in einem einzigen Prozeß Vorteile bezüglich der Feh-  
lertoleranz, da eine wegen eines Implementationsfehlers blockierende oder gar  
abstürzende Teilkomponente nicht das gesamte System lahmlegen kann. Zusätz-  
lich wird die Entwicklungsarbeit im Team dadurch erleichtert.

Die Zielvorgabe bei der Entwicklung von EMS-VISION war, ein flexibles, sich  
selbst konfigurierendes System auf Basis der gewählten Mehrrechnerarchitektur  
zu schaffen. Dieses System sollte dabei in der Lage sein, situationsgerecht die  
verfügbaren Fähigkeiten so zu aktivieren, daß die gestellten Aufgaben optimal  
erfüllt werden können. Diese Fähigkeiten sind nach erfolgreicher Ausführung  
wieder zu deaktivieren. Um die vorhandenen Ressourcen vollständig für aktuell  
benötigte Fähigkeiten verfügbar zu machen, kann es auch sinnvoll sein, nicht  
benötigte Fähigkeiten zu terminieren.

Beim Systemstart durch den Bediener ist zunächst eine Komponente, der *Sy-  
stem Manager (SysMan)*, erforderlich, die das Starten einer minimalen Sys-  
temkonfiguration auf den einzelnen Rechnern über eine zentrale Schnittstelle  
ermöglicht. Diese Systemkonfiguration enthält alle Basisprogramme zur Kom-  
munikation und Synchronisation, die Instanzen zur Verhaltensentscheidung und  
die Planungskomponenten. Damit wird die Handlungsfähigkeit des Systems her-  
gestellt; es kann nun auf Zielvorgaben des Bedieners reagieren (siehe Kapitel 6)

oder eigenständig Handlungen initiieren. Im Betriebsmodus des Systems stellt der *System Manager* eine Schnittstelle zur Verfügung, die es ermöglicht, zusätzlich benötigte Programme gezielt zu aktivieren.

Als Basisdienst zur Administration des Rechnernetzwerks dient das Programm *Embedded-PC Daemon (EPC)*. Instanzen des *EPC* müssen vorab auf jedem PC des Systems installiert und automatisch beim Hochfahren des Betriebssystems gestartet werden.

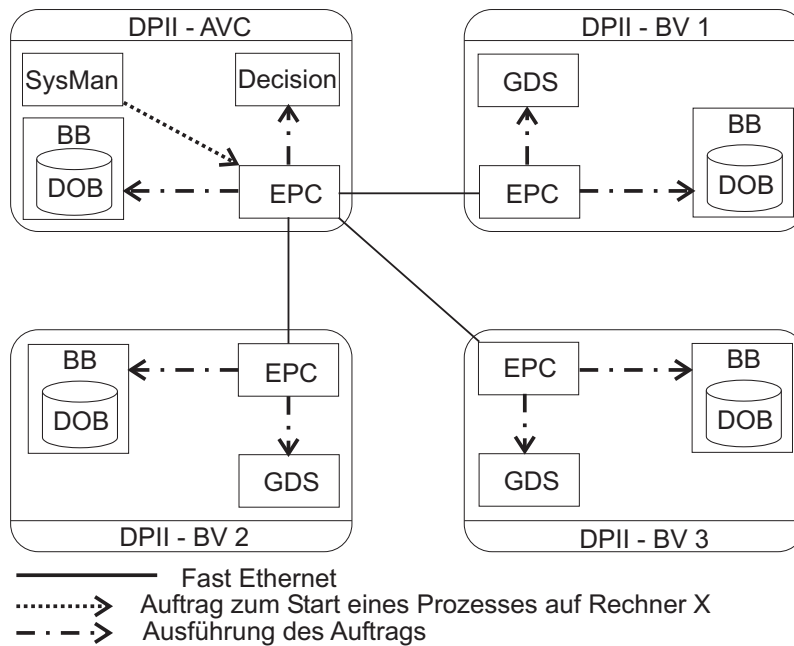


Abb. 4.1: Die Aktivierung des Basissystems

In Abbildung 4.1 ist der prinzipielle Ablauf gezeigt. Der Bediener startet zunächst den *System Manager*, wobei als Aufrufparameter ein Verweis auf eine Konfigurationsdatei angegeben wird. In dieser Konfigurationsdatei sind die statischen Informationen über die Systemressourcen und die Verteilung der einzelnen Prozesse auf die Rechner abgelegt.

Der *System Manager* liest die einzelnen Einträge aus der Konfigurationsdatei ein und generiert daraus die Aufträge zum Start einzelner Prozesse für den *EPC*. Dieser verteilt die Prozesse entsprechend den Vorgaben über das Rechnernetz: Prozesse auf dem eigenen Rechner werden direkt gestartet, für Prozesse auf eingebetteten Rechnern wird ein Auftrag an die entsprechende Instanz des *EPC* auf dem jeweiligen Rechner weitergeleitet. Auf diese Weise wird eine Minimal-konfiguration des Systems gestartet. Diese besteht neben der Kommunikation



und Wissensverwaltung (*Backbone BB*) aus dem Bildeinzug (*GDS*) und den Entscheidungsinstanzen (*Decision*).

## 4.2 Die Repräsentation von Fähigkeiten

Zur dynamischen Aktivierung einzelner Fähigkeiten des Systems durch die Entscheidungsinstanzen oder durch den Bediener muß zunächst eine Repräsentationsform für diese Fähigkeiten gefunden werden. Diese Repräsentationsform muß zwei Anforderungen abdecken: Zum einen muß sie dem *System Manager* das Wissen darüber zur Verfügung stellen, welche Prozesse zur Aktivierung einer Fähigkeit gestartet werden müssen; zum anderen muß sie selbst eine Schnittstelle zur Vergabe von Aufträgen durch die Entscheidungsinstanzen anbieten.

### 4.2.1 Die statische Repräsentation von Fähigkeiten

Eine Fähigkeit setzt sich in der Regel aus mehreren Prozessen, die jeweils mindestens eine Teilfunktionalität einbringen, zusammen. Dies kann z. B. dadurch bedingt sein, daß einzelne Komponenten einer Fähigkeit auf unterschiedlichen Ebenen der EMS-Hierarchie angeordnet sind und somit auf unterschiedlichen Rechnersystemen ablaufen; so erstrecken sich die einzelnen Komponenten der Fähigkeiten zur Aktion (Fortbewegung und Blickrichtungssteuerung) über die hardware-spezifische Ebene und die 4D-Ebene. Wahrnehmungsfähigkeiten hängen ebenfalls von Prozessen auf der hardware-spezifischen Ebene ab, die den Zugriff auf Sensorsignale ermöglichen. Das volle Leistungspotential der Wahrnehmungsfähigkeiten kann wiederum nur ausgeschöpft werden, wenn durch die Blickrichtungssteuerung der Sichtbereich der Kameras auf die relevanten Bereiche aktiv ausgerichtet werden kann. Daher muß die Repräsentation von Fähigkeiten deren Zusammensetzung aus mehreren Prozessen und die Abhängigkeit dieser Prozesse untereinander abdecken.

Abbildung 4.2 zeigt das entwickelte Ebenenmodell für die Repräsentation von Fähigkeiten am Beispiel der Wahrnehmung. Es ist in mehrere Ebenen unterteilt, wobei jeweils die Prozesse in den oberen Ebenen von allen Prozessen der unteren Ebenen abhängen. Prozesse, die in dieselbe Ebene eingebettet sind, können prinzipiell unabhängig von einander betrieben werden. In Ebene 1.0 ist der *Backbone*-Prozeß angelagert. Ebene 1.1 beinhaltet den Bildeinzug (*GDS*). Obwohl der *Backbone* prinzipiell unabhängig vom *GDS* lauffähig ist, nutzt er

wenn möglich die im Videotakt vom *GDS* gelieferten Synchronisationssignale als externen Hardwaretimer. Der Videotakt dient dabei zur Synchronisation der einzelnen Rechner untereinander. Der eigentliche Transfer von Bilddaten vom Framegrabber in den Hauptspeicher des Rechners durch den *GDS* wird aber erst durch das Auslösen eines neuen Systemzyklus durch den *Backbone* initiiert. In der Ebene 1.2 werden die ersten Wahrnehmungsprozesse zur Detektion von Merkmalen (Det 1,2) angelagert. Diese sind von allen darunter liegenden Ebenen abhängig. Für die Hypothesengenerierung zu einer Objektklasse ist jeweils ein spezialisierter Prozeß (Hyp 1,2) zuständig (Ebene 2.1). In der Ebene 2.2 ist der allgemeine Wahrnehmungsprozeß *EMSTTrack* angesiedelt.

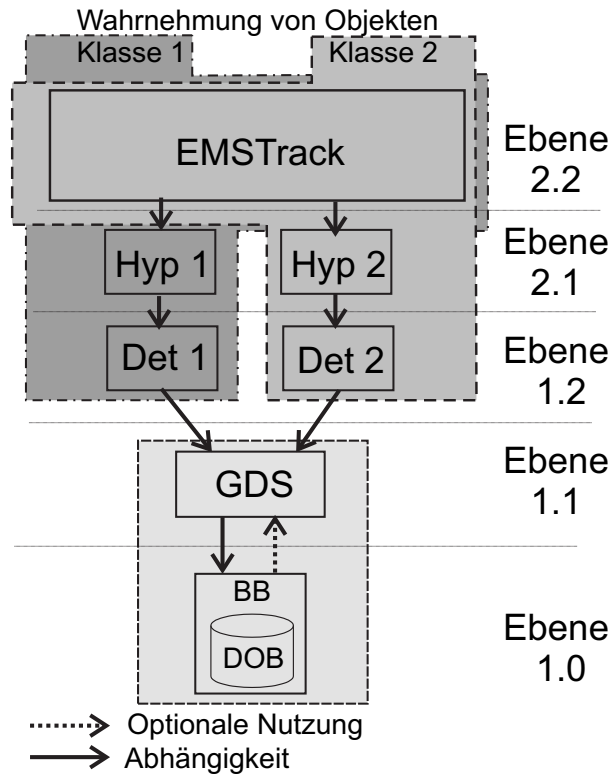


Abb. 4.2: Ebenenmodell zur Repräsentation von Fähigkeiten

Prozesse auf einer Ebene können nun jeweils zu einer Prozeßgruppe zusammengefaßt werden. Bei der Aktivierung einer Fähigkeit müssen dann mehrere Gruppen in der den Ebenen entsprechenden Reihenfolge gestartet werden. Ebenso ist eine Zusammenfassung von Prozessen unterschiedlicher Ebenen in einer Gruppe möglich. Dann ergibt sich die Startreihenfolge der Prozesse innerhalb der Gruppe aus der Zugehörigkeit zur jeweiligen Ebene. Einzelne Prozesse können durchaus auch mehreren Fähigkeiten zugeordnet werden. So kann, wie

z. B. in Abbildung 4.2 dargestellt, der allgemeine Wahrnehmungsprozeß für die zyklische Objektverfolgung *EMSTrack* für verschiedene Objektklassen eingesetzt werden; daher wird vor dem Start sichergestellt, daß noch keine Instanz dieser Prozesse aktiv ist. Es werden nur die zusätzlich erforderlichen Prozesse gestartet. In Abbildung 4.2 sind drei Prozeßgruppen (jeweils durch gestrichelte Linie umschlossen) dargestellt: die Basisprozesse *Backbone* und *GDS* sind in einer eigenen Prozeßgruppe angesiedelt. Die Wahrnehmungsfähigkeit für Objekte der Klassen 1 und 2 werden jeweils aus einem spezialisierten Detektionsprozeß (*Det 1* und *Det 2*), der Hypothesengenerierung (*Hyp 1* und *Hyp 2*) und einer Instanz des *EMSTrack* gebildet.

Durch die hier dargestellte Repräsentationsform wird ein gezielter und bedarfsorientierter Start der für eine Fähigkeit erforderlichen Prozesse ermöglicht. Dies erlaubt einen sparsamen Umgang mit beschränkten Ressourcen. Zur Erteilung von Aufträgen an eine Fähigkeit ist darüber hinaus eine weitere Schnittstelle nötig.

#### 4.2.2 Die dynamische Repräsentation von Fähigkeiten

Zur gezielten Vergabe von Aufträgen durch die Entscheidungsinstanzen an die einzelnen Experten muß eine zentrale Schnittstelle zur Verfügung stehen, über die eine Aktivierung passiver aber auch eine gezielte Steuerung aktiver Fähigkeiten möglich wird. Dabei sollte von der steuernden Instanz keinerlei Spezialwissen über die internen Abhängigkeiten der einzelnen Systemkomponenten untereinander erforderlich sein. Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, wird in der zentralen Wissensrepräsentation jeder aktive Prozeß im System durch ein Objekt in der Prozeßliste repräsentiert. Über dieses Prozeßobjekt kann eine direkte Kommunikationsverbindung zu einem Prozeß realisiert werden. Alle Prozessobjekte basieren auf der Klasse *CProcessNode*.

Abbildung 4.3 zeigt das Diagramm für die Klassenhierarchie der Wahrnehmungsprozesse in der *Unified Modeling Language (UML)*. Eine Einführung in die *UML* wird z. B. von B. Oestereich [68] gegeben. Die Klasse *CProcessNode* stellt verschiedene Methoden zur Verfügung; diese liefern zum einen Informationen über den Prozeß, z. B. auf welchem Rechner er gestartet wurde, aber auch Methoden zur Kommunikation. Neben der standardisierten Terminierungsnachricht (Stop), die vom *System Manager* zum gezielten Beenden der Prozesse benutzt wird, ermöglicht die virtuelle Methode *WriteMessage* ein spezialisiertes

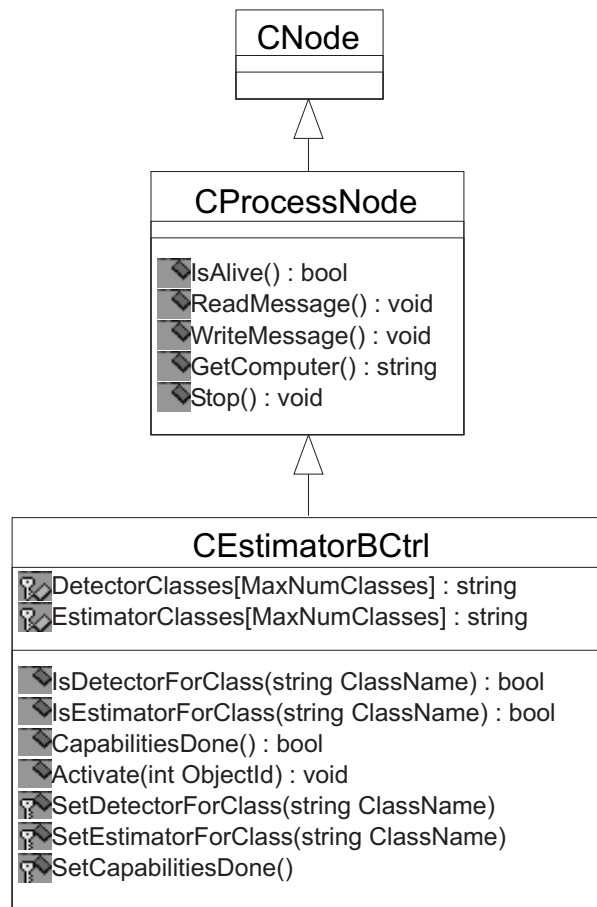


Abb. 4.3: Klassenhierarchie für Wahrnehmungsprozesse

Kommunikationsprotokoll für abgeleitete Knotenklassen.

Wahrnehmungsprozesse werden durch Objekte der Klasse *CEstimatorBCtrl* repräsentiert; diese Klasse ist von *CProcessNode* abgeleitet. Sie stellt zusätzlich zu den in der Basisklasse enthaltenen Daten und Methoden Informationen über die Fähigkeiten der einzelnen Prozesse zur Verfügung; beim Programmstart trägt jeder Wahrnehmungsprozeß seine Fähigkeiten in den eigenen Prozeßknoten ein. Zum Beispiel gibt ein Experte durch jeweils einen Aufruf der Methode *SetDetectorForClass* bekannt, daß er Hypothesen für eine Objektklasse generieren kann. Experten für die zyklische Objektverfolgung rufen analog dazu die Funktion *SetEstimatorForClass* auf. Über die Methode *Activate* ist eine gezielte Aktivierung der Fähigkeit möglich.

### 4.3 Kontrollfluß im EMS-System

In diesem Abschnitt wird anhand der Wahrnehmungsfähigkeiten der Kontrollfluß im EMS-System erläutert.

#### 4.3.1 Aktivierung der Fähigkeiten

In Abbildung 4.4 ist dargestellt, wie der Datengehalt der einzelnen Wissensbasen bei korrekter Aktivierung aller zur Bewältigung der gestellten Aufgaben erforderlichen Experten verknüpft ist. Die Aufgabe der Verhaltensentscheidung für die Wahrnehmung *BDGA* ist es, durch gezielte Auftragsvergabe diese Verknüpfungen herzustellen.

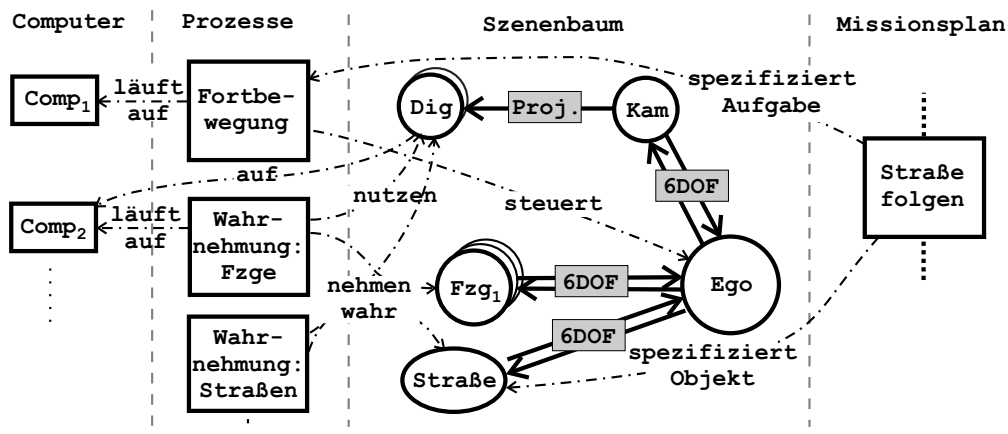


Abb. 4.4: Die Verknüpfung der Wissensbasen

Am Anfang einer komplexen Mission wird durch das Planungsmodul ein Missionsplan bereitgestellt. Dieser Plan ist als sequentielle Liste von Missionselementen aufgebaut. Innerhalb eines Missionselements bleibt die Aufgabe für die Fortbewegung konstant. Die einzelnen Missionselemente spezifizieren die geplanten Aktionen der Fortbewegung und Wahrnehmung. Im vorliegenden Beispiel spezifiziert das aktuelle Missionselement die Fahrt entlang einer Straße.

Zwei Wahrnehmungsexperten sind zur Erkennung von Straßen- und Fahrzeugobjekten aktiviert und speisen die geschätzten Zustandsgrößen für Form und Lage in die Szenenbeschreibung ein. Der Fortbewegungsexperte wertet diese Zustandsgrößen aus, um das Fahrzeug relativ zur Straße und den erkannten Fahrzeugen zu steuern.

Für erwartete Objekte, über die Hintergrundwissen vorliegt (wie z. B. für Landmarken oder Straßen), wird eine Objekthypothese in die Szenenbeschreibung eingefügt und mit Hintergrundwissen aus einer digitalen Karte initialisiert. Die Verhaltensentscheidung durchsucht nun die Prozeßliste nach einem geeigneten Wahrnehmungsexperten und startet bei Bedarf die benötigte Fähigkeit über den *System Manager*. Die Aktivierung des Wahrnehmungsexperten erfolgt durch Aufruf der Methode *Activate* des Prozeßknotens. Als Übergabeparameter wird dabei die Identifikationsnummer des zu erkennenden Objekts angegeben.

### 4.3.2 Der Erkennungszustand der Objekte

Für die Wahrnehmung einer Objektklasse können im System mehrere Experten verfügbar sein, die sich in ihren Anforderungen bezüglich der Genauigkeit des Anfangswissens über den Objektzustand und in der maximal erzielbaren Güte der Wahrnehmung unterscheiden. Zur Erteilung des Auftrags ist also derjenige Experte auszuwählen, dessen Fähigkeiten die größtmögliche Verbesserung der aktuellen Güte der Wahrnehmung erlauben. Für die Wahrnehmung eines Objekts sind verschiedene Phasen, Erkennungszustände genannt, zu durchlaufen. Diese Übergänge zwischen den einzelnen Erkennungszuständen sind in Abbildung 4.5 in Form einer Zustandskarte (vgl. D. Harel [35]), einer erweiterten Form von Zustands-Übergangs-Diagrammen, dargestellt. Abgerundete Rechtecke beschreiben mögliche Zustände, Pfeile die möglichen Transitionen zwischen diesen; Transitionen sind jeweils nur unter bestimmten Bedingungen möglich. Transitionen können durch *BDGA* (ausgedrückt durch das vorangestellte *A::*) oder den gerade aktiven **W**ahrnehmungsexperten (entsprechend *W::*) initiiert werden.

Eine instanziierte Objekthypothese muß zunächst visuell detektiert werden; der initiale Zustand des Objekts ist **ToBeDetected**. Ist die Detektion erfolgreich abgeschlossen, wird durch den Detektionsprozeß die Transition (*W::Objekt Detektiert*) in den Zustand **Detected** eingeleitet. *BDGA* setzt daraufhin den Zustand des Objekts auf **ToBeTracked** und generiert einen Auftrag für die zyklische Verfolgung des Objekts, dargestellt durch *A::Wechsel Bearbeiter*. Der aktivierte Wahrnehmungsexperte setzt, wenn er die Modellvorstellung durch zyklische Messung im Bild stützen bzw. weiter verbessern kann, den Zustand auf **Tracked**. Tritt ein Objektverlust auf, wird die Transition *W::TrackVerlust* durchgeführt und der Zyklus erneut durchlaufen. Durch Löschen des Objekts aus der Szenenbeschreibung (*A::Hypothese Löschen*) wird die Wahrnehmung

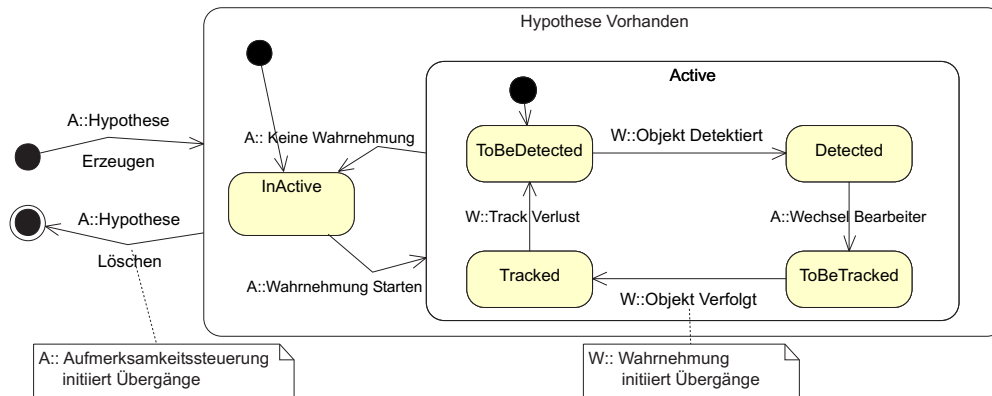


Abb. 4.5: Erkennungszustand für Objekte (aus [54])

des Objekts beendet.

### 4.3.3 Die Bestimmung der Blickrichtung

Eine Schnittstelle zwischen *BDGA* und Wahrnehmungsexperten wurde im vorhergehenden Abschnitt erläutert. Neben der Aktivierung der Wahrnehmungsexperten ist *BDGA* auch für die Ansteuerung der Zwei-Achsen-Kameraplattform zuständig. Durch die aktive Blickrichtungssteuerung ist es möglich, die relevanten Objekte in den hochauflösenden Bildbereichen zu fokussieren.

Im Straßenverkehr tritt eine Vielzahl von relevanten Objekten auf. Für die eigene Fortbewegung ist zunächst die Straße als Bezugsobjekt für die Querführung relevant. Bei der Fahrt im Kolonnenverkehr wird zusätzlich das in der eigenen Spur vorausfahrende Fahrzeug zum Bezugsobjekt für die Längsführung. Gleichzeitig kann für die Navigation die Positionsbestimmung an einer Landmarke wünschenswert sein. Zusätzlich ist es von Vorteil, potentielle Gefahrenquellen, z. B. ein durch eine unsichere oder gefährliche Fahrweise auffallendes Fahrzeug, “im Auge zu behalten”. Außerdem wechselt durch die hohe Dynamik in der Szene die Relevanz der einzelnen Objekte ständig.

Bei der Bestimmung einer optimalen Blickrichtungsstrategie sind daher mehrere Aspekte zu beachten:

- Die aktive Blickrichtungssteuerung soll den Wahrnehmungsexperten optimale Aspektbedingungen zur visuellen Vermessung der Objekte garantieren. Dabei hängt es von den eingesetzten Meßverfahren ab, welche Ob-

jektteile die relevanten Merkmale darstellen und dazu abgebildet werden müssen. Das Wissen darüber kann nur der Wahrnehmungsexperte zur Verfügung stellen.

- Bei mehreren Objekten, die gleichzeitig in einer multifokalen Kameraanordnung wahrgenommen werden sollen, können zwangsläufig Konflikte bezüglich der Ressource “Blickrichtung” auftreten. Durch eine geeignete Blickrichtungsstrategie soll eine optimale Verteilung der Aufmerksamkeit unter den wahrgenommenen Objekten erreicht werden. Dabei soll die Relevanz der einzelnen Objekte für die aktuelle Aufgabe und die Sicherheit des eigenen Fahrzeugs mit berücksichtigt werden.

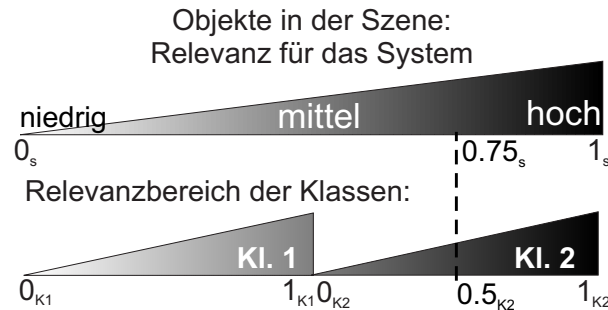


Abb. 4.6: Relevanzklassen für Objekte

Die Relevanz eines Objekts bestimmt sich zum einen daraus, für welche Aufgabe die über das Objekt ermittelten Zustandsgrößen verwendet werden oder welche Aktionen damit geplant sind. So unterscheidet sich z. B. die Relevanz einer erkannten Querstraße, in die abgelenkt werden soll, von der einer anderen Querstraße, die als Landmarke zur Bestimmung der Eigenposition verwendet werden soll; der Aufgabe der *lokalen* Bahnführung wird im System eine höhere Priorität eingeräumt als der *globalen* Bahnführung. Zum anderen kann einem Objekt durch die Situationsanalyse eine höhere Relevanz zugeteilt werden, wenn von ihm eine potentielle Gefährdung ausgeht.

Repräsentiert wird die Relevanz eines Objekts auf einer Skala von 0 (nicht relevant) bis 1 (höchste Relevanz). Um eine Zuordnung durch mehrere für die Ausführung unterschiedlicher Aufgaben zuständige Experten zu ermöglichen und gleichzeitig die Vergleichbarkeit einzelner Zuordnungen zu gewährleisten, wird der gesamte Relevanzbereich in mehrere Abschnitte, die Relevanzklassen, unterteilt. Innerhalb dieser Klassen erfolgt wiederum eine Einteilung in einer



Skala von 0 bis 1. Die einzelnen Experten sind, entsprechend der Priorität ihrer Aufgabe, einer Relevanzklasse zugeordnet. Innerhalb dieser Klasse können sie die Relevanz mehrerer Objekte frei wählen. Abbildung 4.6 zeigt diese Einteilung. Auf der oberen Skala ist der gesamte Relevanzbereich für das System (Index  $s$ ) von 0 bis 1 dargestellt. Dieser wird in zwei Relevanzklassen eingeteilt. Ein Wert von 0.5 innerhalb der Klasse 2 (Index  $K2$ ) entspricht einer Relevanz von 0.75 auf der Systemskala. Wie mit Hilfe dieser Informationen eine Blickrichtungsstrategie für die simultane Wahrnehmung mehrerer Objekte entwickelt wird, ist in [71] dargestellt.

Die Schnittstelle, die ein Wahrnehmungsexperte nutzt, um *BDGA* Auskunft über die für ihn relevanten Objektteile zu geben, ist in der Dissertation von M. Lützeler [54] ausführlich beschrieben.

Mit diesen Mechanismen zur Systemsteuerung sind die Grundlagen für die Realisierung eines Navigationssystems für das EMS-System geschaffen. Die einzelnen Komponenten dieses Systems werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.



## 5 Statisches Hintergrundwissen

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau der wissensbasierten Komponenten zur Missionsdurchführung. Zum einen werden Modelle vorgestellt, die eine hinreichende Beschreibung der Umwelt, der darin enthaltenen relevanten Objekte und der hier behandelten autonomen Fahrzeuge selbst ermöglichen. Mit diesen Modellen wird a-priori-Wissen über das Einsatzgebiet in Wissensbasen abgespeichert und für die Missionsdurchführung zur Verfügung gestellt. Zum anderen werden Algorithmen vorgestellt, die auf der Basis des statischen Hintergrundwissens aus den Zielvorgaben von *Central Decision* eine detaillierte Aufgabenbeschreibung, den Missionsplan, erstellen. Der Missionsplan enthält eine zeitlich aufeinander abgestimmte Befehlssequenz, deren Abarbeitung von der *Missionsüberwachung* eingeleitet und überwacht wird. Die *Missionsüberwachung* stellt dabei der oberen Entscheidungsebene das jeweils aktuelle Missionsplanelement als Zielvorgabe zur Verfügung. Gleichzeitig werden die ausgeführten Fahrzeugbewegungen überwacht und der Missionsfortschritt bestimmt. Abweichungen vom geplanten Missionsverlauf werden selbständig erkannt und eine Korrektur des Missionsplans durch die *Missionsplanung* automatisch initiiert. Die von den Erkennungsprozessen geschätzten Formparameter der detektierten Objekte werden während der Missionsdurchführung fortlaufend abgespeichert. Nach Beendigung der Mission werden diese Daten analysiert und der Datengehalt der Wissensbasen korrigiert und erweitert.

### 5.1 Das Umweltmodell

Eine Mission stellt eine abstrakte Beschreibung einer vom autonomen Fahrzeug zu erfüllenden zusammenhängenden Gesamtaufgabe dar, wie z.B.: “Fahre jetzt von hier zum angegebenen Ziel”. Bei der Durchführung einer Mission muß ein autonomer Agent mit seiner Umgebung interagieren. Um aus diesen abstrakten Vorgaben einen Plan für die zielgerichtete Durchführung einer Mission erstellen zu können, muß das Modul *Missionsplanung* auf Vorwissen über das Einsatzgebiet, über die Eigenschaften des verwendeten Fahrzeugs und die zur Verfügung stehenden Fähigkeiten zurückgreifen können. Das statische Wissen über das vorgesehene Einsatzgebiet gliedert sich dabei in drei Teile: die Wissensbasen über befahrbare Wege, über die freien Flächen zwischen den Wegen und

über optische Orientierungsmerkmale, sogenannte Landmarken, die zur Ortung verwendet werden können. Damit ist dem System bekannt, auf welchen Wegen das Ziel angesteuert werden kann und anhand welcher optischer Merkmale verifiziert werden kann, ob sich das Fahrzeug auf dem richtigen Weg befindet. Beim Befahren dieser Wege sind abhängig von der Streckenführung unterschiedliche Verhaltensfähigkeiten nötig. Die stark unterschiedliche Komplexität der verfügbaren Verhaltensfähigkeiten bewirkt, daß nicht alle mit der selben Sicherheit ausgeführt werden können. Die *Missionsplanung* muß daher Wege, auf denen keine kritischen Fahrmanöver nötig sind, bevorzugen. In einer dritten Wissensbasis werden dazu Informationen über die implementierten Verhaltensfähigkeiten abgelegt; eine statistische Auswertung der Sicherheit, mit der sie in vorangegangenen Missionen ausgeübt werden konnten, ist darin enthalten. Dadurch kann bereits in der Planungsphase gezielt diejenige Streckenführung ausgewählt werden, die den besonderen Fähigkeiten des Fahrzeugs am besten entgegenkommt.

Der Missionsplan stellt eine Verknüpfung des Vorwissens des Systems mit den Zielvorgaben der oberen Entscheidungsebene dar. Die zentrale dynamische Datenbasis *DOB* (siehe Abschnitt 3.2.1) stellt Angaben über die Geometrie und Kinematik des eigenen Fahrzeugs zur Verfügung, damit bereits während der Planung überprüft werden kann, auf welchen Wegen das Fahrzeug generell nicht eingesetzt werden kann. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, steht auch das Wissen über die verfügbaren Fähigkeiten zur Verfügung und wird bei der Planung berücksichtigt.

### 5.1.1 Lagemodellierung

Der Aufbau des Szenenbaums, der zentralen Wissensrepräsentation im EMS-VISION-System, wurde bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben. Relativlagen zwischen Koordinatensystemen werden darin allgemein in 6 Freiheitsgraden (3 translatorische, 3 rotatorische) beschrieben. Den Kern des Szenenbaums bildet dabei der Teilbaum, durch den das eigene Fahrzeug mit allen Komponenten beschrieben wird. Der Aufbau dieses Teilbaums und die Konventionen der verwendeten Koordinatensysteme sind bei K.-H. Siedersberger [88] ausführlich beschrieben. Für die lokale Bahnführung des Fahrzeugs ist vor allem der Relativzustand zu den Objekten in der näheren Umgebung von Interesse; der globale Kontext ist erst bei der Durchführung komplexer Missionen relevant. Daher wurde für die Organisation des Szenenbaums ein egozentrierter Aufbau

gewählt. Alle externen Objekte werden an die im Zentrum stehende Repräsentation des Eigenfahrzeugs angefügt. Änderungen des Relativzustands zwischen dem Eigenfahrzeug und einem externen Objekt ergeben sich dann durch die Überlagerung der eigenen Bewegung und der Bewegung des externen Objekts. Dies muß bei der Auslegung von Lage- und Dynamikmodellen für Objekte berücksichtigt werden. Für die Navigation relativ zu ortsfesten Objekten ist eine Erweiterung dieser Szenenrepräsentation durch die Einführung ortsfester Koordinatensysteme erforderlich.

In Abbildung 5.1 ist die Erweiterung der Szenenrepräsentation für die Navigation dargestellt. An die Kanten des Baumes sind jeweils die Werte der Relativlage, die ungleich Null sind, angetragen. An die (hier zu einem einzelnen Knoten zusammengefaßte) Repräsentation des Eigenfahrzeugs ist ein geodätisches Koordinatensystem, "Ego-Geodät.", angefügt, das im Fahrzeugschwerpunkt liegt; die z-Achse ist in Richtung des Schwerevektors ausgerichtet, die x-Achse weist in Fahrzeuglängsrichtung. Die Relativlage zwischen diesen beiden Koordinatensystemen läßt sich damit durch die beiden Winkel  $\phi$  und  $\theta$

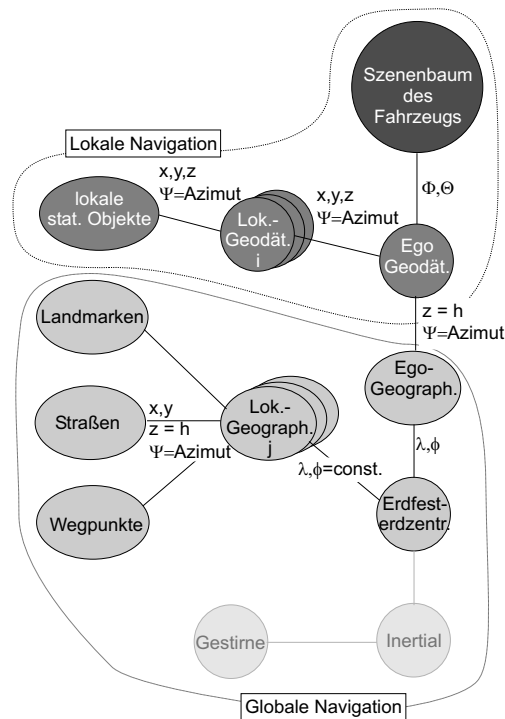


Abb. 5.1: Szenenbaum für lokale und globale Navigation

beschreiben. Relativ zu diesem wird dynamisch während der Missionsdurchführung jeweils am Beginn eines Missionselements  $i$  ein ortsfestes lokales geodätisches Koordinatensystem, "Lok.-Geodät.  $i$ " eingefügt. Relativ zu diesem Koordinatensystem wird dann die Position des Fahrzeugs geschätzt. Alle wahrgenommenen statischen Objekte werden in diesem Koordinatensystem beschrieben.

Für die globale Navigation wird zunächst ein *Earth Centered Earth Fixed (ECEF)* (erdfestes-erdzentriertes) Koordinatensystem eingeführt. Um nun die Relativlage des Fahrzeugs in diesem Koordinatensystem unter Beibehaltung der verwendeten Konventionen bezüglich der Drehreihenfolge der Winkel (Euler - Drehreihenfolge) angeben zu können, werden zwei zusätzliche Koordinatensysteme

eingeführt. Unter der Annahme eines Referenzmodells für die Gestalt der Erde, z. B. des im WGS84 System verwendeten geozentrisch gelagerten Referenzellipsoids, wird das “Ego-Geograph.” Koordinatensystem eingeführt. In diesem Koordinatensystem wird die auf die Oberfläche des Ellipsoids projizierte Position des Fahrzeugs in ellipsoidisch-geographischen Koordinaten  $\lambda, \varphi$  (Längen- und Breitengrad) angegeben. Die Relativlage zwischen dem Ego-Geodätischen und dem Ego-Geographischen Koordinatensystem besteht dann aus der Höhe über dem Referenzellipsoid und dem Azimut [89].

Bei der Kartographierung werden in der Regel Projektionsverfahren angewendet, um die dreidimensionale Welt zweidimensional darstellen zu können. In dieser Arbeit wird die im militärischen Bereich gebräuchliche *Universale Transversale Merkator Projektion (UTM)* [82] verwendet. Dabei wird die Position von Objekten in einem kartesischen Koordinatensystem beschrieben. Zur Minimierung von Projektionsfehlern ist die Gültigkeit eines Koordinatensystems jeweils auf einen Streifen von 6 Längengraden Breite begrenzt. Der Bezugspunkt für den Ursprung des Koordinatensystems ist der Schnittpunkt des Referenz-Längengrads (dieser verläuft mittig durch den kartographierten Abschnitt) mit dem Äquator. Seine Position läßt sich in ellipsoidisch-geographischen Koordinaten mit  $\lambda$  und  $\varphi$  angeben. Für die Kartographierung größerer Bereiche werden entsprechend mehrere Koordinatensysteme, “Lok.-Geograph. j”, eingeführt.

Für die Astronomische Navigation kann zusätzlich das geozentrische Koordinatensystem “Inertial” eingefügt werden. Die x-Achse dieses Koordinatensystems ist auf das Frühlingsäquinoktium ausgerichtet [89]. Relativ zum “Inertial” kann dann die Relativlage der “Gestirne” beschrieben werden. Diese Koordinatensysteme sind nur angedeutet, da sie in der aktuellen Implementierung nicht verwendet werden.

### 5.1.2 Unstrukturiertes Gelände

Für die Fahrzeugführung ist bei der Klassifizierung von unstrukturiertem Gelände primär von Interesse, ob ein bestimmter Geländeabschnitt befahrbar ist oder nicht. In die Beurteilung, ob ein Befahren möglich ist, gehen mehrere Aspekte ein:

1. Die Beschaffenheit der Oberfläche (positive oder negative Hindernisse).
2. Die geometrische Beschaffenheit des Geländes, z. B. die vorhandenen Stei-

gungen und Gefälle.

3. Die Art des Untergrunds, seine Tragfähigkeit und die zu erwartenden Haftungseigenschaften.

Bei der Modellierung des Geländes ist eine Unterteilung in traversierbare und nicht-traversierbare Bereiche ausreichend. Die nicht-traversierbaren Bereiche werden in Anlehnung an den DFAD-Standard als geschlossene Polygonzüge modelliert. Die Koordinaten der Eckpunkte werden gemäß 5.1.1 angegeben. Die Freiflächen dazwischen werden zunächst für die Planung als befahrbar eingestuft.

Auf Basis dieser Daten wurde eine manuelle Planungsfunktionalität in das Modul *Missionsplanung* integriert.

### 5.1.3 Straßen

Die räumliche Gestaltung von Straßen erfolgt in Deutschland nach den **R**ichtlinien für die **A**nlage von **S**traßen. Speziell die Linienführung erfolgt nach der RAS-L-1 [75]. In dieser Verordnung werden die Straßen für den öffentlichen Verkehr nach ihrer maßgebenden Funktion, nach ihrer Lage innerhalb oder außerhalb bebauter Gebiete und der angrenzenden Bebauung in fünf Kategorien A-E eingeteilt. Die zweidimensionale Linienführung der Fahrbahn wird im Lageplan festgelegt. Zwei Größen bestimmen maßgebend die Gestaltung der Entwurfs-elemente des Lageplans: die Entwurfsgeschwindigkeit  $v_e$  und die zu erwartende Geschwindigkeit  $v_{85}$ . Die Entwurfsgeschwindigkeit  $v_e$  ergibt sich aus der vorgesehenen Netzfunktion der Straße und der für diese Funktion angestrebten Qualität des Verkehrsablaufs.

Die Geschwindigkeit  $v_{85}$  entspricht bei Straßen der Kategoriegruppe A der Geschwindigkeit, die 85% der Pkw bei ungehinderter Fahrt auf nasser, aber sauberer Fahrbahn nicht überschreiten. Bei Straßen der Kategoriegruppen B und C entspricht sie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Sie ist ein fahrdynamischer Wert für die geometrische Bemessung einzelner Entwurfs-elemente. Die Geschwindigkeit  $v_{85}$  ändert sich in Abhängigkeit von der Streckengeometrie. Die beiden Geschwindigkeiten  $v_e$  und  $v_{85}$  sollen, um die Streckencharakteristik und das Fahrverhalten der Kraftfahrer aufeinander abzustimmen, in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen. Die zu erwartende Geschwindigkeit  $v_{85}$  darf die Entwurfsgeschwindigkeit  $v_e$  um nicht mehr als 20 km/h überschrei-

ten, ansonsten sind bauliche Veränderungen der Entwurfselemente nötig.

Als Entwurfselement werden im Lageplan die Gerade, der Kreisbogen, der Korbogen und der Übergangsbogen zur Beschreibung der horizontalen Linienführung verwendet. Der Übergangsbogen wird, je nach Kategoriegruppe, als verbindendes Element zwischen zwei Entwurfselementen mit unterschiedlicher Krümmung verwendet. Er ermöglicht einen stetigen Verlauf der Fahrbahnkrümmung und damit der Zentrifugalbeschleunigung bei der Kurvenfahrt. Der Übergangsbogen ist als Klothoide ausgebildet. Bei dieser Bogenform ändert sich die Krümmung linear mit der Bogenlänge. Das Bildungsgesetz für die Klothoide lautet:

$$c(l) = c_0 + c_1 \cdot l, \quad (5.1)$$

wobei  $c = 1/R$  die Krümmung (mit dem Radius  $R$ ) an der Bogenlängenkoordinate  $l$  angibt und  $c_0$  der Anfangswert für  $l = 0$  ist;  $c_1 = dc/dl$  ist die konstante Krümmungsänderung über der Bogenlänge und wird auch als Klothoidenparameter  $1/A^2$  bezeichnet.

Die Verbindung der Straßen untereinander zu einem Netzwerk erfolgt durch die Straßenknoten. Die Festlegung der Knotenpunkte erfolgt nach speziellen Vorschriften. Ein Straßenknoten entsteht durch die Kreuzung mehrerer Straßen oder durch das Einmünden einer Straße in eine andere. Es wird zwischen plangleichen [76] und planfreien [74] Knoten unterschieden: bei plangleichen Knoten kreuzen sich die beiden Straßen auf gleicher Höhe, bei planfreien Knoten wird eine Straße über die andere hinweg geführt. Die Anbindung erfolgt durch meist einspurige Verbindungselemente, die Verbindungsrampen. Als Anschlußelemente der Verbindungsrampen an die Straßen werden Ein- und Ausfahrten verwendet. Abhängig von der Art des Knotens und der Anzahl der Fahrspuren werden diese Anschlußelemente mit einer Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsspur ausgestattet.

Die Beschreibung der vertikalen Linienführung erfolgt im Höhenplan. Als Entwurfselemente werden die Längsneigung der Fahrbahn und die Kuppen- und Wannenausrundung verwendet. Die Ausrundung von Kuppen und Wannens erfolgt in der Regel in Annäherung an Kreisbögen durch quadratische Parabeln, aber auch durch Klothoiden.

Das Umweltmodell "Straßen" stellt das Bindeglied zwischen den wissensbasierten Planungsmodulen und den Wahrnehmungsfähigkeiten dar. Für den Aufbau des Umweltmodells "Straßen" sind daher zwei Kriterien ausschlaggebend:



1. Das Umweltmodell “Straßen” muß dem Wahrnehmungsexperten für Straßen die erforderlichen Hintergrundinformationen zur Verfügung stellen können.
2. Für die *Missionsplanung* müssen das logische Verbindungsschema einzelner Straßenzüge zu einem Netzwerk und Restriktionen auf einzelnen Straßensegmenten (z.B. Abbiegevorschriften an Abzweigen, Einbahnstraßen) zur Verfügung gestellt werden

### Bestehende Lösungsansätze

Ausgangsbasis für die vorliegende Straßenmodellierung waren die Arbeiten von Ch. Hock [39]. Dieser stellte ein topologisches Straßenmodell vor, das aus den Elementen *Kreuzung*, *Gerade*, *Kurve*, *Einfahrt* und *Ausfahrt* aufgebaut wurde. Stark gekrümmte Kurven wurden als Kreisbögen modelliert, schwach gekrümmte Streckenabschnitte als Geraden. Die Modellierung wurde so gewählt, daß nur für diejenigen Streckenabschnitte, die entweder einen Wechsel der Verhaltensmuster erforderten oder navigationsrelevante Information trugen, eine explizite Modellierung erfolgte. Über den realen Verlauf der Fahrstrecke und die Position einzelner Streckenabschnitte in einem globalen Koordinatensystem können dadurch aber keine Aussagen gemacht werden. Für die Integration eines GPS-Empfängers zur globalen Navigation war dies aber erforderlich.

Im derzeit in vielen kommerziellen Navigationssystemen verwendeten *GDF*-Standard der ersten Generation wird der horizontale Streckenverlauf durch Polygonzüge angenähert. Als Vorteil ergibt sich bei dieser Modellierung, daß dadurch an den einzelnen Punkten des Polygonzugs mit derselben Standardabweichung zu rechnen ist. Es tritt kein kumulativer Fehler auf. Nachteilig ist jedoch, daß bei gekrümmten Strecken zwischen den einzelnen Punkten des Polygonzuges größere Abweichungen auftreten. Die Punktgenauigkeit wird im *GDF* mit  $\pm 3$  m festgelegt. Wie M. Schraut [83] in seiner Arbeit jedoch festgestellt hat, liegen die tatsächlichen Abweichungen bei bis zu  $\pm 15$  m. Zusätzlich sollen in künftigen Generationen des *GDF* deutlich höhere Genauigkeiten erzielt ( $\pm 0.01$  m) und geometrische Informationen über den horizontalen Straßenverlauf, auf Basis von Kreisbögen, abgelegt werden. Ein Lösungsvorschlag, wie diese hohen Genauigkeiten auf Basis dieser Geometriemodellierung erreicht werden sollen, bleibt jedoch aus.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Modellierung vorgestellt, die die Vorteile

des *GDF* bezüglich der Punktgenauigkeit mit einer geometrischen Modellierung einzelner Straßensegmente in Übereinstimmung mit der *RAS-L* verbindet.

Das Umweltmodell “Straßen” wird, in Anlehnung an den *GDF*-Standard als Schichtenmodell angelegt.

Tabelle 5.1 gibt einen groben Überblick über die einzelnen Schichten, deren Datengehalt nachfolgend im Detail erläutert wird.

Tabelle 5.1: Schichtenmodell für Straßenobjekte

| Schicht | Datengehalt  |
|---------|--|
| 1       | Kategorie der Straße   |
| 2       | Topologie des Netzwerks                                      |
| 3       | Attribute  |
| 4       | Geometrische Beschreibung des gehärteten Oberflächenbereichs |
| 5       | Beschreibung der einzelnen Fahrspuren                        |

**Schicht 1** stellt Informationen über die Kategorie der Straße zur Verfügung. Daraus lassen sich von *Central Decision* die erlaubten Verhaltensweisen auf dem Streckenabschnitt ableiten. So sind die Manöver Halten (außer bedingt durch Stau), Wenden, Parken, etc. auf Autobahnen nicht zulässig.

**Schicht 2** enthält die Angaben, wie ein einzelnes Segment in das gesamte Straßennetzwerk eingefügt ist. Dazu wird dem Segment selbst ein eindeutiger numerischer Bezeichner zugewiesen. Durch die Angabe der Bezeichner der benachbarten Elemente als Vorgänger- und Nachfolgeelement wird das Segment in das Netzwerk eingebettet und seine Orientierung eindeutig angegeben. Dadurch wird auch der Ursprung des Koordinatensystems, in dem die geometrische Beschreibung des Elements erfolgt, festgelegt. Die Verbindungslogik im Straßennetzwerk wird durch die Angabe eines Vorgänger- und Nachfolgeelementes erreicht. Die Fahrbahnskelettlinie wird gemäß dem *GDF*-Standard 2.3 als Polygonzug modelliert, die Koordinaten der Punkte des Polygonzuges werden im WGS 84 Koordinatensystem (siehe Absatz 5.1.1) abgelegt.

**Schicht 3** enthält Informationen über die maximalen und minimalen Geschwindigkeiten, die zulässigen Fahrtrichtungen und Grenzwerte für die Fahrzeughöhe und -masse auf den einzelnen Fahrspuren. Für die Missionsplanung ist ein Schätzwert darüber, wie lange das Fahrzeug für die Bewältigung eines bestimmten Streckenabschnitts benötigen wird, von großem Interesse. Um die

durchschnittliche Verweildauer des Fahrzeugs auf einzelnen Streckenabschnitten abschätzen zu können, wird ein Erwartungswert für die auf dem Segment erreichbare mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  abgelegt. Da gewisse Phänomene, wie z. B. Stau, sowohl von der Tageszeit (Stoßzeiten), vom Wochentag (Berufsverkehr) oder der Jahreszeit (Urlaubsreisewelle) abhängen können und meist an bestimmten Streckenabschnitten auftreten, wird für diese Streckenabschnitte eine nach Tages- und Jahreszeit gestaffelte Tabelle für die zu erwartende Geschwindigkeit  $v_m$  abgelegt. Bei freier ungehinderter Fahrt entspricht die mittlere Geschwindigkeit dem Entwurfparameter  $v_{85}$  gemäß der RAS.

In **Schicht 4** wird die Geometrie des gehärteten Oberflächenbereichs beschrieben. Die geometrische Beschreibung erfolgt dabei in einem lokalen kartesischen Koordinatensystem. Durch die Angabe des Oberflächenmaterials (Sand, Schotter, Beton, Teer) lassen sich wichtige Informationen für die visuelle Erkennung ableiten; darüber hinaus kann während der Missionsplanung berücksichtigt werden, wie sicher das Fahrzeug auf dem jeweiligen Untergrund bewegt werden kann.

**Schicht 5** stellt bei Straßen höherer Ordnung Informationen über die einzelnen Fahrspuren zur Verfügung. Neben Anzahl und Geometrie beinhaltet dies die Art der Fahrspurbegrenzung. Bei Straßen niederer Ordnung (Feldwege bzw. unmarkierte Straßen) entfällt diese Schicht.

Bei der Straßenmodellierung in den RAS wird zwischen Linienelementen und Knotenpunkten unterschieden. Bei der Modellierung der Knotenpunkte im Umweltmodell "Straßen" wird zwischen den Modellen *Kreuzung* (plangleiche Knoten), *Einfahrt* und *Ausfahrt* unterschieden. Planfreie Knoten lassen sich aus diesen 3 Elementen durch eine geeignete Wahl der Attribute, mit denen die geometrische Beschreibung dieser Straßenelemente erfolgt, erfassen. Für die Modellierung der Linienelemente, die Verbindungsstraßen zwischen den Knotenpunkten darstellen, wird im Umweltmodell "Straßen" das *Straßensegment* eingeführt.

In den folgenden Abschnitten werden die Besonderheiten der verschiedenen Modelle in den einzelnen Schichten erläutert.

### **Straßensegmente**

In der Schicht 2 des *Straßensegments* erfolgt die Beschreibung des Verlaufs der Straße als Polygonzug. Die Position der einzelnen Punkte des Polygonzugs wird

im WGS 84 Koordinatensystem nach zwei verschiedenen Kriterien festgelegt:

1. Die maximal zulässige Abweichung zwischen dem Polygonzug und dem tatsächlichem Straßenverlauf beträgt 3 Meter. Dies entspricht der im GDF spezifizierten Genauigkeitsanforderung.
2. Die Anfangs- und Endpunkte der in Schicht 4 gespeicherten Klothoidenabschnitte werden zusätzlich abgelegt.

In der Schicht 4 des *Straßensegments* erfolgt die geometrische Beschreibung des gehärteten Oberflächenbereichs als Band, dessen Skelettlinie aus einer Überlagerung zweier Klothoiden in vertikaler und horizontaler Richtung modelliert wird (siehe [21]). Eine mögliche Querneigung oder Torsion der Fahrbahn über der Lauflänge wird vernachlässigt. Die in der RAS-L angestrebten Entwurfs-elemente für die horizontale und vertikale Fahrbahnkrümmung lassen sich als Spezialfälle der Klothoide mit den Parametern  $c_0$  und  $c_1$  darstellen:

$$\begin{aligned} \text{Gerade:} & \quad ( c_0 = 0 \quad , \quad c_1 = 0 \quad ) \\ \text{Kreisbogen:} & \quad ( c_0 \neq 0 \quad , \quad c_1 = 0 \quad ) \\ \text{Übergangsbogen:} & \quad ( c_0 \text{ beliebig} \quad , \quad c_1 \neq 0 \quad ) \end{aligned}$$

Die Fahrbahnbreite wird gemäß R. Behringer [6] durch eine Breite am Segmentanfang und eine lineare Breitenänderung über der Laufkoordinate modelliert.

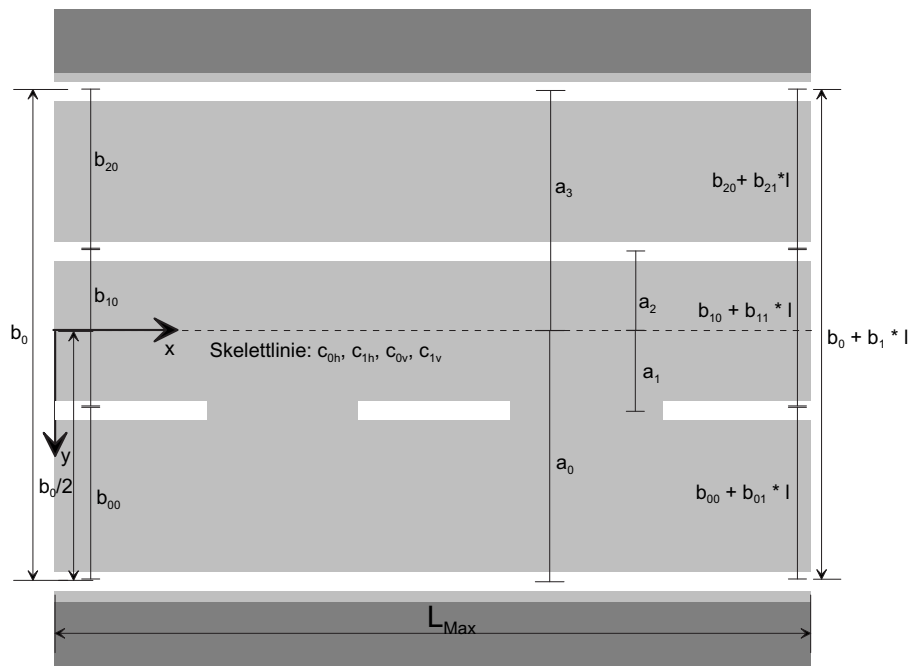


Abb. 5.2: Schicht 4 und 5 für das *Straßensegment*

$$b(l) = b_0 + b_1 \cdot l, \quad (5.2)$$

Die Fahrbahnbreite  $b$  an der Laufkoordinate  $l$  ergibt sich aus der Breite  $b_0$  am Segmentanfang und der linearen Breitenänderung  $b_1 = db/dl$ . Für das *Straßensegment* werden in der Schicht 4 die Lauflänge  $l$ , die Krümmungsparameter  $c_{0h/v}$  und  $c_{1h/v}$  und die Breitenparameter  $b_0$  und  $b_1$  abgelegt.

Ein *Straßensegment* beschreibt den Verlauf einer Verbindungsstraße zwischen zwei Knotenpunkten. Seine räumliche Ausdehnung kann demzufolge beliebig groß sein. Entsprechend wird ein Satz von Geometrieparametern für die Beschreibung nicht ausreichen. Das Straßensegment wird daher in einzelne Abschnitte mit konstanten Geometrieparametern unterteilt. Diese werden in einer Liste verwaltet. Eine Referenz verweist auf die in Schicht 2 abgelegten Anfangs- und Endpunkte der KLothoidenabschnitte. Dadurch ist es möglich, den Datengehalt der Schicht 4 auch auf einzelne signifikante Abschnitte, z. B. eine Spitzkehre, zu beschränken, ohne daß der räumliche Bezug verloren geht. Für Abschnitte, die keine Besonderheiten aufweisen, ist auf dieser Ebene kein eigener Eintrag erforderlich. Dadurch kann ohne Informationsverlust der Datengehalt dieser Schicht minimiert werden.

Die Parameter für die geometrische Beschreibung einzelner Abschnitte der Schicht 4 eines *Straßensegments* sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2: Schicht 4 eines Straßensegments

|           |  |
|-----------|--|
| $c_{0h}$  | Anfangswert der Horizontalkrümmung                 |
| $c_{1h}$  | Änderung der Horizontalkrümmung über der Länge $l$ |
| $c_{0v}$  | Anfangswert der Vertikalkrümmung                   |
| $c_{1v}$  | Änderung der Vertikalkrümmung über der Länge $l$   |
| $b_0$     | Anfangswert der Fahrbahnbreite                     |
| $b_1$     | Änderung der Fahrbahnbreite über der Länge $l$     |
| $L_{Max}$ | Länge des Straßensegments                          |

Für jeden in Schicht 4 modellierten Abschnitt wird ein zugehöriger Eintrag in Schicht 5 abgelegt. Schicht 5 enthält eine geometrische Beschreibung der einzelnen Fahrspuren auf der Fahrbahn und der Art ihrer Begrenzung. Fahrspuren können sowohl durch Linien als auch durch massive Trennelemente (Leitplanke) von einander abgegrenzt sein. Die Breite der einzelnen Fahrspuren wird analog zur Fahrbahnbreite durch eine Anfangsbreite und eine lineare Breitenänderung

modelliert. Die Lage der Fahrspuren auf der Fahrbahn wird durch die laterale Ablage ihrer Spurbegrenzungen relativ zur Fahrbahnmitte angegeben. Die Vergabe der Indizes für die Fahrspuren erfolgt vom rechten Fahrbahnrand aus nach links. Die Skelettlinie der Fahrspuren, die bei einer Breitenänderung nicht mehr durch Klothoiden beschrieben werden kann, wird nicht explizit modelliert. Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die Parameter.

Tabelle 5.3: Schicht 5 eines Straßensegments

|          |   |
|----------|---|
| $n$      | Anzahl der Fahrspuren   |
| $b_{0i}$ | Anfangsbreite der Fahrspur $i$  |
| $b_{1i}$ | Breitenänderung der Fahrspur $i$  |
| $a_{0j}$ | Anfangswert der lateralen Ablage der Fahrspurbegrenzung $j$ zur Fahrbahnmitte |
| $a_{1j}$ | Änderung der lateralen Ablage   |
| $G_j$    | Art der Fahrspurbegrenzung $j$  |

Je nachdem, wieviel Aufwand bei der Kartographierung des Wegenetzes betrieben wurde, kann sich der Datengehalt der Schichten 4 und 5 auf einzelne, besonders anspruchsvolle Streckenabschnitte (z. B. Spitzkehren) beschränken. Die Streckenabschnitte davor und danach können jeweils zu einem Abschnitt zusammengefaßt werden. Über die Länge dieser Abschnitte steht der *Missionsplanung* die Information zur Verfügung, nach welcher Wegstrecke dieser besondere Streckenabschnitt zu erwarten ist.

### Ein- und Ausfahrten

Die Schichten 4 und 5 der Elemente Ein- und Ausfahrt sind identisch aufgebaut. Aufgrund ihrer geringeren räumlichen Ausdehnung ist jedoch ein Satz von Geometrieparametern für die Modellierung ausreichend.

### Kreuzungen

Die Kreuzung, das komplexeste Element des Umweltmodells "Straßen", erfordert eine aufwendigere Modellierung. Eine Kreuzung kann beliebig viele Zufahrtsstraßen aufweisen. Der Ursprung des Koordinatensystems, in dem die geometrische Beschreibung der Kreuzung erfolgt, liegt dabei im Schnittpunkt der Mittellinien zweier Zufahrtsstraßen. Die Beschreibung der äußeren Umrandung

der Fläche erfolgt in Schicht 4. Die Anzahl der dafür nötigen Modellparameter hängt dabei direkt von der Anzahl der Zufahrtsstraßen ab. Die äußere Begrenzung zwischen Kreuzung und Grasnarbe wird von einer Zufahrt aus in die nach rechts gelegene Abfahrt durch eine Folge dreier Segmente, Gerade - Kreisbogen - Gerade, beschrieben, wobei von einem stetigen Verlauf der Umrandung ausgegangen wird. Dafür sind vier Formparameter nötig. Die Relativlage der einzelnen Begrenzungslinien zueinander wird durch die Angabe der Breite der Zufahrtsstraßen festgelegt. Für  $n$  Zufahrtsstraßen sind  $n$  dieser Datensätze und damit  $5n$  Formparameter erforderlich.

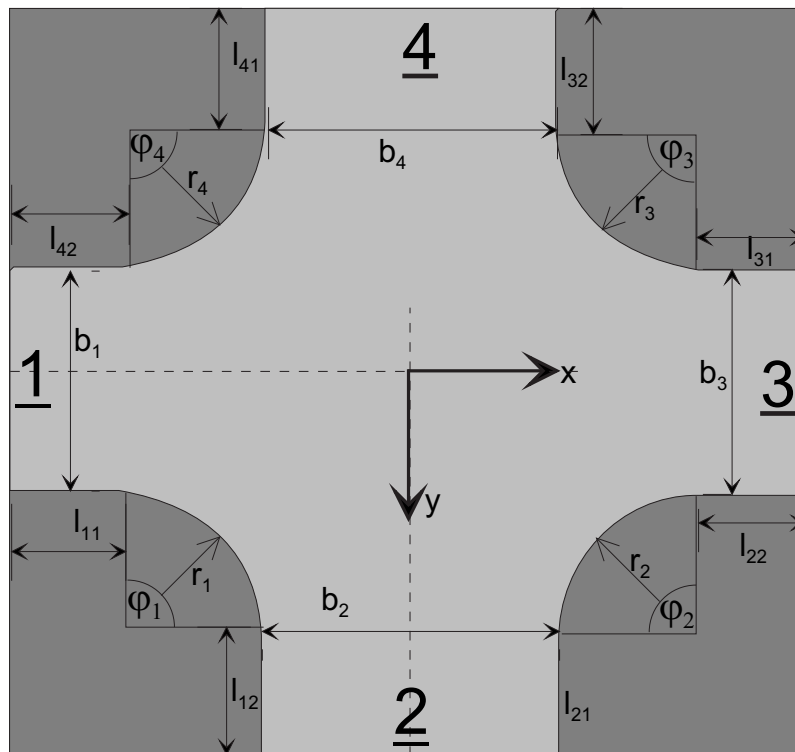


Abb. 5.3: Schicht 4 und 5 für die Kreuzung

Die geometrische Beschreibung des gehärteten Oberflächenbereichs einer Kreuzung erfolgt durch die in Tabelle 5.4 dargestellten Parameter.

Kreuzungen enthalten meist keine durch Markierungen oder bauliche Maßnahmen getrennten Fahrspuren; diese verlaufen in der Regel auch nicht parallel zur äußeren Begrenzungslinie. Daher ist eine getrennte geometrische Beschreibung der einzelnen, von einer Zufahrt wegführenden Fahrspuren nötig. Für jede Zufahrt ergibt sich damit der in Tabelle 5.5 dargestellte Parametersatz.

Tabelle 5.4: Aufbau der Schicht 4 für eine Kreuzung

|          |   |
|----------|---|
| $n$      | Anzahl der Zufahrtsstraßen                            |
| $l_{1i}$ | Länge des Geradenabschnitts der Zufahrt 1             |
| $l_{2i}$ | Länge des Geradenabschnitts der Abfahrt 2             |
| $r_1$    | Radius der Begrenzung zwischen Zufahrt 1 u. Abfahrt 2 |
| $j_1$    | Winkel des Bogenabschnitts                            |
| $b_1$    | Breite der Zufahrtsstraße 1                           |

Tabelle 5.5: Aufbau der Schicht 5 für eine Kreuzung

|           |   |
|-----------|---|
| $c_{0hj}$ | Anfangswert der Horizontalkrümmung der Fahrspur j     |
| $c_{1hj}$ | Änderung der Horizontalkrümmung über der Segmentlänge |
| $c_{0vj}$ | Anfangswert der Vertikalkrümmung                      |
| $c_{1vj}$ | Änderung der Vertikalkrümmung über der Segmentlänge   |
| $b_{0j}$  | Anfangsbreite der Spur j                              |
| $b_{ji}$  | Breitenänderung der Spur i über der Segmentlänge l    |
| $l_j$     | Länge des Segments                                    |

#### 5.1.4 Landmarken

Im EMS-Vision System werden signifikante Objekte der Umwelt als Landmarken verwendet. Die Landmarken werden je nach Art des Objektes in drei verschiedene Klassen eingeteilt. Als Landmarken der *Klasse 1* werden signifikante Segmente der Wissensbasis "Straßen" verwendet, wie z.B. Spitzkehren. Diese Landmarken werden während der Missionsdurchführung im wahrsten Sinne des Wortes "erfahren". Landmarken der *Klasse 2* sind ebenfalls Elemente der Wissensbasis "Straßen", sie müssen aber gezielt detektiert werden. Dazu gehören die Knotenpunkte des Straßennetzwerks und die daran anknüpfenden Querstraßen. Da die Modellierung dieser Elemente im Umweltmodell bereits auf die optische Erkennung abgestimmt ist, ist keine zusätzliche Modellierung nötig. Im Umweltmodell "Landmarken" werden die Eigenschaften dreidimensionaler stationärer Objekte, die in der natürlichen Umwelt vorkommen und zur genauen Positionsbestimmung geeignet sind, modelliert. Diese Objekte bilden die Landmarken der *Klasse 3*.

Die Landmarken der *Klasse 1* erlauben nur eine grobe Positionsabschätzung und werden daher meist als Hinweise auf eine Landmarke der *Klasse 2* oder



3 verwendet, die dann eine präzise Positionsbestimmung ermöglichen. Von der Vielzahl von Objekten in der natürlichen Umgebung eignen sich nicht alle gleichermaßen gut für die Landmarkennavigation. Die Auswahl der Objekte erfolgt nach speziellen Gesichtspunkten. Zum einen müssen Landmarken optisch eindeutig zu identifizieren sein; dies bedingt, daß sie sich von anderen Objekten in der näheren Umgebung deutlich unterscheiden. Zusätzlich müssen die Landmarken von den möglichen Fahrzeugpositionen aus gut zu sehen sein; Verdeckungen durch andere, nicht modellierte Objekte sollen also nicht auftreten. Zum anderen muß das äußere Erscheinungsbild der Landmarken, speziell die Geometrie, zeitinvariant sein. Die wahrgenommene Farbe und Textur sind aber in der Regel zeitvariante Größen; sie hängen sehr stark von den Beleuchtungsbedingungen (Tag oder Nacht) und oft auch von der Jahreszeit (Schnee auf einem Hausdach) ab. Abbildung 5.4 zeigt ein als Landmarke verwendetes Objekt, dessen Modellierung nachfolgend beschrieben wird.

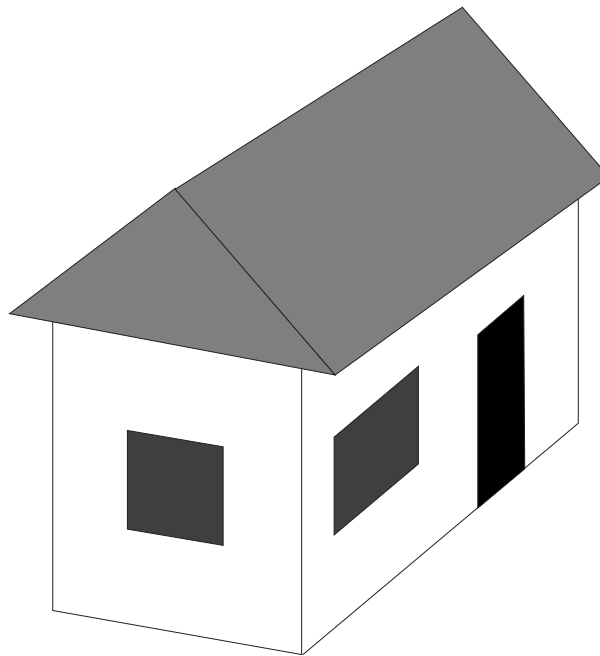


Abb. 5.4: Landmarke "Haus"

Die wissensbasierte Bildinterpretation nach dem 4D-Ansatz verwendet Hintergrundwissen über die Szene, das in Form- und Bewegungsmodellen vorliegt. Ein Modell stellt die Erwartung des Systems dar, wie ein Objekt in der Welt aufgebaut ist und welche Eigenschaften und Fähigkeiten es aufweist. Die Summe aller vorhandenen Modelle bildet das Wissen über die Welt, das die Verarbei-

tung verrauschter Meßdaten und insbesondere die Interpretation visueller Daten ermöglicht. Die Objektmodelle werden in einer Wissensbasis, der generischen Objektdatenbasis, zusammengefaßt. Da Landmarken als stationäre Objekte definiert sind, entfällt eine Modellierung der Bewegung. Die Modellierung der Objekte im Umweltmodell muß für die visuelle Wahrnehmung speziell auf die dabei verwendeten Bildverarbeitungsalgorithmen zugeschnitten sein. Bei dem hier vorgestellten Verfahren finden hauptsächlich Kantenoperatoren zur Merkmalsextraktion Verwendung. Bildkanten können durch zwei Arten von Merkmalen erzeugt werden:

1. Objektfeste Merkmale ergeben sich zum einen durch Formkanten, die die äußere Begrenzung des Körpers an sich bilden, aber auch durch Trennlinien, die auf der Oberfläche des Körpers Flächen mit unterschiedlichen homogenen Farbwerten begrenzen, beispielsweise die Trennlinien zwischen den Fenstern und der Hauswand in Abbildung 5.4.
2. Konturlinien ergeben sich bei gerundeten Flächen. Je nach Aspektbedingung ändert sich die Lage dieser Konturlinien auf der Oberfläche des Objekts.

Das Wissen, das für die visuelle Erkennung von Objekten erforderlich ist, kann also in zwei Bereiche aufgeteilt werden: in das Wissen über die räumliche Ausprägung der Objekte und in die Beschreibung der Reflexionseigenschaften seiner Oberfläche.

#### 5.1.4.1 Formmodellierung

Aus einer dreidimensionalen Modellierung der Landmarken kann für beliebige Aspektbedingungen die Abbildung des Objekts und seiner Merkmale in die Bildebene bestimmt werden. Die geometrische Beschreibung der Objekte erfolgt in einem objektfesten, kartesischen Koordinatensystem entsprechend den Konventionen der Luftfahrtnorm [55]. Der Ursprung des Koordinatensystems soll dabei im Schwerpunkt der Grundfläche liegen, die Ausrichtung der x-Achse entspricht der Längsachse des Objekts, die z-Achse zeigt in Richtung des Schwerkraftvektors bei Normallage des Objekts. Damit ist durch das Rechtssystem die Richtung der y-Achse festgelegt. Die Formen der Objekte werden aus primitiven Formelementen aufgebaut: als Formelemente werden analog zu D. Dickmanns [15] Punkte, Kanten, Flächen und Volumina verwendet. Punkte werden

als Hilfselemente zur Darstellung von Anfangs- und Endpunkten von Kanten und Flächen verwendet. Kanten können zum einen als Formkanten zur geometrischen Modellierung, zum anderen als Trennlinie zwischen Bereichen mit unterschiedlichen photometrischen Eigenschaften verwendet werden. Flächen werden durch einen geschlossenen Zug von Kanten eingegrenzt. Für die Modellierung von Kanten stehen Geraden, Fergusonkurven und Klothoiden zur Verfügung. Für die Beschreibung der Objektgeometrie selbst, die Lage von Eckpunkten und Formkanten, werden generische Formmodelle verwendet. Ein generisches Formmodell beinhaltet Vorschriften, wie in Abhängigkeit von formbeschreibenden Parametern die Koordinaten der Eckpunkte zu berechnen sind. Angaben über die Topologie legen fest, welche Objektpunkte untereinander durch Kanten verknüpft sind. Die Krümmung der Objektkanten wird ebenfalls durch Formparameter festgelegt. Die einzelnen Flächen werden wiederum durch beliebig viele Kanten begrenzt. Bild 5.5 zeigt die Modellierung der Geometrie des Objektes “Haus” mit einem generischen Formmodell.

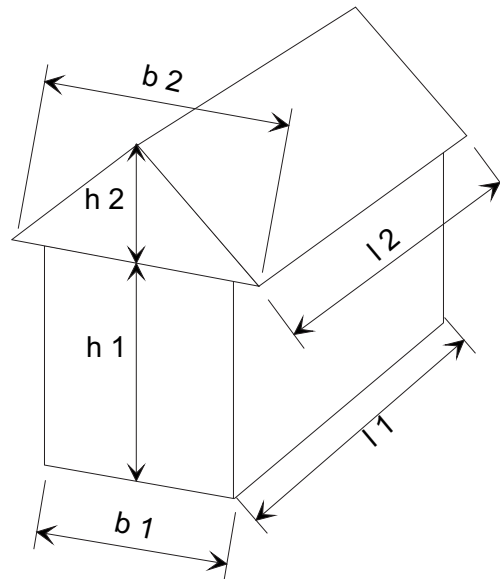


Abb. 5.5: Generisches Modell für ein “Haus”

Dabei werden 6 Formparameter  $[b_1, b_2, h_1, h_2, l_1, l_2]$  verwendet, um die geometrische Ausprägung des Objekts “Haus” zu beschreiben. Durch die Anpassung der Formparameter lassen sich unterschiedliche Objekte mit demselben Formmodell beschreiben. Auch komplexe Objekte lassen sich mit geringem Aufwand modellieren, wenn sie aus mehreren Teilobjekten mit primitiver Form dargestellt werden. Dadurch kann der Bestand an Formmodellen in der generischen Objektdatenbasis klein gehalten werden. In Abbildung 5.6 ist diese Modellierung

für das Objekt "Haus" beispielhaft dargestellt: Zur Modellierung wurde das Objekt "Haus" in vier primitive Grundelemente zerlegt. Im einzelnen sind dies der quaderförmige Grundkörper des Hauses, das Dach und die jeweils rechteckförmigen Fenster und Türen. Für die Modellierung des Hauses sind also 3 Modelle für primitive Grundobjekte ausreichend.

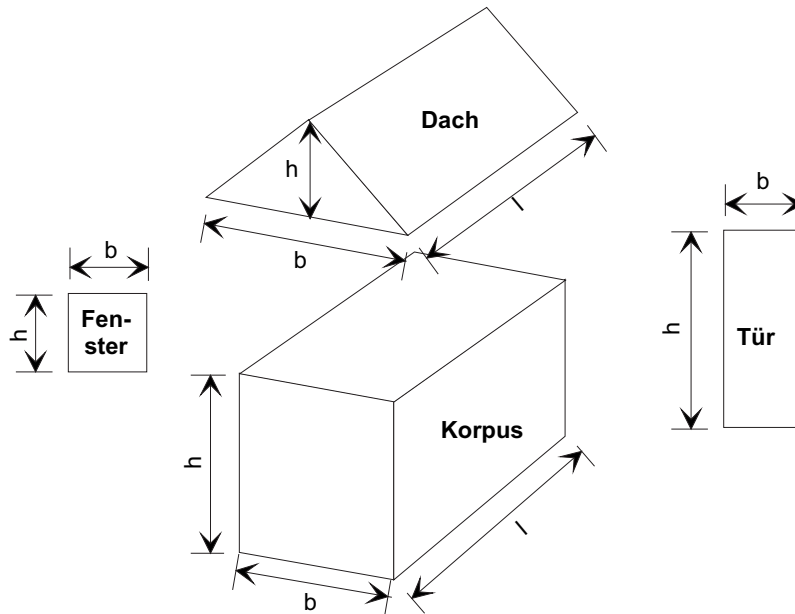


Abb. 5.6: Beschreibung des Objekts Haus durch primitive Basisobjekte

Die geometrische Beschreibung der einzelnen Teilobjekte erfolgt jeweils in deren objektfestem Koordinatensystem, die statische räumliche Relativlage der Teilobjekte zum Bezugsobjekt (z. B. das Objekt mit dem größten Volumen) wird durch homogene Transformationen (siehe [70], [65]) beschrieben. Durch eine homogene Transformation läßt sich dann die Projektion der Merkmale ins Bild berechnen. Diese ist von den Aspektbedingungen abhängig, also vom Blickwinkel auf die Szene, von der Brennweite der Kamera und deren Abstand zum Objekt. Um eine sichere Identifikation der Merkmale, hier zumeist Kantenelemente, zu gewährleisten, muß sich bei deren Abbildung ins Bild ein Mindestabstand zwischen parallelen Linienelementen ergeben. Dieser Abstand, der nötig ist, um ein Überlappen der Maskenoperatoren bei der Vermessung der Kanten zu vermeiden, ist abhängig von der Art und Größe der verwendeten Masken und der Suchpfadlänge. Bei einem sehr großen Abstand des Fahrzeugs zum Objekt oder sehr kleinen Brennweiten ist eine Betrachtung eines detaillierten Objektmodells meist nicht sinnvoll, da sich kleinere Details nicht in der erforderlichen Größe im Bild abbilden.

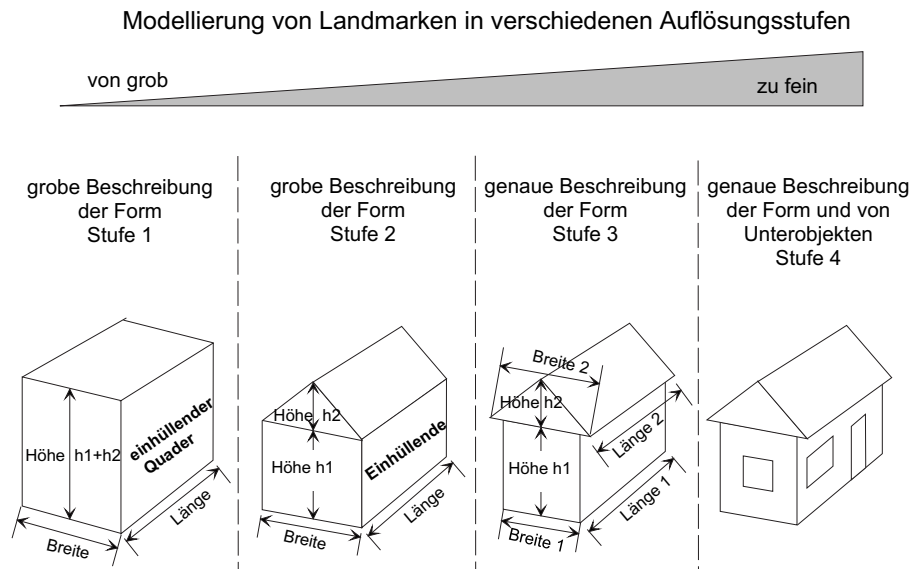


Abb. 5.7: Grob-zu-fein Modellierung des Objektes "Haus"

Für einen solchen Anwendungsfall ist es günstiger, weniger, aber deutlich erkennbare Merkmale in Betracht zu ziehen. Die Merkmale, die sich am signifikantesten im Bild abbilden und zudem die größte räumliche Ausprägung besitzen, sind die äußeren Objektkanten. Die Modellierung muß also mehrere Auflösungsstufen beinhalten, die je nach Aspektbedingungen die signifikantesten Objektmerkmale beinhaltet. Für das bereits vorgestellte Objektmodell "Haus" wurde eine Beschreibung in vier Auflösungsstufen gewählt. Auf der untersten Beschreibungsebene erfolgt eine grobe Beschreibung der äußeren Objektkontur als umhüllender Quader. Auf der Ebene darüber werden die schrägen Begrenzungslinien des Daches als Merkmale mit hinzu genommen. Auf der nächsten Ebene erfolgt die geometrische Beschreibung des Objekts mit dem detaillierten Formmodell, jedoch noch ohne Subobjekte, wie Fenster und Türen. Diese sind nur in der höchsten Auflösungsstufe enthalten.

### Rotationssymmetrische Objekte

Bei der Modellierung von rotationssymmetrischen Objekten sind prinzipiell zwei Vorgehensweisen möglich:

1. Das Objekt wird dreidimensional modelliert und die Form durch ein Drahtgittermodell angenähert. Wie in Abbildung 5.8 dargestellt, steigt dabei je nach Detaillierungsgrad die Anzahl der Formelemente und damit der

Modellierungsaufwand stark an. Zusätzlich müssen zyklisch sehr viele unsichtbare innere Kanten “ausgeblendet” werden, was den Rechenaufwand stark ansteigen läßt. Das Aussehen des Objekts läßt sich dadurch aber aus beliebigen Blickwinkeln rekonstruieren.

2. Für eingeschränkte Blickwinkel, in einem Bereich orthogonal zur Symmetrieachse, kann ein Verfahren angewandt werden, das sich bereits in der Computergraphik bewährt hat. Das Objekt wird dabei zweidimensional modelliert und entsprechend zum Augpunkt hin ausgerichtet. Dadurch kann die Anzahl der nötigen Formelemente minimiert werden. Wird als Formelement ein Kreis verwendet, so kann z. B. eine Kugel mit nur einem Formelement modelliert werden. Dadurch läßt sich eine deutliche Reduktion des Rechenaufwands erreichen.

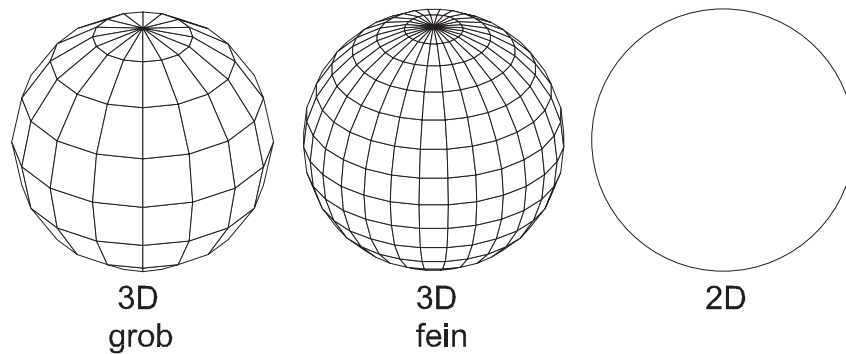


Abb. 5.8: Modellierung rotationssymmetrischer Objekte

#### 5.1.4.2 Photometrische Eigenschaften

Ist ein initialer Satz von Zustandsgrößen für ein Objekt bekannt, kann mit Hilfe des Objektmodells die Lage der gesuchten Merkmale in der Bildfläche vorhergesagt werden. An diesen ausgewählten Stellen wird dann jeweils der für das erwartete Merkmal geeignete Operator eingesetzt, um dieses Merkmal im Bild zu finden. Für das Auffinden von Kanten werden am ISF gerichtete ternäre Masken als Kantenoperatoren (vgl. K.-D. Kuhnert [50] und D. Dickmanns [15]) eingesetzt, für Flächen wurde der Dreiecksoperator (vgl. S. Hötzl [41]) entwickelt. In der vorliegenden Arbeit wurden ausschließlich ternäre Masken als Kantenoperatoren eingesetzt.

Ein entscheidender Schritt bei der visuellen Objekterkennung ist die Merkmalsselektion, bei der eines der bei der Korrelation des Kantenoperators mit dem

Bildausschnitt gefundenen Extrema dem gesuchten Merkmal zugeordnet werden muß. Eine Voraussetzung für eine korrekte Zuordnung ist dabei das Vorwissen über die Art des Grauwertübergangs. Sind beide angrenzenden Flächen sichtbar, so wird der Grauwertübergang durch deren photometrische Eigenschaften festgelegt. Für die Landmarken der *Klasse 3* wird dazu, falls während der Kartographierung erfaßt, als Vorwissen über die photometrischen Eigenschaften aller Flächen der Farbwert, dargestellt im RGB-Farbraum, im Umweltmodell "Landmarken" abgelegt. Für die Verarbeitung von monochromen Videobildern kann daraus ein Grauwert bestimmt werden. Aus dem Verhältnis zweier Grauwerte kann eine Parametrisierung der Merkmalsselektion erfolgen.

Ist nur eine Fläche sichtbar, so tritt an dieser Kante ein Übergang zwischen einer Körperfläche und dem nicht modellierten und daher unbekanntem Hintergrund auf. Dann hat die Merkmalsselektion nach anderen Gesichtspunkten, wie z. B. der Auswahl des größten Extremums, zu erfolgen.

### 5.1.5 Gültigkeit der Daten

Das bevorzugte Einsatzgebiet der hier behandelten autonomen Fahrzeuge ist das in der Wissensbasis "Straßen" abgespeicherte Wegenetz. Für ein Fahrzeug, das sich auf diesem Wegenetz bewegt, kann der Bereich, von dem aus die Landmarken sichtbar sind, genau angegeben werden. Dazu verweisen Referenzen von den Elementen der Wissensbasis "Straßen" auf alle von dort aus sichtbaren Landmarken. Die Beschreibung von Position und Orientierung einer Landmarke erfolgt im lokalen Koordinatensystem des zugehörigen Straßensegmentes.

Der Datengehalt der Wissensbasen ist nicht uneingeschränkt gültig, da ihr Datengehalt nur zum Zeitpunkt der Erstellung tatsächlich verifiziert wurde und digitale Karten meist aus Kostengründen nur zu diskreten Zeitpunkten aktualisiert werden. Da bewußt nur in der bestehenden Infrastruktur bereits vorhandene Merkmale in die Wissensbasen aufgenommen werden, unterliegt dieser Datenbestand aber einem stetigen Wandel. Objekte, die als Landmarke modelliert sind, werden entfernt oder umgestaltet, und neue Objekte, welche die Sichtbarkeitsbedingungen für benachbarte Landmarken einschränken können, werden eingefügt. Ebenso kann das Wegenetz selbst umgestaltet werden, so daß die Landmarken zwar noch in der realen Umwelt vorhanden sind, von der neuen Streckenführung aus aber nicht mehr gesehen werden können.

Diese zeitlichen Prozesse führen dazu, daß die Wahrscheinlichkeit fehlerhaften

Informationsgehalts innerhalb der Wissensbasis ebenfalls über der Zeit ansteigt. Um dem Umstand Rechnung zu tragen, daß die Wissensbasis also veraltet sein kann, wird ein künstlicher Alterungsprozeß in das Umweltmodell integriert. Zum Zeitpunkt der Erstellung einer neuen Wissensbasis darf der Datengehalt für alle enthaltenen Objekte gleichermaßen als gesichert angesehen werden. Das Erstellungsdatum wird als Parameter jedes Objekts in das Umweltmodell integriert. Bei der Bewertung eines Objekts durch die Missionsplanung wird die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt der Missionsdurchführung und diesem Datum, also das Alter des Eintrags in der Wissensbasis, als Parameter berücksichtigt. Wird nun ein Objekt während einer Mission erfolgreich detektiert, so wird in die Wissensbasis das aktuelle Datum eingetragen. Über der Zeit wird somit der Alterungsprozeß für erfolgreich detektierte Objekte stark verlangsamt. Durch die bevorzugte Verwendung von “jungen” Referenzobjekten wird die Navigationsicherheit bei der Missionsdurchführung stark erhöht. Die Bewertungsfunktion zeigt Gleichung (5.8). Auf diese wird im Abschnitt 5.3 noch näher eingegangen.

## 5.2 Die eigenen Fähigkeiten

Die Aufgabe der *Missionsplanung* ist es, für eine spezifizierte Zielvorgabe einen geeigneten Missionsplan zu erstellen. Bei der Missionsdurchführung werden die zur Verfügung stehenden Verhaltensfähigkeiten gezielt aktiviert, um das autonome Fahrzeug an das Ziel zu führen. Diese Verhaltensfähigkeiten können sich sowohl von der Komplexität her als auch von den Voraussetzungen, die für eine erfolgreiche Durchführung erfüllt sein müssen, stark unterscheiden. Während zur Verhaltensfähigkeit “*Straße Folgen*” als aktive Wahrnehmungsfähigkeit die Erkennung der befahrenen Straße ausreicht<sup>1</sup>, müssen für die Fähigkeit “*Abbiegen*” zusätzlich die Kreuzung und eine Querstraße erkannt werden. Diese höhere Komplexität der Fähigkeit “*Abbiegen*” birgt somit auch ein gesteigertes Risiko in sich. Eine Zielsetzung der *Missionsplanung* sollte es daher sein, diese Risiken mit abzuwägen, und bei der Streckenwahl diejenigen Routen zu bevorzugen, auf denen das Fahrzeug insgesamt das geringste Risiko eingeht.

Als Beurteilungskriterium wird eine Wissensbasis eingeführt, in der die Erfolgsaussichten der einzelnen Verhaltensfähigkeiten zur Fortbewegung abgelegt werden. Für jede Fähigkeit wird ein Bewertungsfaktor  $k_{vf}$  abgelegt, der sich

---

<sup>1</sup>Die Erkennung von anderen Subjekten und Objekten ist stets zusätzlich erforderlich.



wie folgt berechnet.

$$k_{vf} = \frac{n_e}{n_{ges}} \quad (5.3)$$

mit:

|           |   |
|-----------|---|
| $n_e$     | Anzahl der erfolgreichen Durchführungen einer Fähigkeit |
| $n_{ges}$ | Gesamte Anzahl der Durchführungen einer Fähigkeit       |

Dieser Wert wird zunächst während der Testphase einer Verhaltensfähigkeit bestimmt. Nach Abschluß einer Mission können die Einträge in der Wissensbasis mit den neu gemachten Erfahrungen aktualisiert werden.

### 5.3 Die Aufbereitung des Wissens

Für die Missionsplanung müssen die in den Wissensbasen gespeicherten Daten gemäß der gestellten Planungsvorgaben aufbereitet werden. Als das bevorzugte Operationsgebiet der autonomen Fahrzeuge am ISF sind befestigte und unbefestigte Straßen vorgesehen<sup>2</sup>. Netzwerke, wie z.B. das Wegenetz der öffentlichen Straßen, lassen sich sehr gut als Graph darstellen. In allgemeiner Form ist ein Graph als eine Menge von Knoten und Kanten beschrieben. Dabei wird jeweils ein Knotenpaar durch eine oder mehrere Kanten miteinander verbunden. Für viele Problemstellungen ist es nötig, den Kanten eine Richtung zuzuweisen, um auszudrücken, daß eine Kante nur den Weg von einem Knoten zu seinem Nachbarknoten beschreibt, dieser Weg umgekehrt allerdings nicht besritten werden darf. In der schematischen Darstellung eines solchen gerichteten Graphen erhalten die Kanten einen Pfeil, der die Richtung der Verbindung kennzeichnet. Um unterschiedliche Qualitäten von Kanten auszudrücken, wird ihnen eine Bewertungszahl, das Kantengewicht, zugewiesen. Dies führt zum *gerichteten, gewichteten Graphen*, der die Grundlage für die folgenden Ausführungen bildet. In Abbildung 5.10 ist ein Graph für ein Wegenetz beispielhaft dargestellt.

Ein Graph wird als *zusammenhängender Graph* bezeichnet, wenn jeder Knoten von allen anderen Knoten aus erreichbar ist; dabei kann die Kantenrichtung vernachlässigt werden. In einem Wegenetz erfolgt die Verbindung zweier Punkte durch ein Straßenelement. Straßenelemente sind, wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben, die Elemente Segment, Aus-, Einfahrt und Kreuzung. Also entspricht

<sup>2</sup>Für eine zielgerichtete Wegeplanung querfeldein sind gänzlich andere Methoden nötig, siehe z. B. [14, 93], auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

die Menge der Straßenelemente den Kanten des Netzwerkes. Die Stoßstellen, an denen zwei Straßenelemente aufeinandertreffen, entsprechen den Knoten des Graphen. Die Richtung der Kantenelemente ergibt sich aus den in der Wissensbasis "Straßen" abgespeicherten zulässigen Fahrtrichtungen: nur Einbahnstraßen erhalten eine Richtungsangabe. Um den Straßenelementen ein Kantengewicht zuweisen zu können, ist ein Formalismus nötig, der einen Vergleich der Straßenelemente untereinander ermöglicht. Dabei müssen zum einen die Restriktionen, die sich durch das verwendete Fahrzeug ergeben, berücksichtigt werden. Das gesamte Wegenetz ist in der Regel nicht für alle Fahrzeugtypen befahrbar. Einschränkungen können sich aus der Größe und Masse eines Fahrzeuges ergeben aber auch durch kinematische Grenzen, denen das Fahrzeug unterworfen ist. Zum anderen müssen auch die besonderen Anforderungen an die Streckenführung berücksichtigt werden, die sich für ein autonomes System ergeben, das sich an optischen Merkmalen orientiert. Wesentlichen Einfluß auf die Bewertung haben auch die Planungskriterien, die der Missionsplanung von der oberen Entscheidungsebene vorgegeben werden. Als Planungskriterien können neben der Minimierung von Streckenlänge oder Fahrdauer auch die gewünschte Startzeit, die Ankunftszeiten an den Zielpunkten und die Verweildauer an Zwischenzielen vorgegeben werden.

Wird nur die Minimierung der Streckenlänge angestrebt, so wirkt sich einzig die Segmentlänge  $L_{Max}$  auf das Kantengewicht aus. Diese kann direkt der Wissensbasis Straßen entnommen werden. Das Kantengewicht für das Segment  $x$  wird bestimmt zu:

$$g_1(x) = L_{Max}(x) \quad (5.4)$$

Alternativ dazu kann es wünschenswert sein, die Fahrdauer zu minimieren. Unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit  $v_m$  auf dem Straßensegment und der bekannten Segmentlänge  $L_{Max}$  wird die Fahrdauer abgeschätzt zu:

$$g_2(x) = \frac{L_{Max}(x)}{v_m} \quad (5.5)$$

Bei der Abschätzung von  $v_m$  müssen zusätzlich zu den von der Streckenführung bedingten Aspekten, die im Umweltmodell abgespeicherten Werte erfaßt werden. Sowohl die vom Fahrzeug erreichbare Maximalgeschwindigkeit als auch die der Missionsplanung vorgegebenen Planungsparameter müssen dabei berücksichtigt werden. Die Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs bildet stets den

oberen Grenzwert für  $v_m$ . Bei Streckenabschnitten mit Geschwindigkeitsbegrenzung wird  $v_m$  durch diesen Wert begrenzt. Die von der oberen Entscheidungsinstanz vorgegebene Geschwindigkeitscharakteristik wird nur auf Streckenabschnitten ohne Geschwindigkeitsbegrenzung als oberer Grenzwert berücksichtigt. Auf bestimmten Streckenabschnitten ist der im Umweltmodell "Straßen" abgelegte Wert für  $v_m$  mit der Tageszeit (Berufsverkehr auf Ein- und Ausfallstraßen) oder zusätzlich mit dem Datum (Urlaubsreisezeit) korreliert; daher müssen Tageszeit und Datum bei der Bewertung bekannt sein. Die Bewertung kann darum erst während der eigentlichen Planungsphase erfolgen, wenn die Ankunftszeit am Streckenabschnitt abgeschätzt werden soll. Beide Bewertungsfunktionen (5.4) und (5.5) lassen sich zu einer einzelnen Bewertungsfunktion zusammenfassen. Für die Auswahl des gewünschten Optimierungskriteriums wird ein zusätzlicher Parameter  $p$  eingeführt. Die für ein Straßenelement ( $x$ ) anfallende Bewertung  $g(x)$  ergibt sich damit zu:

$$g(x) = (p \cdot L_{Max} + (1 - p) \cdot \frac{L_{Max}}{v'_m}) \quad (5.6)$$

mit der zur Angleichung der Einheiten normierten mittleren Geschwindigkeit auf dem Straßensegment

$$v'_m = \frac{v_m}{1km/h} \quad (5.7)$$

und dem Parameter  $p$  mit  $p \in \mathfrak{R}$  und zugleich  $p \in [0; 1]$ . Für  $p = 1$  wird die Streckenlänge optimiert, für  $p = 0$  die Fahrdauer; Zwischenwerte erlauben eine Berücksichtigung beider Aspekte in unterschiedlicher Gewichtung.

Bei der Auswahl der Streckenführung wird gemäß Abschnitt 5.1.5 eine Bewertung des Alters der entsprechenden Einträge in der Wissensbasis vorgenommen. Abbildung 5.9 und Gleichung (5.8) beschreiben die Gewichtungsfunktion für die Berechnung des Gewichtungsfaktors  $k_a$  für die Gültigkeit des Hintergrundwissens.

$$k_a = \exp(-(T_r^2)) \quad \text{mit} \quad T_r = \frac{T}{T_a} \quad (5.8)$$

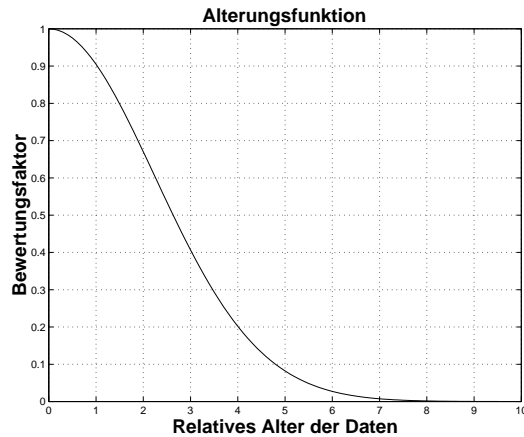


Abb. 5.9: Alterungsfunktion

kleine Werte von  $T_r$  zunächst nur langsam abfällt (Dies wird durch das Quadrieren von  $T_r$  erreicht). In einem definierten Bereich danach soll sie stark abfallen, um hier eine deutliche Unterscheidung zwischen Datensätzen unterschiedlichen Alters zu erreichen. Für größere Werte von  $T_r$  soll sich die Funktion dann asymptotisch der Null annähern. Dadurch wird gewährleistet, daß sehr alte Datensätze zwar entsprechend schlecht bewertet, aber nicht vollständig ignoriert werden.

Neben den Planungsvorgaben durch die Zentrale Entscheidungsinstanz müssen auch die speziellen Fähigkeiten des Fahrzeugs in einem Bewertungsfaktor berücksichtigt werden. Dabei sind mehrere Aspekte zu beachten, weshalb dieser Bewertungsfaktor aus mehreren Komponenten zusammengesetzt wird. Zunächst muß überprüft werden, ob ein Straßenelement vom verwendeten Fahrzeug befahren werden kann. Als mögliche Restriktionen werden bei Segmenten die maximal zulässigen Werte für Fahrzeugmasse, -höhe und -breite berücksichtigt. Diese Fahrzeugparameter, die in der DOB zur Verfügung gestellt werden, können direkt mit den Werten des Umweltmodells "Straßen" verglichen werden. Bei sehr engen Kurven oder Abzweigen wird rechnerisch ermittelt, ob der Abbiegevorgang mit dem implementierten Satz von Manövern durchgeführt werden kann. Das Verfahren ist im Anhang A näher beschrieben. Die Befahrbarkeit von starken Steigungen ist durch die maximale Steigfähigkeit des Fahrzeugs begrenzt. Dieser Wert kann als statischer Fahrzeugparameter ebenfalls von der DOB abgerufen werden. Für alle Straßensegmente wird die Bewertung nach dieser Überprüfung festgelegt zu:

$T$  ist dabei das absolute Alter der Daten und  $T_r$  bezeichnet das relative Alter bezogen auf die Alterungskonstante  $T_a$ . Durch Variation von  $T_a$  kann beeinflusst werden, wie schnell die Funktion abklingt. Der verwendete Wert für  $T_a$  wurde empirisch ermittelt.

Die Zielsetzung bei der Entwicklung dieser Alterungsfunktion war dabei zum einen, daß sie für klei-

$$k_k = \begin{cases} 0 & : \text{Straßensegment nicht befahrbar} \\ 1 & : \text{Straßensegment befahrbar} \end{cases} \quad (5.9)$$

Beim Befahren von Straßen, die einen rauen Untergrund aufweisen, kann der Fahrzeugaufbau zu hochfrequenten Schwingungen angeregt werden; dies führt, wenn keine aktive Blickrichtungsstabilisierung zur Verfügung steht, zu einer unscharfen Abbildung der Szene im Kamerabild. Aus der Wissensbasis "Straßen" können zwar keine direkten Angaben über eine hochfrequente Oberflächenstruktur der Straße abgerufen werden, jedoch die Information darüber, ob es sich um eine befestigte oder unbefestigte Straße handelt. Während asphaltierte Straßen in der Regel eine glatte Oberflächenstruktur aufweisen, treten bei geschotterten oder unbefestigten Straßen sehr viel häufiger Unregelmäßigkeiten, wie z.B. Schlaglöcher, auf. Aus Komfortgründen und zur Schonung des Materials werden bei der Bewertung der Straßenelemente daher befestigte Straßen bevorzugt. Für befestigte Straßen wird die Bewertung auf  $k_s = 1$  festgelegt; für unbefestigte Straßen wird  $k_s = 2$  gesetzt.

$$k_s = \begin{cases} 1 & : \text{befestigte Straße} \\ 2 & : \text{unbefestigte Straße} \end{cases} \quad (5.10)$$

Bei der Fahrt auf Straßen mit starker horizontaler Krümmung ist die Sichtbarkeit der optischen Spurmarkierungen teilweise stark eingeschränkt. Auf einem kurvigen Streckenabschnitt verschlechtern sich auch die Aspektbedingungen für die Entdeckung von Abzweigen. Darüber hinaus stellt die geringere maximale Sichtweite ein erhöhtes Risiko dar. Als Maß für die Bewertung eines einzelnen Straßensegments kann die horizontale Winkeländerung verwendet werden. Die gesamte Winkeländerung im Segment kann durch Integration des Betrages der horizontalen Krümmung über der Segmentlänge  $l$  bestimmt werden:

$$\Psi = \int_0^l |c_h dl| = |c_{0h}| \cdot l + |c_{1h}| \cdot \frac{l^2}{2} \quad (5.11)$$

Diese Bewertung führt jedoch zum selben Ergebnis, wenn ein schwach gekrümmtes Segment mit großer Länge und ein sehr kurzes, aber stark gekrümmtes Segment vorliegen. Der Bewertungsfaktors muß also die Winkeländerung pro Längeneinheit berücksichtigen.

$$k_h = \frac{\Psi}{l} \quad (5.12)$$

Bei geraden Streckenabschnitten sind geringere Risiken und bessere Sichtbedingungen zu erwarten.

Analog dazu stellt die Fahrt auf Straßen mit großer vertikaler Krümmung aufgrund der verminderten Sichtweite und der größeren Beanspruchung des Fahrzeugs ein erhöhtes Risiko dar. Ein Maß dafür ist die vertikale Winkeländerung, die ein Straßensegment pro Längeneinheit aufweist. Die gesamte Winkeländerung kann durch Integration der vertikalen Krümmung über der Segmentlänge  $l$  bestimmt werden:

$$\Theta = \int_0^l |c_v| dl = |c_{0v}| \cdot l + |c_{1v}| \cdot \frac{l^2}{2} \quad (5.13)$$

Analog zur Bewertung der horizontalen Krümmung muß auch hier die Winkeländerung pro Längeneinheit berücksichtigt werden.

$$k_v = \frac{\Theta}{l} \quad (5.14)$$

Bei geringen Steigungen sind geringere Risiken zu erwarten und bessere Sichtbedingungen gegeben.

Jedes Straßenelement erfordert spezielle Verhaltensfähigkeiten; diese werden nicht alle mit derselben Sicherheit beherrscht.

$$k_{vf} \in [0; 1] \quad (5.15)$$

Der Faktor  $k_{vf}$  wird direkt der Wissensbasis für die Verhaltensfähigkeiten (siehe Abschnitt 5.2) entnommen. Statische Hindernisse auf der Fahrbahn, wie z. B. eine Streckensperrung aufgrund einer Baustelle, können die Befahrbarkeit eines Streckenabschnitts stark einschränken oder sogar aufheben. Außerdem können besondere Verfahren zur Straßenerkennung nötig werden (zusätzliche gelbe Spurmarkierungen im Baustellenbereich) Informationen über Hindernisse können statisch in der Wissensbasis "Straßen" abgelegt werden. Um aktuelle Streckeninformationen berücksichtigen zu können, müßten diese zur Laufzeit des Systems eingespeist (z. B. über Verkehrsfunk) werden. Bei einem Streckenelement ohne Hindernisse ist  $k_H = 1.0$ .

$$k_H \in [0; 1] \quad (5.16)$$

Durch Kombination dieser Einzelfaktoren wird der Kostenfaktor  $k_{FZG}$  gebildet. Zielsetzung ist dabei, daß  $k_{FZG}$  für ungeeignete Wegstrecken ansteigt. Hat

einer der Faktoren  $k_k$ ,  $k_{vf}$  und  $k_H$  den Wert 0, so ist der Straßenabschnitt nicht befahrbar und soll eine unendlich hohe Bewertung erhalten; die Faktoren  $k_s$ ,  $k_h$  und  $k_v$  können unabhängig voneinander die Bewertung verschlechtern und gehen deshalb additiv in die Bewertung des Alters des betreffenden Hintergrundwissens durch den Faktor  $k_a$  ein. Für veraltete Dateneinträge gilt:  $k_a \rightarrow 0$ .

Der Bewertungsfaktor  $k_{FZG}$  ergibt sich damit zu:

$$k_{FZG} = \frac{k_s + k_h + k_v}{k_a \cdot k_k \cdot k_{vf} \cdot k_h} \quad (5.17)$$

Zugrunde gelegt wird bei der Bestimmung von  $k_{FZG}$ , daß der Typ von Straßensegment, auf dem das am sichersten beherrschte Fahrmanöver ausgeführt werden kann, als Verbindung zwischen zwei Knoten bei günstigen Fahrbahnparametern und ohne Beeinflussung durch statische Hindernisse auf der Fahrbahn die ideale Streckenführung darstellt. In diesem Fall wird  $k_{FZG} = 1$ . Straßenelemente, die aufgrund ihrer geometrischen Parameter (zu enge Kurven, zu schmale Fahrspur, etc.) vom eingesetzten Fahrzeug überhaupt nicht befahren werden können, oder die eine Verhaltensfähigkeit erfordern, bei der sich über einen längeren Beobachtungszeitraum herauskristallisiert hat, daß sie nicht erfolgreich ausgeführt werden kann, werden mit  $k_{FZG} \rightarrow \infty$  bewertet. Die Bewertung eines Straßensegments wird mit (5.6) und (5.17) angesetzt zu:

$$g(x) = (p \cdot l + (1 - p) \cdot \frac{l}{v'_m}) \cdot k_{FZG} \quad (5.18)$$

Nach der Berechnung der Kantengewichte kann nunmehr der Graph zur Beschreibung des Straßennetzwerkes aufgestellt werden.

Die Abbildung 5.10 zeigt als Beispiel den Graph eines kleinen Wegenetzes. Kanten, die in beiden Richtungen durchlaufen werden können, weisen keinen Pfeil auf. Jede Kante weist eine Kennzahl zur eindeutigen Identifizierung und ein Kantengewicht auf. Die beiden Zahlen werden, durch ein Komma getrennt, neben dem entsprechenden Straßenelement angegeben. Die Stoßstellen zweier Straßenelemente sind eingekreist und mit einem Buchstaben bezeichnet. Eine Besonderheit weist das Straßenelement 6 auf, das zwei verschiedene Gewichtungen für die unterschiedlichen Fahrtrichtungen erhält und für dessen Darstellung zwei Bögen verwendet werden. Jeweils ein Bogen wird für eine Fahrtrichtung verwendet.

Eine Repräsentationsform eines Graphen ist die Darstellung als Adjazenzma-

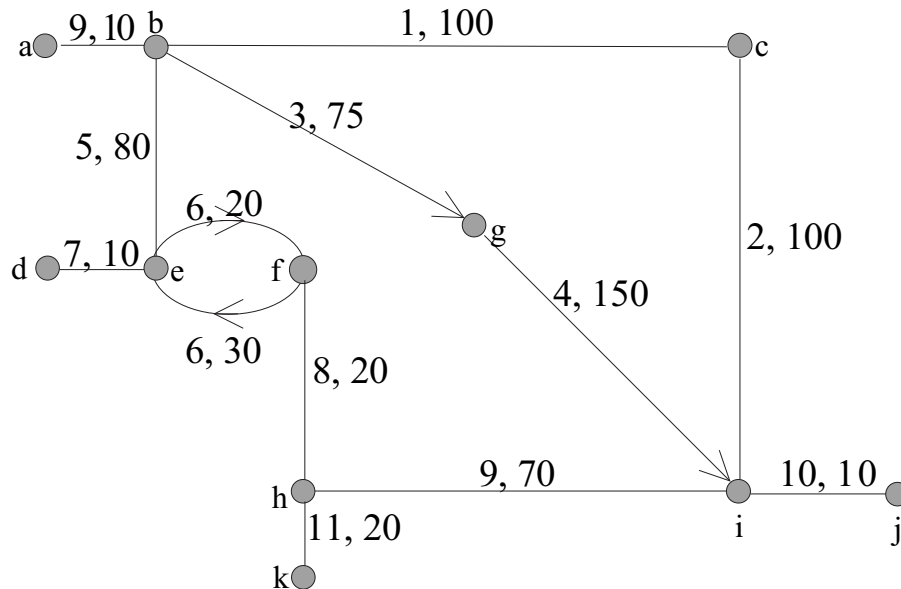


Abb. 5.10: Gewichteter, gerichteter Graph

trix. In Tabelle 5.6 ist die Adjazenzmatrix für den Graphen aus Abbildung 5.10 dargestellt. Die einzelnen Matrixelemente geben die direkten Verbindungen zwischen den Knoten und das Kantengewicht dieser Verbindungen an. Für mehrfache Verbindungen zwischen zwei Straßenelementen wird nur diejenige mit dem für das jeweilige Bewertungskriterium günstigsten Kantengewicht eingetragen. Beim vorliegenden Fall wird die günstigste Bewertung durch das niedrigste Kantengewicht ausgedrückt. Unbelegte Matrixelemente drücken aus, daß es keine direkte Verbindung zwischen zwei Straßenelementen gibt.

Tabelle 5.6: Adjazenzmatrix für den Graphen in Abbildung 5.10

| Knoten | a    | b     | c     | d    | e    | f    | g    | h    | i     |
|--------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| a      |      | 9,10  |       |      |      |      |      |      |       |
| b      | 9,10 |       | 1,100 |      | 5,80 |      | 3,75 |      |       |
| c      |      | 1,100 |       |      |      |      |      |      | 2,100 |
| d      |      |       |       |      | 7,10 |      |      |      |       |
| e      |      | 5,80  |       | 7,10 |      | 6,20 |      |      |       |
| f      |      |       |       |      | 6,30 |      |      | 8,20 |       |
| g      |      |       |       |      |      |      |      |      | 4,150 |
| h      |      |       |       |      |      | 8,20 |      |      | 9,70  |
| i      |      |       | 2,100 |      |      |      |      | 9,70 |       |



Dabei stehen in der linken Spalte die Kennbuchstaben der Anfangsknoten und in der ersten Zeile die Kennbuchstaben der Endknoten eines Streckenzuges im Graphen. So führt beispielsweise der Streckenzug von Knoten g nach i über das Straßenelement 4, das eine Gewichtung von 150 besitzt. Gerichtete Kanten führen zu einer Unsymmetrie innerhalb der Matrix. Die entsprechenden Matrixelemente sind grau hinterlegt. So existiert keine Verbindung von i nach g.

Die Adjazenzmatrix enthält somit alle für die Missionsplanung nötigen Informationen über das Wegenetz. Die Routenplanung auf Basis dieser Daten wird in Kapitel 6 beschrieben.



## 6 Missionsplanung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden zunächst die Mechanismen zur Repräsentation und zum gezielten Einsatz von Fähigkeiten in einem verteilten System vorgestellt. Dann wurde der Datengehalt der statischen Wissensbasen erläutert. In diesem Kapitel werden nun die wissensbasierten Planungskomponenten vorgestellt, die auf diesen Grundlagen aufbauen. Bei der Fragestellung “Wie kann ein autonomes System eine spezifizierte Aufgabe zielgerichtet lösen”, tauchen mehrere Problemstellungen auf:

*Wie* kann das System selbst seine Position in der Welt bestimmen?

*Wie* kann das System an das Ziel gelangen?

*Welche* Fähigkeiten müssen dazu *wie* und *wann* eingesetzt werden?

In den folgenden drei Abschnitten werden Lösungen für diese Fragestellungen vorgestellt.

Der erste Abschnitt beschreibt ein Verfahren, durch das ein autonomes System in die Lage versetzt wird, selbständig die eigene Position in der bekannten Umwelt zu bestimmen. Falls erforderlich, kann das Fahrzeug auf einen in der Wissensbasis “Straßen” enthaltenen Ausschnitt der Umwelt geführt werden.

Im zweiten Abschnitt wird gezeigt, wie von der bekannten Anfangsposition innerhalb des Wegenetzes derjenige Weg zum Ziel bestimmt wird, der den Fähigkeiten des Systems am meisten entgegen kommt. Dabei kommen die in Abschnitt 5.3 vorgestellten Bewertungsfaktoren zum Einsatz.

Im letzten Abschnitt wird erläutert, wie die generierte Route auf die im System verfügbaren Fähigkeiten abgebildet und daraus ein Handlungsplan für die zielgerichtete Ausführung der gestellten Aufgabe generiert wird.

### 6.1 Lokale Orientierung

Zur wissensbasierten Missionsplanung müssen verschiedene Parameter bekannt sein, wie zum Beispiel die Position und Orientierung des Fahrzeugs relativ zum Straßennetzwerk. Die automatisierte Missionsplanung, bei der lediglich der Zielpunkt spezifiziert werden muß, erstreckt sich derzeit nur auf den Datenbestand

der Wissensbasis “Straßen”, daher muß sich dazu das Fahrzeug auch tatsächlich auf einer in der Wissensbasis abgespeicherten Straße befinden. Dies muß vor der Missionsplanung vom System verifiziert werden. Befindet sich das Fahrzeug im freien Gelände, so kann ebenfalls direkt die entsprechende Zielvorgabe für die Querfeldeinfahrt durch den Benutzer erfolgen. Ist das Fahrzeug auf einem Streckenabschnitt, der nicht in der Karte verzeichnet ist, muß es zunächst auf bekanntes Terrain geführt werden. Das der initialen Positionsbestimmung zugrundeliegende Verfahren, das als *Lokale Orientierung* bezeichnet wird, ist in [33] ausführlich dargestellt.

Am Ende der *Lokalen Orientierung* ist die Position des Fahrzeugs innerhalb des kartographierten Straßennetzwerks bekannt. Zusammen mit dem vom Bediener oder *Central Decision* spezifizierten Zielpunkt sind somit alle Parameter bekannt, um eine Routenplanung durchführen zu können.

## 6.2 Die Routenplanung

### 6.2.1 Planung auf Wegenetzen

Der erste Schritt einer Routenplanung ist in der Regel die Festlegung des Start- und des Zielpunkts für eine gewünschte Fahrt. Der Startpunkt wurde in der Phase der *Lokalen Orientierung* bestimmt, ein oder mehrere Zielpunkte können von *Central Decision* vorgegeben werden. Zwischen diesen Punkten sollen nun auf der Grundlage der in der Adjazenzmatrix abgelegten Repräsentation des Wegenetzes mögliche Verbindungen, auch Routen genannt, bestimmt werden. Der Datengehalt der Adjazenzmatrix ist jedoch noch nicht vollständig, weil die Bewertung einiger Matrixelemente zeitvariant ist. Diese Bewertung kann daher erst während der Planung erfolgen, wenn die Ankunftszeit an den entsprechenden Streckenabschnitten abgeschätzt werden kann. Eine Route ist jeweils aus einer Folge von Straßenelementen aufgebaut. Aus den ermittelten Routen soll wiederum mit Hilfe eines Gütekriteriums die günstigste ausgewählt werden. Das hier verwendete Gütekriterium ist speziell für die Anforderungen der visuellen Landmarkennavigation entwickelt worden und wird als Optimalitätskriterium bezeichnet. Eine mit Hilfe des Optimalitätskriteriums ausgewählte Route stellt die hinsichtlich des verwendeten Sensorsystems und des eingesetzten Fahrzeugs günstigste Route dar. Für die Bestimmung einer optimalen Verbindung zwischen zwei Knoten in einem gerichteten, gewichteten Graphen wurden in der

Graphentheorie viele verschiedene Algorithmen entwickelt. Hier wird der aus der Literatur bekannte  $A^*$ -Algorithmus [101] verwendet, der einige Besonderheiten aufweist. Bei diesem heuristischen Ansatz wird durch die Verwendung einer Schätzfunktion die Effizienz gegenüber einfachen Algorithmen, wie z.B. dem Dijkstra - Algorithmus, beträchtlich erhöht. Aufbauend auf dem Algorithmus der Verzweige- und Begrenze- Suche [101] werden zusätzlich Schätzwerte für die Bewertung der verbleibenden Restentfernung zum Zielpunkt eingesetzt. Der Algorithmus entscheidet zwischen mehreren Routen durch Auswerten einer Gewichtsfunktion, die folgendermaßen dargestellt werden kann:

$$f^*(n) = \sum_{i=1}^n g_i + h^*(n) \quad (6.1)$$

mit:

$n$  als der Anzahl der Kantenelemente in der Route,

$f^*(n)$  als geschätzte Bewertungszahl der Route vom Startpunkt bis zum Erreichen des Zielpunktes.

$g_i$  beschreibt die Bewertung, die nach Gleichung 5.18 für das  $i$ -te Routenelement berechnet worden ist.

$h^*(n)$  beinhaltet eine Schätzung der Bewertung vom Routenelement  $n+1$  bis zum Zielpunkt.

In [48] wird als wichtigstes Kriterium für eine effiziente Arbeitsweise des  $A^*$ -Algorithmus die Berechnung des Summanden  $h^*(n)$  angegeben. Nur wenn dieser Faktor eine Unterschätzung der tatsächlichen Restkosten  $h(n)$  bis zum Erreichen des Ziels ist, liefert der  $A^*$ -Algorithmus ein optimales Ergebnis in einer minimalen Anzahl von Rechenschritten. Es muß also gelten:

$$h^*(n) < h(n) \quad (6.2)$$

Die Verbindung vom Punkt  $n$  zum Ziel, die die günstigste Bewertung aufweisen würde, wäre ein geradliniges, gut ausgebautes Straßensegment der höchsten Ordnung. Als Abschätzung über den Wert von  $h^*(n)$  wird daher der euklidische Abstand  $d_n$  des Knotenpunktes  $n$  im Teilpfad zum Zielelement im kartesischen Koordinatensystem der Umweltkarte berechnet. Als geschätzter Wert für  $h^*(n)$  ergibt sich unter Berücksichtigung der Bewertungsfunktion 5.18:

$$h^*(n) = \left( p \cdot d_n + (1 - p) \cdot \frac{d_n}{v_{max}^*} \right) \quad (6.3)$$

Die Geschwindigkeit bezeichnet dabei die geschätzte maximale Geschwindigkeit auf dem restlichen Streckenabschnitt. Als oberer Grenzwert kann dazu die für Autobahnen (höchste Straßenkategorie) zu erwartende Geschwindigkeit  $v_{85}$  verwendet werden. Diese wird in der RAS [75] in Abhängigkeit von der für Autobahnen festgelegten maximalen Entwurfsgeschwindigkeit  $v_{emax} = 120\text{km/h}$  mit:

$$v_{85} = v_{emax} + 20\text{km/h} = 140\text{km/h}$$

angegeben. Damit ergibt sich  $v_{max}^*$  zu:

$$v_{max}^* = 140\text{km/h}.$$

Eine detaillierte Beschreibung des Planungsalgorithmus wird in [33] gegeben.

Bei der Vorgabe einer gewünschten Startzeit erfolgt die Routenplanung vom Startpunkt aus. Für jeden Zwischenschritt der Planung wird ausgehend von der Startzeit die Ankunftszeit an den einzelnen Streckenabschnitten abgeschätzt und die zeitvariante mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  aus der Wissensbasis ausgelesen. Mit den vorgegebenen Optimierungskriterien wird der entsprechende Bewertungsfaktor gemäß (5.18) berechnet und in die Adjazenzmatrix eingetragen.

Bei der Vorgabe eines oder mehrerer Zwischenziele wird der Planungsalgorithmus mehrmals aufgerufen und die berechneten Teilrouten werden sequentiell aneinandergesetzt. Bei der Vorgabe einer gewünschten Ankunftszeit am Zielort muß die Planung vom Zielpunkt aus zum Startpunkt hin erfolgen, damit an den zeitvarianten Streckenabschnitten jeweils die Ankunftszeit abgeschätzt werden kann. Nach der vollständigen Berechnung der günstigsten Route werden zusätzliche Informationen eingetragen, die der Zentralen Entscheidungsinstanz als Bewertungsgrundlage dienen sollen, um mehrere aufgrund unterschiedlicher Optimierungskriterien berechneter Routen zu beurteilen und die am besten geeignete auszuwählen. Als direktes Ergebnis der Routenplanung liegen dabei die Streckenlänge, die Abfahrtszeit und Ankunftszeiten an den Zielpunkten vor. Führt die Route über stark hügeliges Gelände mit starken Steigungen, so kann dies bei ungünstigen Streckenverhältnissen die erfolgreiche Durchführung der Mission gefährden. Die Höhe über Normal Null (NN) der einzelnen Streckenabschnitte ist im Umweltmodell gespeichert und kann somit direkt der Karte entnommen werden. Der Wert für den am höchsten gelegenen Streckenabschnitt wird eingetragen.

## 6.2.2 Planung abseits befestigter Wege

Die Planung abseits befestigter Wege kann prinzipiell von zwei Anfangsbedingungen aus erfolgen:

1. Das Fahrzeug befindet sich auf dem Straßennetz und soll die Transition in unbefestigtes Gelände vollziehen. Dazu wird vom Bediener der Transitionspunkt spezifiziert. Von diesem Transitionspunkt aus erfolgt die weitere Planung.
2. Das Fahrzeug befindet sich bereits am Anfang der Mission im freien Gelände. Der durch die Positionsinitialisierung bestimmte Positionswert ist der Ausgangspunkt für die weitere Planung.

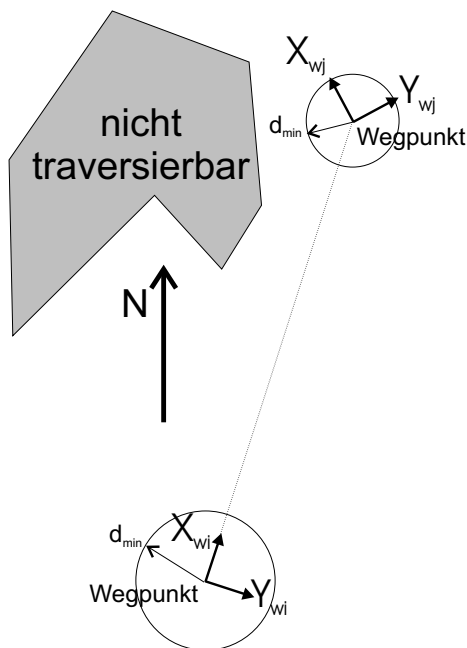


Abb. 6.1: Planung im Gelände

Vom Ausgangspunkt erfolgt nun die Planung zu beliebig vielen, vom Bediener spezifizierten Wegpunkten. Dabei hat der Bediener bei der Auswahl der Wegpunkte Sorge zu tragen, daß die nicht traversierbaren Bereiche, die im Umweltmodell gespeichert sind, vermieden werden. Als Endpunkt kann zum einen ein letzter Wegpunkt spezifiziert werden, dann endet die Mission an diesem Punkt. Oder es wird die Transition zurück in das Straßennetz gewünscht, dann kann eine weitere Planung im Wegenetz erfolgen. Der Wechsel zwischen den Domänen kann in einem Planungsschritt mehrmals erfolgen.

Für jeden Wegpunkt wird ein Knoten in die Szenenrepräsentation der *DOB* eingefügt. Das Koordinatensystem wird so ausgerichtet, daß die x-Achse in Richtung des nächsten Wegpunkts zeigt. Damit wird der Fahrzeugführung zusätzliche Information für die Berechnung der Fahrzeugtrajektorie zwischen den einzelnen Wegpunkten zur Verfügung gestellt. Für jeden Wegpunkt wird ein "Fangbereich"  $d_{min}$  spezifiziert. Beim Erreichen des Fangbereichs gilt die Aufgabe *Wegpunkt anfahren* als gelöst. Die Größe des Fangbereichs kann in Abhängigkeit von der lokalen Umgebung um den Wegpunkt dynamisch angepaßt werden.

### 6.3 Die Erstellung des Missionsplans

Nach der Routenplanung liegt somit für alle Planungsvorgaben ein Satz möglicher Verbindungsrouten vor. Die jeweils günstigste bildet die Ausgangslage für die Umsetzung in einen Missionsplan. Sie enthält die Informationen, in welcher Reihenfolge verschiedene Straßenelemente befahren werden müssen, um vom Startelement der Mission auf dem besten Weg zum Zielelement zu gelangen. Für die Ausführung der Mission erfolgt die Umsetzung dieser Informationen in eine sowohl für das System als auch für den Bediener verständliche Beschreibung, den Missionsplan. Der Missionsplan selbst besteht aus einer Folge von Teilaufträgen, deren Anordnung in der Liste den geplanten zeitlichen Ablauf der Mission widerspiegelt. Diese Teilaufträge, Missionsplanelemente genannt, müssen dazu alle Parameter, die von den ausführenden Instanzen benötigt werden, enthalten. Der Datengehalt der Missionsplanelemente umfaßt statische und dynamische Parameter. Die statischen Parameter können vorab aus den Wissensbasen extrahiert und zur Verfügung gestellt werden. Dynamische Parameter werden zur Laufzeit vom Modul Missionsüberwachung zyklisch berechnet und im Missionsplanelement abgelegt. Durch die Missionsüberwachung werden Hypothesen über erwartete Objekte, z. B. Landmarken und Straßen, instanziiert und mit dem Hintergrundwissen aus den Wissensbasen initialisiert. Nach der Bestätigung der Hypothese durch einen Wahrnehmungsexperten wird ein Objekt, das für eine geplante Aktion (z. B. einen Abbiegevorgang auf eine Querstraße) vorgesehen ist, über das Missionsplanelement referenziert. Damit steht dem Experten für die Fortbewegung ein Bezugsobjekt für die geplante Fortbewegungsaufgabe zur Verfügung. Das Objekt enthält dann alle relevanten Informationen für die Planung der Aktion.

Die Gültigkeit einzelner Missionsplanelemente erstreckt sich dabei auf die Bereiche der umzusetzenden Route, in denen die angegebenen Parameter und die erforderlichen Verhaltensweisen konstant bleiben.



Die Befehlssyntax für den Missionsplan wurde bewußt so gewählt, daß sie der menschlichen Beschreibungsformen einer Routenplanung ähnlich ist. Dadurch wird erreicht, daß eine Beurteilung des generierten Missionsplans auch durch den Benutzer leicht möglich ist. Das heißt, daß neben quantativen Aussagen, wie absolute Fahrzeugbewegungen, auch qualitative Richtungs- und Längenangaben gemacht werden. Alle Missionsplanelemente sind nach der folgenden Struktur aufgebaut:

Tabelle 6.1: Struktur des Missionsplanelementes

|                        |             |   |                 |
|------------------------|-------------|---|-----------------|
| Zeile i:               | Fahrauftrag | Referenz auf Karte<br>[Richtung]<br>[Parameter] | Parameter       |
| Zeile i+1 bis Zeile n: | Steuerwort  | Transitionskriterium<br>[Makro]<br>[Parameter]  | Sprunganweisung |

Die in eckigen Klammern angegebenen Werte bedeuten, daß sie optional angegeben werden können. Für verschiedene Fahraufträge ist ein unterschiedlicher Satz von Werten nötig. Das Steuerwort *Fahrauftrag* beschreibt die auszuführende Aufgabe und verwendet dabei die angegebenen *Parameter*. Die definierten Fahraufträge sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2: Fahrauftrag

|             |                |                       |
|-------------|----------------|-----------------------|
| Fahrauftrag | FOLLOW_ROAD    | Straße entlangfahren  |
|             | FOLLOW_CONTOUR | Kontur entlangfahren  |
|             | INTERSECTION   | An Kreuzung abbiegen  |
|             | ENTER_ROAD     | Auf Straße auffahren  |
|             | LEAVE_ROAD     | Straße verlassen      |
|             | ENTRANCE       | Einfahren an Einfahrt |
|             | EXIT           | Ausfahren an Ausfahrt |
|             | HALT           | Stehen                |
|             | WAYPOINT       | Wegpunkt anfahren     |
|             | LANDMARK       | Landmarke anfahren    |

Für verschiedene Aktionen wird eine Richtungsinformation benötigt, z. B. in welcher Richtung der Abzweig zu erwarten ist und welcher Bereich neben der

Fahrbahn auf eine Querstraße zu untersuchen ist. Die definierten Richtungen zeigt Tabelle 6.3. Als Parameter sind Fahrzeugzustände und deren Änderun-

Tabelle 6.3: Richtungsanweisung

|                    |          |           |
|--------------------|----------|-----------|
| Richtungsanweisung | LEFT     | Links     |
|                    | RIGHT    | Rechts    |
|                    | STRAIGHT | Geradeaus |

gen, aber auch absolute Größen, vorgesehen. Durch die Parameter werden auch die Transitionskriterien zum nächsten Missionsplanemelement spezifiziert. Als

Tabelle 6.4: Parameter

|           |               |                                      |
|-----------|---------------|--------------------------------------|
| Parameter | Vel[v]        | Sollgeschwindigkeit in $[km/h]$      |
|           | Len[len]      | Zurückgelegte Wegstrecke in [m]      |
|           | Dist[dist]    | Abstand zu einem Bezugsobjekt in [m] |
|           | Time[time]    | Absolute Systemzeit                  |
|           | Duration[dur] | Dauer des Missionselements in [sec]  |

Steueranweisungen (Tabelle 6.5) für die Transitionskriterien sind folgende Ausdrücke definiert. Bei Erfüllung des Transitionskriteriums wird die angegebene Sprunganweisung ausgeführt. Ein Kriterium kann durch das erfolgreiche Aus-

Tabelle 6.5: Steueranweisungen

|           |       |                                     |
|-----------|-------|-------------------------------------|
| Anweisung | UNTIL | Bis zum Erreichen des Kriteriums    |
|           | WHILE | Solange Kriterium erfüllt           |
|           | IF    | Test, ob Bedingung erfüllt          |
|           | THEN  | Verzweigung, wenn Bedingung erfüllt |

führen bestimmter Fähigkeiten oder durch das Erreichen eines Zustands erfüllt sein. Für die Aktivierung der Wahrnehmungsfähigkeiten sind die in Tabelle 6.6, Zeile 1 und 2, gezeigten Kriterien definiert. Das Erreichen eines Zustands wird durch das Steuerwort DONE spezifiziert.

Als Bezugsobjekte für die Wahrnehmungsfähigkeiten können alle Elemente der Wissensbasen "Straßen" und "Landmarken" spezifiziert werden. Der Plan enthält eine Referenz auf den jeweiligen Eintrag in der Wissensbasis.

Tabelle 6.6: Transitionskriterien

|           |               |                                    |
|-----------|---------------|------------------------------------|
| Kriterien | DETECT Object | Suchen und Entdecken eines Objekts |
|           | TRACK Object  | Verfolgen eines Objekts im Bild    |
|           | DONE State    | Relativzustand erreicht            |

Tabelle 6.7: Objekte

|         |          |  |
|---------|----------|--|
| Objekte | Road     | Referenz auf Wissensbasis "Straßen"    |
|         | Landmark | Referenz auf Wissensbasis "Landmarken" |

Sprunganweisungen dienen dazu, um nach korrekter Abarbeitung eines Missionsplanelementes einen verzweigten Sprung zum nächsten oder einem alternativen Missionsplanelement durchführen zu können oder ein definiertes Ende zu erreichen.

Der Missionsplan enthält damit alle Informationen, die notwendig sind, um eine

Tabelle 6.8: Sprunganweisungen

|             |         |                             |
|-------------|---------|-----------------------------|
| Anweisungen | NEXT    | Sprung zum nächsten Element |
|             | STEP[n] | Sprung zum Element n        |

bestimmte Mission innerhalb eines in der Wissensbasis enthaltenen Wegenetzes durchzuführen. Zusätzlich werden die durch die Routenplanung ermittelten Bewertungsfaktoren für die Streckenführung direkt aus der Route übernommen, um *Central Decision* eine direkte Vergleichsmöglichkeit mehrerer alternativer Missionspläne zu ermöglichen. Nach der Freigabe eines Missionsplans durch *Central Decision* kann die Ausführung des Plans erfolgen



## 7 Missionsdurchführung

Das Modul *Missionsüberwachung* erfüllt im EMS-System die Aufgabe der globalen Bahnführung. Als Eingangsgröße erhält es den von *Central Decision* oder dem Bediener ausgewählten Missionsplan. Die für einen bestimmten Zeithorizont relevanten Missionsplanelemente werden in der zentralen dynamischen Wissensbasis (siehe Abschnitt 3.2.1) abgelegt. *Central Decision* aktiviert auf Basis der im aktuellen Missionsplanelement enthaltenen Informationen und unter Berücksichtigung der aktuellen Situation die zur Ausführung nötigen Prozesse. Hypothesen über erwartete Objekte werden durch die *Missionsüberwachung* in der *DOB* instanziiert und mit Hintergrundwissen initialisiert. Die *Missionsüberwachung* kontrolliert die ausgeführten Fahrzeugbewegungen anhand der vom Modul *IbSE* gelieferten Schätzgrößen für den Eigenzustand und stellt durch einen Vergleich mit den geplanten Werten im Missionsplan und dem Wissenshintergrund der Wissensbasis “Straßen” den Missionsfortschritt fest. Der Missionsfortschritt wird simultan in multiplen Skalen in Raum und Zeit repräsentiert. Durch eine Adaption der Skalen können kleinere Abweichungen vom Plan kompensiert und der Erfolg der Mission sichergestellt werden. Reicht dieser Spielraum nicht aus, kann eine dynamische Neuplanung der verbleibenden Mission erfolgen.

Durch die fortlaufende Orientierung an Landmarken wird der Schätzwert für die Eigenposition im globalen Koordinatensystem der Welt verbessert und dadurch eine genaue Bestimmung des örtlichen Missionsfortschritts ermöglicht. Während der Mission werden die Schätzgrößen über wahrgenommene Objekte und über die eigenen Aktionen fortlaufend mitprotokolliert. Am Ende einer Mission erfolgt eine Analyse dieser Daten. Der Datengehalt der statischen Hintergrundwissensbasen kann durch die Auswertung der eigenen “Erfahrungswerte” aktualisiert und weiter verbessert werden. Dadurch steht für zukünftige Aufgaben verbessertes Hintergrundwissen zur Verfügung.

### 7.1 Zeitliche Repräsentation des Missionsfortschritts

Im Modul *Missionsüberwachung* werden zur zeitlichen Repräsentation des Missionsfortschritts zwei verschiedene Zeithorizonte verwendet. Auf der oberen Ebene ist die geschätzte Gesamtdauer  $T_{Mp}$  der Mission, die als ein Ergebnis der

Routenplanung vorliegt, angesiedelt. Auf der unteren Ebene liegt die zeitliche Repräsentation der einzelnen im Missionsplan enthaltenen Missionsplanelemente vor. Die Gesamtdauer  $T_{Mp}$  der Mission entspricht dabei der Summe der Werte  $T_{MpEi}$  der einzelnen Missionsplanelemente. Für einen Missionsplan, der  $n$  Elemente umfaßt, ergibt sich  $T_{Mp}$  zu:

$$T_{Mp} = \sum_{i=1}^n T_{MpEi} \quad (7.1)$$

Die erwartete Dauer  $T_{MpE}$  eines Missionsplanelementes wurde durch die Missionsplanung für alle Streckenabschnitte als Quotient der zurückzulegenden Strecke und der erwarteten mittleren Geschwindigkeit berechnet:

$$T_{MpEi} = \frac{l_i}{v_{mi}} \quad (7.2)$$

Der Wert für  $v_m$  gibt dabei die Sollgeschwindigkeit an, die an die Fahrzeugführung weitergegeben wird und die das Fahrzeug einhalten muß, um im Zeitplan zu bleiben. Diese Sollgeschwindigkeit kann allerdings nicht immer eingehalten werden, da durch unvorhergesehene Ereignisse, wie z. B. eine Verkehrsstockung aufgrund eines Unfalles, die Fahrt stark verzögert werden kann. Gerade wenn eine der Vorgaben für die Mission eine bestimmte Ankunftszeit am Ziel ist, wäre es ungünstig, sich voll auf die durch die Missionsplanung vorhergesagte Dauer, die unter der Annahme optimaler Bedingungen berechnet wurde, zu verlassen. Vielmehr sollten unerwartete Abweichungen von vornherein mit einkalkuliert und in Form einer Zeitreserve berücksichtigt werden. Die Mission sollte also etwas früher gestartet werden, um auch bei einem ungünstigen Missionsverlauf das Ziel rechtzeitig zu erreichen. Da vorab kein zusätzliches Wissen über die Unfallhäufigkeit auf den einzelnen Streckenabschnitten und damit über die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Zwischenfalls vorliegt, wird die Zeitreserve prozentual gleich auf alle Missionsplanelemente verteilt. Die Höhe der Zeitreserve wurde zunächst empirisch auf 20% festgelegt. Nach mehreren durchgeführten Missionen, wenn zusätzliches Wissen über bestimmte Streckenabschnitte zur Verfügung steht, kann dieser Wert adaptiert werden (siehe Abschnitt 7.5). Durch diese Vorgehensweise erhöht sich die erwartete Gesamtdauer der Mission; um einen positiven Nutzen aus dieser Zeitreserve ziehen zu können, müssen die geplanten Sollgeschwindigkeiten in den einzelnen Missionsplanelementen (ohne Zeitreserve) beibehalten werden.

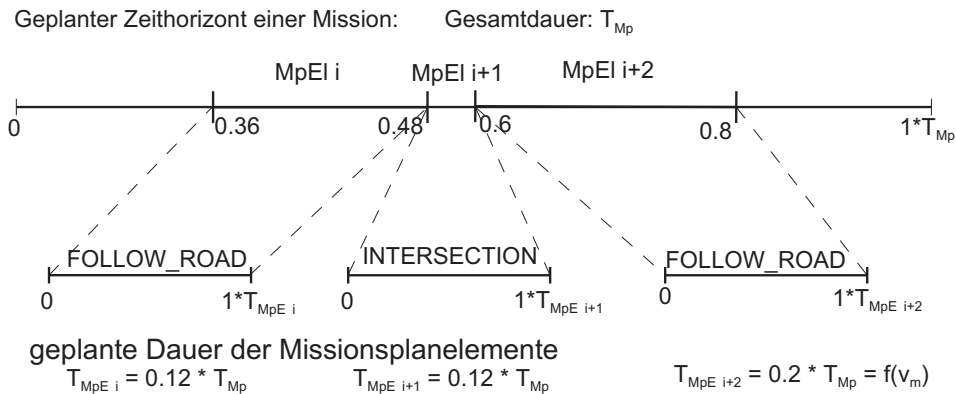


Abb. 7.1: Zeitliche Repräsentation der Mission

Während einer Mission arbeitet die Missionsüberwachung auf beiden zeitlichen Repräsentationsebenen nicht mit absoluten Zeitwerten (z. B.: seit Missionsbeginn sind 600 Sekunden vergangen), sondern mit auf die jeweils geschätzte Gesamtdauer normierten Werten. Durch diese im Bereich der Bahnoptimierung übliche Normierung ergibt sich der erreichte zeitliche Zustand innerhalb der Mission (Ebene 1) oder eines Missionselementes (Ebene 2) dann automatisch als prozentualer Anteil der geplanten Gesamtdauer (z. B.: es sind 30% der Zeit vergangen). Abbildung 7.1 zeigt die Aufteilung der gesamten Missionsdauer in die einzelnen Missionselemente. Im mittleren Bereich der Mission ist eine Folge von 3 Missionselementen detailliert dargestellt.

## 7.2 Örtliche Repräsentation des Missionsfortschritts

Analog zur zeitlichen Repräsentation des Missionsfortschritts läuft die räumliche Repräsentation der Mission innerhalb der Missionsüberwachung auf zwei Ebenen ab. Auf der oberen Ebene wird der Missionsfortschritt bezüglich der gesamten Wegstrecke bestimmt. Die gesamte Wegstrecke  $D_M$ , die während der Mission zurückgelegt werden muß, wird dabei wiederum aus der Summe der Wegstrecken der einzelnen Missionselemente gebildet. Diese Wegstrecken sind auf der unteren Ebene angesiedelt. Bei festgestellten Abweichungen der gemessenen Distanzen zu den geplanten Werten wird automatisch der Wert für  $D_M$  entsprechend angepaßt. Während der Durchführung einer autonomen Mission wird im Modul Missionsüberwachung das aktuelle Missionselement aus dem Missionsplan geladen und an die zentrale Wissensbasis übermittelt. *Central Decision* aktiviert dann in Abhängigkeit von der analysierten Situation

die zuständigen spezialisierten Verarbeitungsmodule mit entsprechenden Aufträgen. Für die Fahrzeugführung übernimmt die Missionsüberwachung selbst die Überwachung der korrekten Ausführung der einzelnen Fahraufträge. Dieser ständige Abgleich zwischen den geplanten Verhaltensweisen und den durchgeführten Aktionen ist nötig, um den Übergang in ein neues Missionsplanelement zu erkennen und dieses in der zentralen Wissensbasis zur Verfügung zu stellen. Die Kenntnis der eigenen Position ist für die Bestimmung des Missionsfortschritts von entscheidender Bedeutung; daher ist eine der wichtigsten Aufgaben der Missionsüberwachung die Schätzung der eigenen Position. Um bestimmte Verhaltensfähigkeiten sicher vor dem Erreichen der entsprechenden Straßensegmente aktivieren zu können, muß auch abgeschätzt werden, wie groß der Fehlerbereich der Positionsschätzung ist. Entscheidend ist dabei, daß die Missionsüberwachung keine Positionsangaben im kartesischen Koordinatensystem der Straße betrachtet, sondern eine relative Positionsangabe zum Ende des Missionsplanelementes. Diese Distanz wird auch der Verhaltensentscheidung übermittelt. Zu bestimmten Zeitpunkten, während der Positionsinitialisierung oder nach der Positionsbestimmung an Landmarken, stehen Schätzwerte für die absolute Fahrzeugposition zur Verfügung. Diese werden in eine Position relativ zum Straßennetzwerk umgerechnet (siehe Abschnitt 7.4). Der Abstand zum nächsten Missionsplanelement wird durch Addition der Länge der Segmente zwischen der aktuellen Position und dem Straßensegment, an dem der Übergang zum nächsten Missionsplanelement erfolgt, bestimmt. Aus dem Schätzwert für den Abstand läßt sich dann direkt der örtliche Missionsfortschritt im Missionsplanelement bestimmen.

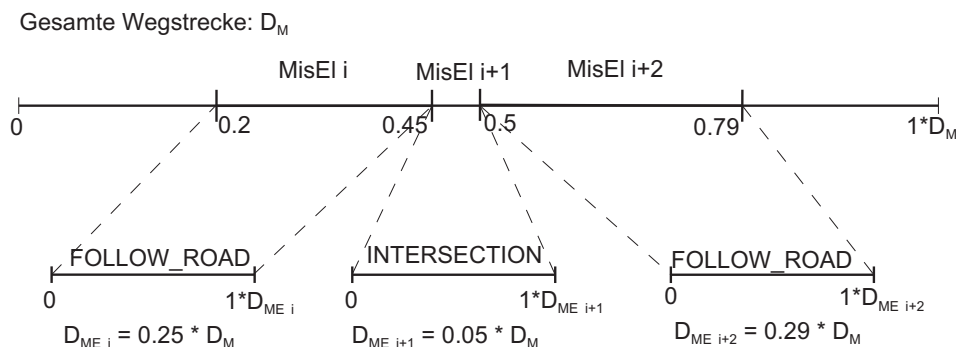


Abb. 7.2: Örtliche Repräsentation der Mission

Zur Schätzung des Fahrzeugzustandes während der Fahrt wird im EMS-Konzept das Modul *IbSE* [99], [89] verwendet. Darin werden die Signale von Odometrie, Inertialsensorik und GPS mit einem Erweiterten Kalman-Filter verarbei-



tet. Durch die kombinierte Verarbeitung der Daten mehrerer Sensoren können kurzzeitige Ausfälle einer Quelle, wie es z. B. bei einer Abschattung des GPS Signals beim Durchfahren enger Häuserschluchten auftreten kann, überbrückt werden. Außerdem werden die unterschiedlichen Eigenschaften der verwendeten Meßsysteme zur Verkleinerung des Positionsschätzfehlers genutzt. Die mit unterschiedlichen Meßsystemen ermittelte Position liegt dabei jeweils im zugehörigen Fehlerbereich um die tatsächliche Position. Dieser Fehlerbereich ist bei der Auswertung des GPS-C/A Codes mit SA zwar groß, aber zeitlich und örtlich konstant, während er bei den Messungen der Koppelnavigation zunächst klein ist, dann aber mit der zurückgelegten Strecke stetig anwächst. Die gleichzeitige Auswertung aller Meßsignale kombiniert die positiven Eigenschaften beider Verfahren und kann somit das Anwachsen des Fehlerbereichs minimieren. Durch eine Positionsbestimmung relativ zu Landmarken können die Schätzfehler bei der Eigenposition und beim Fehlerbereich auf den dabei entstehenden minimalen Fehlerbereich reduziert werden.

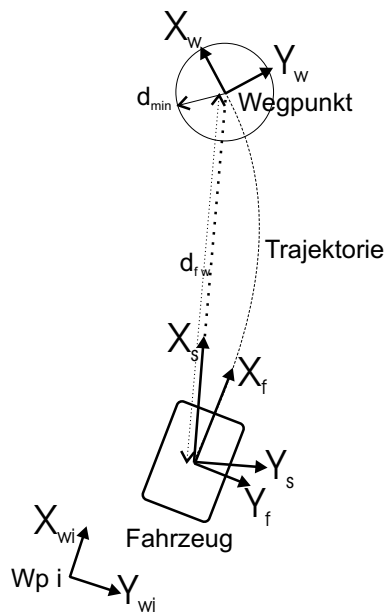


Abb. 7.3: Annäherung an einen Wegpunkt

Beim Fahren im freien Gelände ist der Fahrauftrag das Erreichen des im Missionsplanelement WAYPOINT als Referenzobjekt spezifizierten Wegpunkts. Der Parameter  $d_{min}$  gibt dabei an, "wie genau" dieses Ziel erreicht werden muß: erreicht das Fahrzeug den minimalen Abstand  $d_{min}$  zum Wegpunkt, so gilt das Ziel als erreicht. Die Trajektorie, auf der sich das Fahrzeug dem Wegpunkt annähert, wird dabei von BDL unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten, wie z. B. den wahrgenommenen Hindernissen, und den in den folgenden Missionsplanelementen spezifizierten Referenzobjekten geplant und abgefahren. Der Verlauf dieser Trajektorie steht also vorab zum Zeitpunkt der Missionsplanung

nicht zur Verfügung. Als Gesamtlänge  $D_{MEi}$ , die im Missionsplanelement  $i$  zurückzulegen ist, wird daher zunächst der euklidische Abstand zwischen zwei benachbarten Wegpunkten als kürzeste Verbindung veranschlagt. Als Abstand zum Ende des Missionsplanelementes ergibt sich:

$$D_{Mi} = d_{fw} - d_{min}$$

Mit diesem Wert werden der aktuelle Missionsfortschritt berechnet und die Da-

tenfelder im Missionsplanelement aktualisiert.

### 7.3 Abweichungen vom Plan

Treten während der Missionsdurchführung zeitliche Verzögerungen gegenüber dem geplanten Verlauf auf, so steigt der Zustand innerhalb des entsprechenden Missionsplanelementes auf einen Wert größer 1 an. Der Übergang in das nächste Missionsplanelement erfolgt mit einer entsprechenden zeitlichen Verzögerung, einer Zeitschuld. Um den Zeitplan wiederherzustellen, müßte die Dauer eines oder mehrerer der folgenden Missionsplanelemente um diese Zeitschuld erniedrigt werden. Die Dauer der einzelnen Missionsplanelemente hängt im wesentlichen von der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit ab, zumindest wenn ein Missionsplanelement mit einem Fahrauftrag vorliegt. Für die Bestimmung der geschätzten Dauer der einzelnen Missionsplanelemente wurde während der Missionsplanung ein Schätzwert für die mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  auf den jeweiligen Streckenabschnitten verwendet. Dieser wurde in Abhängigkeit von verschiedenen Grenzwerten bestimmt. Auf unbeschränkten Autobahnen wurde der dort vorgeschriebene Richtwert von  $130 [km/h]$  verwendet. Wurde vom Benutzer eine Maximalgeschwindigkeit vorgegeben, die über dieser Sollgeschwindigkeit liegt, so kann die geschätzte Fahrdauer durch Erhöhen der Sollgeschwindigkeit auf diesen Streckenabschnitten erniedrigt und die Zeitschuld wieder ausgeglichen werden. In Abbildung 7.4 ist die neue Situation gegenüber der zeitlichen Repräsentation in Abbildung 7.1, dargestellt. Für das Ausführen des Missionsplanelementes  $(i+1)$  wurde statt der geplanten Dauer von  $T_{MpEi+1} = 0.12 \cdot T_{Mp}$  die Dauer  $T'_{MpEi+1} = 0.17 \cdot T_{Mp}$  gemessen. Der Übergang in das Missionsplanelement  $(i+2)$  erfolgt also mit einer Zeitschuld von  $T_s = T'_{MpEi+1} - T_{MpEi+1} = 0.05 \cdot T_{Mp}$ .

Um diese Zeitschuld vollständig im Missionsplanelement  $(i+2)$  auszugleichen, wäre es nötig, den entsprechenden Streckenabschnitt im verbleibenden Zeitraum von:

$$T_{MpEi+2}^* = T_{MpEi+2} - T_s = 0.15 \cdot T_{Mp} \quad (7.3)$$

zurückzulegen. Mit der aus dem Missionsplan bekannten Länge des zugehörigen Streckenabschnitts  $l_{i+2}$  ergibt sich die im Missionsplanelement erforderliche Sollgeschwindigkeit zu:

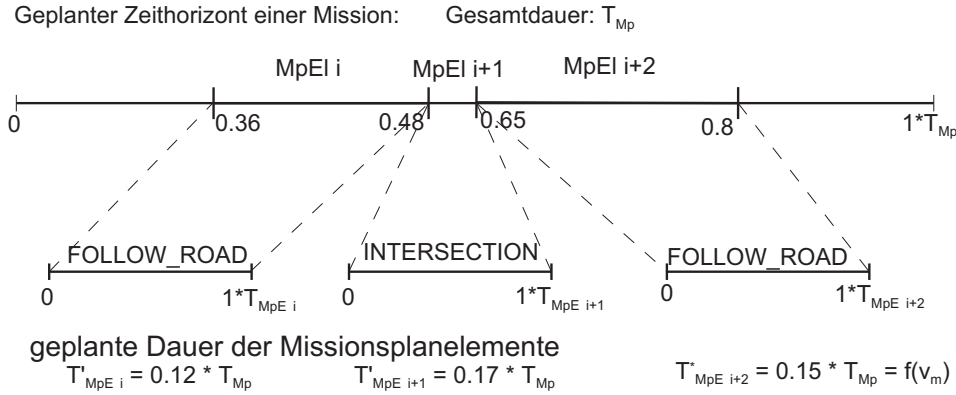


Abb. 7.4: Zeitliche Abweichung vom Missionsplan

$$v'_{soll} = \frac{l_{i+2}}{T'_{MpEI i+2}} \quad (7.4)$$

Liegt dieser Wert unterhalb der von *Central Decision* vorgegebenen Maximalgeschwindigkeit und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf diesem Streckenabschnitt, so wird diese Sollgeschwindigkeit in das Missionsplanelement eingetragen, andernfalls die vorgegebene Höchstgeschwindigkeit. Mit der eingestellten Sollgeschwindigkeit ergibt sich die geschätzte Dauer des Missionsplanelementes zu:

$$T^*_{MpEI i+2} = \frac{l_{i+2}}{v_{soll}} \quad (7.5)$$

Am Ende des Missionsplanelementes ergibt sich die Zeitschuld im Missionsplanelement als Differenz zwischen der gemessenen Dauer  $T'_{MpEI}$  und der geplanten Dauer  $T^*_{MpEI}$ :

$$T'_s = T^*_{MpEI} - T'_{MpEI}$$

Für die gesamte Mission ergibt sich ein neuer Wert für die Zeitschuld von:

$$T_{sneu} = T'_s - T_{si} \quad (7.6)$$

Bleibt eine positive Zeitschuld erhalten, so wird versucht, diese in den restlichen Missionsplanelementen bis zum Zielpunkt abzubauen. Der Wert für die erwartete Gesamtdauer der Mission muß erst dann angepaßt werden, wenn eine Erhöhung der Sollgeschwindigkeit über den während der Planung verwendeten Wert für  $v_m$  auf den verbleibenden Streckenabschnitten nicht mehr möglich

ist, also wenn z. B. nur noch Streckenabschnitte mit vorgegebener Maximalgeschwindigkeit vorliegen.

Entscheidend für die sichere Durchführung einer Mission ist auch das Feststellen von räumlichen Abweichungen vom geplanten Missionsverlauf. Die kritischen Stellen sind hier diejenigen Missionsplanelemente, in denen ein Wechsel der Verhaltensfähigkeit und/oder der Beobachtungsstrategie für den Fahrbahnrand erforderlich ist, wie der Übergang vom Missionsplanelement FOLLOW\_ROAD auf das Element INTERSECTION. Die erfolgreiche Ausführung der Verhaltensfähigkeit ist dabei von einer Vielzahl von Bedingungen abhängig, so daß ein absoluter Erfolg nicht immer sichergestellt werden kann. Eine offensichtlich mißlungene Ausführung eines Abbiegemanövers wird der Missionsüberwachung von *Central Decision* selbst mitgeteilt. Oft kann jedoch nur mit dem Wissenshintergrund der "Straßen" festgestellt werden, daß sich Abweichungen zwischen dem geplanten und dem ausgeführten Manöver ergeben haben, z. B. wenn ein Abbiegemanöver zwar erfolgreich, aber in die falsche Querstraße durchgeführt wurde. Ist das der Fall, so unterscheidet sich die Streckenführung nach dem Abzweig meist deutlich vom geplanten Verlauf. Daher wird versucht, unmittelbar nach dem Abbiegen anhand einer Landmarke, wenn möglich der Klasse 1, zu verifizieren, daß der richtige Abzweig vorlag und sich das Fahrzeug noch auf der geplanten Route befindet.

Werden Abweichungen zwischen der geplanten Route und den tatsächlich erfolgten Fahrzeugbewegungen festgestellt, ist eine Anpassung des Missionsplans an die neu entstandene Situation erforderlich. Da in der Regel die aktuelle Verkehrssituation ein Anhalten nicht zuläßt, muß dies dynamisch während der Fahrt erfolgen. Der Missionsplanung stehen für die Neuplanung als Vorwissen noch die gespeicherten Routen aus der Planungsphase am Missionsstart zur Verfügung. Im ersten Schritt der dynamischen Missionsplanung werden deshalb zunächst diese Routen darauf überprüft, ob sie das aktuell befahrene Straßen-segment in der richtigen Orientierung enthalten. Trifft dies zu, so kann der Teil der betreffenden Route vom aktuellen Straßenelement bis zum Ziel direkt verwendet werden. Dieser Teil der Route wird direkt in einen gültigen Missionsplan umgesetzt und an die Missionsüberwachung weitergereicht. Enthält keine der gespeicherten Routen das aktuelle Straßensegment, so muß eine erneute Routenplanung gemäß Abschnitt 6.2.1 mit den Parametern der aktuellen Situation durchgeführt werden.

Abweichungen vom Zeitplan haben andere Konsequenzen als das Verlassen der

geplanten Route. Zwar ist das Erreichen des Ziels nach wie vor durch die Ausführung des vorliegenden Missionsplans gesichert, jedoch könnte unter den neuen zeitlichen Rahmenbedingungen eine andere Route die günstigere Verbindung zum Ziel darstellen. Im ersten Schritt wird daher überprüft, ob sich durch eine Anpassung der Sollgeschwindigkeit auf den verbleibenden Missionsplanelementen (ohne Geschwindigkeitsbegrenzung) der zeitliche Rückstand aufholen läßt. Ist dies möglich, so müssen lediglich die entsprechenden Werte im Missionsplan aktualisiert werden. Ist es rein rechnerisch nicht mehr möglich, den zeitlichen Rückstand auszugleichen, erfolgt eine Meldung an die Zentrale Entscheidungsinstanz. Diese kann dann parallel zur Ausführung des aktuellen Missionsplans eine erneute Missionsplanung mit den neuen Rahmenbedingungen initiieren. Liefert die neue Planung eine andere, günstigere Streckenführung, so kann *Central Decision* diesen neuen Missionsplan direkt übernehmen oder den aktuellen beibehalten.

## 7.4 Positionsbestimmung an Landmarken

Während der Missionsdurchführung wird von der *Missionsüberwachung* fortlaufend der zeitliche und örtliche Missionsfortschritt bestimmt. Weist das aktuelle Missionsplanelement eine Referenz auf eine Landmarke auf, so wird zur Verbesserung der Positionsschätzung und zur Kompensation von Drifteffekten eine Ortung an dieser Landmarke durchgeführt. Dabei werden, siehe auch Abschnitt 5.1.4, drei verschiedene Klassen von Landmarken verwendet. Als Landmarken der Klasse 1 werden signifikante Straßensegmente bezeichnet, z. B. eine Kurve, die zwischen zwei Geraden liegt. Vor der Positionsinitialisierung gemäß Abschnitt 6.1 steht allein die vom Modul *IbSE* auf Basis der GPS-Messung geschätzte Fahrzeugposition im globalen Koordinatensystem zur Verfügung. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% liegt ein Meßwert innerhalb eines Kreises mit dem Radius  $r = 3 \cdot \sigma_{GPS}$  um den tatsächlichen Positionswert. Zur Positionsinitialisierung wird von der initialen Fahrzeugposition das Lot auf den Straßenzug gefällt. Mit der Verifikation, daß sich das Fahrzeug auf der Straße befindet, reduziert sich die Positionsunsicherheit auf den Fehler in Längsrichtung der Straße. Zur Abschätzung des maximalen Fehlers wird der ursprüngliche Fehlerbereich auf die Straße projiziert. Im Falle des kreisförmigen Fehlerbereichs bleibt damit in Längsrichtung die Standardabweichung der GPS-Messung erhalten.

$$\sigma_{lon} = \sigma_{GPS}$$

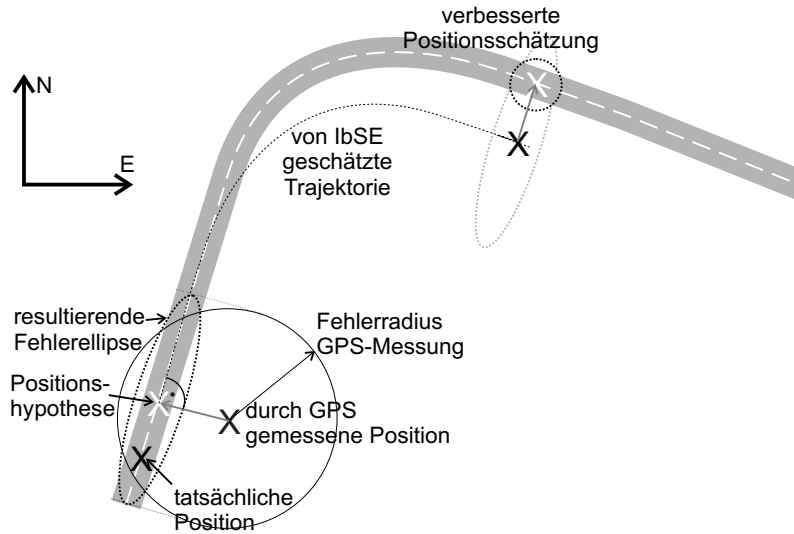


Abb. 7.5: Positionsbestimmung an Landmarken: Klasse 1

Durchfährt das Fahrzeug anschließend eine Kurve, so kommt es aufgrund des initialen Positionsfehlers erstmals zu signifikanten Abweichungen zwischen dem Straßenverlauf und der von *IbSE* geschätzten Fahrzeugtrajektorie (siehe Abbildung 7.5 Mitte). Wird nach der Kurve eine erneute Positionsbestimmung durchgeführt, so kann eine deutliche Reduktion des Fehlerbereichs erreicht werden.

Die Vorgehensweise für Landmarken der Klasse 2 und 3 ist identisch: das Fahrzeug nähert sich einem Streckenabschnitt, von dem aus eine Landmarke sichtbar ist. Sobald die geschätzte Distanz zu diesem Streckenabschnitt kleiner ist als die aktuelle Positionsunsicherheit in Fahrzeuginnenrichtung, also  $d < 3 \cdot \sigma_x$ , wird eine Objekthypothese in der Szenenbeschreibung instanziiert und mit Hintergrundwissen aus der Wissensbasis initialisiert. Damit kann ausgeschlossen werden, daß die Landmarke aufgrund der Positionsunsicherheit bereits passiert wurde und sichergestellt werden, daß genügend Zeit für die Detektion bleibt. Nach der Aktivierung des zugehörigen Wahrnehmungsexperten durch *BDGA* versucht dieser, das gesuchte Objekt zu detektieren. Gelingt eine Detektion der Landmarke innerhalb des im Missionsplanelements spezifizierten Sichtbarkeitsbereichs nicht, so wird die Objekthypothese aus der Szenenbeschreibung gelöscht. Gelingt es, so ändert der Wahrnehmungsexperte den Erkennungszustand des Objekts von *ToBeDetected* nach *Detected* bzw. *Tracked* und geht zur zyklischen Objektverfolgung über (siehe Abschnitt 4.3.2). Dies ist das Signal für die *Missionsüberwachung*, daß eine Auswertung der Objektdaten erfolgen

kann.

In den folgenden Abschnitten wird das Verfahren für die unterschiedlichen Klassen von Landmarken beschrieben.

#### 7.4.1 Positionsbestimmung an Abzweigen

Die Knotenpunkte des Straßennetzwerks bilden die Landmarken der Klasse 2. Für ihre Erkennung ist eine gezielte Aktivierung eines Wahrnehmungsexperten erforderlich. Nach erfolgreicher Detektion einer Querstraße wird vom Wahrnehmungsexperten für “Straßen” zyklisch die Relativlage zur Querstraße bestimmt und in der *DOB* abgelegt.

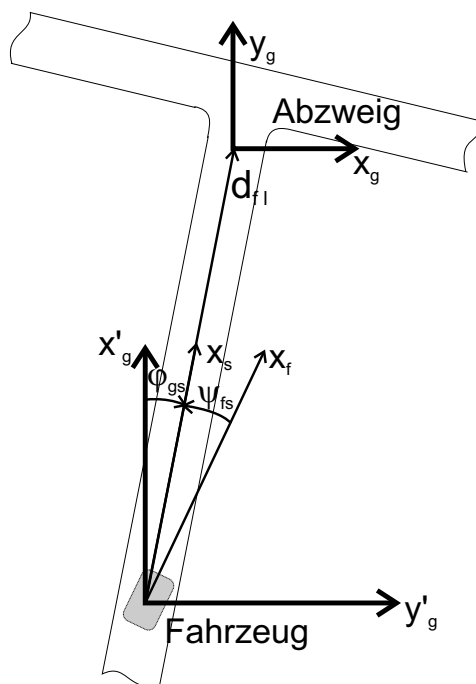


Abb. 7.6: Positionsbestimmung an einem Abzweig

Abbildung 7.6 zeigt die Situation: während sich das Fahrzeug dem Abzweig nähert, bestimmt der Wahrnehmungsexperte für “Straßen” zyklisch die Relativlage zwischen Eigenfahrzeug und Abzweig. Dabei entspricht die Distanz zur Kreuzung dem Abstand zum Ende des aktuellen Missionsplanelements, da mit dem Erreichen der Kreuzung auch die Fortbewegungsaufgabe wechselt, z. B. der Übergang in die Fähigkeiten “Turn-off” oder “Cross-over” (siehe auch [89]). Der geschätzte Abstand  $d_{f1}$  zum Abzweig kann also direkt für die Bestimmung des Missionsfortschritts verwendet werden.

Für die Bestimmung der Eigenposition im globalen Koordinatensystem wird zusätzlich die Auswertung der Hintergrundwissensbasis “Straßen” herangezogen. Ausgangsbasis ist wiederum die geschätzte Relativlage zum Abzweig. Die Position  $[\lambda, \phi]$  des Abzweigs (Index l) im globalen Koordinatensystem (Index g) ist gegeben, ebenso die Orientierung  $[\varphi_{gs}]$  des Straßensegments (Index s), auf dem sich das Eigenfahrzeug befindet. Der Einfachheit halber wurde in Abbildung 7.6 der Ursprung des globalen Koordinatensystems in den Ursprung

des Landmarkenkoordinatensystems verschoben (Index g). Das Fahrzeug nähert sich auf der Straße dem Abzweig. Vom Wahrnehmungsexperten für "Straßen" werden zyklisch die Relativlage zur Eigenstraße, zum Abzweig und die zugehörigen Varianzen zur Verfügung gestellt.

$d_{fl}$  und  $\psi_{fs}$  liegen als Schätzwerte vor,  $\varphi_{gs}$  ist aus der Karte bekannt.

Um die Position des Eigenfahrzeugs im globalen Koordinatensystem bestimmen zu können, muß bestimmt werden:

$$\varphi_{gl} = \varphi_{gs} - \psi_{fs}$$

Damit ergeben sich die Koordinaten des Eigenfahrzeugs im globalen Koordinatensystem zu:

$$\underline{g} := \begin{bmatrix} -x_{gl} \\ -y_{gl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{fl} \cdot \cos\varphi_{gl} \\ d_{fl} \cdot \sin\varphi_{gl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

#### 7.4.1.1 Bestimmung der Kovarianzmatrix

Im f-Koordinatensystem werden geschätzt:

$d_{fl}$  = Abstand zwischen Fahrzeug und Abzweig.

$\psi_{fs}$  = Winkel zwischen Straße und Eigenfahrzeug.

Es liegen die zugehörigen Schätzwerte vor:

$$\hat{d}_{fl} = \mathcal{E}(d_{fl})$$

$$\hat{\psi}_{fs} = \mathcal{E}(\psi_{fs})$$

Mit den Definitionen für die Schätzfehler

$$\delta d_{fl} := d_{fl} - \hat{d}_{fl}$$

$$\delta\psi_{fs} := \psi_{fs} - \hat{\psi}_{fs}$$

lauten die Schätzfehlervarianzen

$$\sigma_{\hat{d}_{fl}}^2 = \mathcal{E}[(\delta d_{fl})^2]$$

$$\sigma_{\hat{\psi}_{fs}}^2 = \mathcal{E}[(\delta\psi_{fs})^2]$$

Die Kovarianzmatrix bezüglich des f-Koordinatensystems

$$\underline{y} := \begin{bmatrix} d_{fl} \\ \psi_{fs} \end{bmatrix}, \delta\underline{y} = \underline{y} - \hat{\underline{y}} \quad (7.8)$$



lautet unter der Voraussetzung, daß  $d_{fl}$  und  $\psi_{fs}$  nicht korreliert sind:

$$P_y = \begin{bmatrix} \sigma_{d_{fl}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \psi_{fs} \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Für die Kovarianzmatrix  $P_g$  bezüglich des g-Koordinatensystems ergibt sich nach K.-D. Otto [69]:

$$P_g = DP_y D^T \quad (7.10)$$

mit

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial d_{fl}} & \frac{\partial g_1}{\partial \psi_{fs}} \\ \frac{\partial g_2}{\partial d_{fl}} & \frac{\partial g_2}{\partial \psi_{fs}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{gl} & d_{fl} \cdot \sin \varphi_{gl} \\ \sin \varphi_{gl} & -d_{fl} \cdot \cos \varphi_{gl} \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

#### 7.4.2 Verifikation der Abzweighypothese

Bevor die bestimmte globale Position an das Modul IbSE übermittelt wird, wird verifiziert, daß die detektierte Landmarke dem Eintrag in der Wissensbasis entspricht. Anhand der geschätzten Größen für die Landmarkengeometrie und des Relativzustands zur Landmarke wird eine eindeutige Landmarkenidentifikation durchgeführt. Die Geometriegrößen müssen sich dabei in einem Toleranzbereich um die in der Wissensbasis abgelegten Werte bewegen.

Für einen Abzweig sind die relevanten Parameter:

- Anzahl  $n$  der Querstraßen
- Für jede Querstraße  $i$ :
  - Abzweigwinkel  $\psi_i$  und Standardabweichung  $\sigma_{\psi_i}$
  - Breite der Querstraße  $b_i$  und Standardabweichung  $\sigma_{b_i}$

Bei der Annäherung an einen Abzweig wird in der Endphase die Wahrnehmung auf die Querstraße mit der höchsten Relevanz fokussiert. Daher können in der Regel nicht alle instanziierten Querstraßen mit derselben Güte wahrgenommen werden. Die Auswertung beschränkt sich daher auf diese Querstraße. Im Regelfall ist dies diejenige Querstraße, auf die abgebogen werden soll. Die aktuellen Schätzgrößen werden direkt der *DOB* entnommen (Index e) und mit den in der Wissensbasis gespeicherten Größen (Index k) verglichen. Für eine erfolgreiche

Verifikation müssen die Bedingungen (7.12) und (7.13) erfüllt sein.

$$| \psi_{ei} - \psi_{ki} | \leq 3 \cdot \sigma_{\psi_i} \quad (7.12)$$

$$| b_{ei} - b_{ki} | \leq 3 \cdot \sigma_{b_i} \quad (7.13)$$

### 7.4.3 Positionsbestimmung an Landmarken der Klasse 3

Die Positionsbestimmung an Landmarken der Klasse 3 weist gegenüber dem vorherigen Abschnitt einige Besonderheiten auf. Wie aus Abbildung 7.7 ersichtlich ist, tritt nun zusätzlich der Winkel  $\psi_{ls}$  zwischen der Straße und der Landmarke auf.

Die Position  $[\lambda, \phi]$  (Längen- und Breitengrad) der Landmarke (Index l) im globalen Koordinatensystem (Index g) ist gegeben, ebenso die Orientierung  $[\varphi_{gs}]$  des Straßensegments (Index s), auf dem sich das Eigenfahrzeug befindet. In Abbildung 7.7 ist die Situation dargestellt. Der Ursprung des globalen Koordinatensystems wurde wieder in den Ursprung des Landmarkenkoordinatensystems verschoben (Index g). Das Fahrzeug befindet sich auf der Straße und von den Wahrnehmungsexperten für "Straßen" und "Landmarken" werden zyklisch die Schätzwerte für die Relativlage zur Eigenstraße und zur Landmarke mit den zugehörigen Varianzen zur Verfügung gestellt.

Im einzelnen sind vorab bekannt:

$d_{fl}$ ,  $\psi_{fs}$  und  $\psi_{fl}$  liegen als Schätzwerte vor,  $\varphi_{gs}$  ist aus der Karte bekannt.

Um die Position des Eigenfahrzeugs im globalen Koordinatensystem bestimmen zu können, muß berechnet werden:

$$\varphi_{gl} = \varphi_{gs} - (\psi_{fs} - \psi_{fl})$$

Damit ergeben sich die Koordinaten des Eigenfahrzeugs im globalen Koordinatensystem wieder gemäß Gleichung (7.7).

#### 7.4.3.1 Bestimmung der Kovarianzmatrix

Im f-Koordinatensystem werden hier geschätzt:

$d_{fl}$  = Abstand zwischen Fahrzeug und Landmarke.

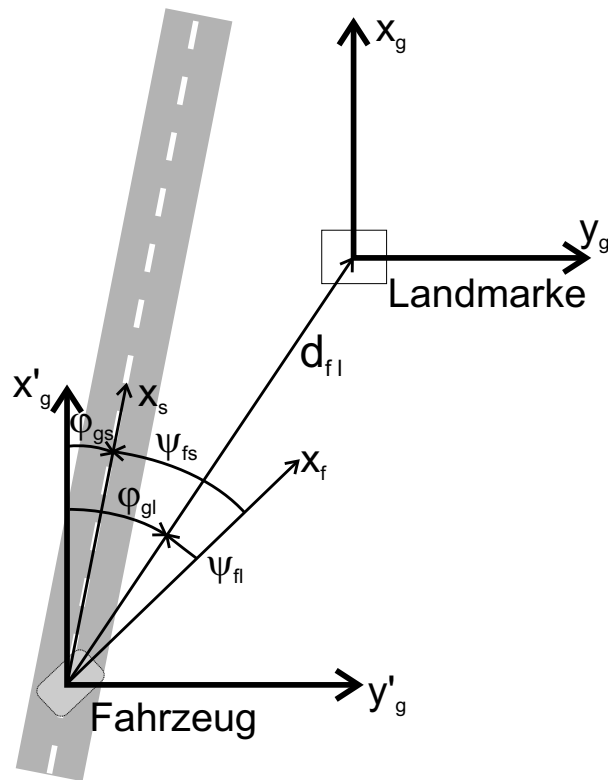


Abb. 7.7: Positionsbestimmung an einer Landmarke

$\psi_{fs}$  Winkel zwischen Straße und Eigenfahrzeug.

$\psi_{fl}$  Winkel zwischen Eigenfahrzeug und Landmarke.

Es liegen Schätzwerte vor:

$$\hat{d}_{fl} = \mathcal{E}(d_{fl})$$

$$\hat{\psi}_{fs} = \mathcal{E}(\psi_{fs})$$

$$\hat{\psi}_{fl} = \mathcal{E}(\psi_{fl})$$

Mit den Definitionen für die Schätzfehler

$$\delta d_{fl} := d_{fl} - \hat{d}_{fl}$$

$$\delta \psi_{fs} := \psi_{fs} - \hat{\psi}_{fs}$$

$$\delta \psi_{fl} := \psi_{fl} - \hat{\psi}_{fl}$$

lauten die Schätzfehlervarianzen

$$\sigma_{d_{fl}}^2 = \mathcal{E}[(\delta d_{fl})^2]$$

$$\sigma_{\psi_{fs}}^2 = \mathcal{E}[(\delta \psi_{fs})^2]$$

$$\sigma_{\psi_{fl}}^2 = \mathcal{E}[(\delta \psi_{fl})^2]$$

Für die Winkeldifferenz

$$\psi_{ls} := \psi_{fs} - \psi_{fl}$$

gilt:

$$\hat{\psi}_{ls} = \hat{\psi}_{fs} - \hat{\psi}_{fl},$$

$$\delta\psi_{ls} = \psi_{ls} - \hat{\psi}_{ls} = \delta\psi_{fs} - \delta\psi_{fl}.$$

Damit erhält man die Varianz

$$\begin{aligned} \sigma_{\psi_{ls}}^2 &= \mathcal{E}[(\delta\psi_{fs} - \delta\psi_{fl})^2] \\ &= \mathcal{E}[(\delta\psi_{fs})^2 - 2\delta\psi_{fs}\delta\psi_{fl} + (\delta\psi_{fl})^2] \\ &= \sigma_{\psi_{fs}}^2 + \sigma_{\psi_{fl}}^2 - 2 \cdot \underbrace{\mathcal{E}[\delta\psi_{fs}\delta\psi_{fl}]}_{=0, \text{ falls nicht korreliert}} \\ \sigma_{\psi_{ls}}^2 &= \sigma_{\psi_{fs}}^2 + \sigma_{\psi_{fl}}^2 \end{aligned}$$

Die Kovarianzmatrix bezüglich des f-Koordinatensystems

$$\underline{y} := \begin{bmatrix} d_{fl} \\ \psi_{ls} \end{bmatrix}, \delta\underline{y} = \underline{y} - \hat{\underline{y}} \quad (7.14)$$

lautet unter der Voraussetzung, daß  $d_{fl}$ ,  $\psi_{fl}$  und  $\psi_{fs}$  nicht korreliert sind:

$$P_y = \begin{bmatrix} \sigma_{d_{fl}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\psi_{ls}}^2 \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

Die Kovarianzmatrix  $P_g$  wird analog zum vorherigen Abschnitt gemäß Gleichung (7.9) berechnet.

Durch die Verbesserung der Positionsschätzung an Landmarken wird eine genaue Bestimmung des Missionsfortschritts gewährleistet. Davon hängen die Erfolgsaussichten bei der Durchführung einer autonomen Mission wesentlich ab.

## 7.5 Erweiterung der Wissensbasen

Der Grundstein zum Erfolg bei der Ausführung einer anspruchsvollen Aufgabe wird meist schon in der Planungsphase gelegt. Eine Planungskomponente für autonome Fahrzeuge ist dabei in hohem Maße von der Aktualität und Genauigkeit

seiner Hintergrundwissensbasen abhängig. Eine Karte spiegelt eine Momentaufnahme über den Zustand einer sich dynamisch wandelnden Umwelt zu einem bestimmten Zeitpunkt wider. Wird das System in die Lage versetzt, auftretende Inkonsistenzen zwischen dem eigenen Hintergrundwissen und den gemachten Erfahrungen aufzudecken und auszuräumen, können künftige Aktionen auf Basis dieses verbesserten Hintergrundwissens besser geplant und mögliche Risiken bereits vor Beginn einer Mission vermieden werden. Dazu werden während der Durchführung einer Mission die anfallenden Schätzgrößen für statische Objekte (Straßen und Landmarken) und für den Eigenzustand (Position in globalem Koordinatensystem) fortlaufend abgespeichert. Zusätzlich wird der Verlauf von durchgeführten Aktionen protokolliert. Diese Daten können nach einer Mission, wenn keine neuen Missionsziele vorgegeben werden und somit ausreichend Zeit und die erforderlichen Rechenkapazitäten zur Verfügung stehen, ausgewertet und die statischen Hintergrundspeicher auf Konsistenz geprüft werden.

In diesem Abschnitt werden einige Mechanismen zur Verbesserung und Erweiterung der Hintergrundwissensbasen vorgestellt.

### 7.5.1 Die eigenen Fähigkeiten

In Abschnitt 5.2 wurde ein Bewertungsfaktor für die Erfolgsaussichten der eigenen Verhaltensfähigkeiten vorgestellt. Nach Abschluß einer Mission liegen neue Daten zur Berechnung des Bewertungsfaktors vor. Für jede Verhaltensfähigkeit berechnet sich der Bewertungsfaktor  $k_{vf}$  zu:

$$k_{vf} = \frac{n_e + n_{em}}{n + n_m} \quad (7.16)$$

mit:

|          |   |
|----------|---|
| $n_e$    | Erfolgreiche Ausführungen einer Fähigkeit vor der Analyse     |
| $n$      | Anzahl aller Ausführungen einer Fähigkeit vor der Analyse     |
| $n_{em}$ | Erfolgreiche Ausführungen einer Fähigkeit während der Mission |
| $n_m$    | Anzahl aller Ausführungen einer Fähigkeit während der Mission |

### 7.5.2 Straßen

Unter den statischen Wissensbasen spielt der Datenbestand des Umweltmodells “Straßen” eine zentrale Rolle. Von der Aktualität der enthaltenen Daten hängt der Erfolg einer Mission wesentlich ab. In den folgenden Absätzen wird beschrieben, wie durch die Auswertung von Daten, die während einer Mission aufgezeichnet wurden, die einzelnen Einträge der Wissensbasis kontrolliert und korrigiert werden können.

#### Schicht 2: Anfangs- und Endpunkte

Zusätzlich stehen die gespeicherten Schätzgrößen für den Eigenzustand zur Verfügung. Zu jedem Datensatz wird ein Zeitstempel abgespeichert. Dadurch ist die eindeutige Zuordnung der Daten untereinander gewährleistet. Die zu den Anfangs- und Endpunkten der Klothoidensegmente korrespondierenden Positionswerte werden als neue zusätzliche Eckpunkte in den jeweiligen Polygonzug eingefügt.

#### Schicht 3: Straßenattribute

Ein wichtiger Parameter für die Missionsplanung ist die mittlere Geschwindigkeit  $v_m$ , die auf einem Streckenabschnitt erreicht werden kann. In der Wissensbasis “Straßen” ist ein entsprechender Wert für die einzelnen Streckenabschnitte abgelegt, der auch zeitlich gestaffelt sein kann. Nach der Durchführung einer Mission kann für alle Streckenabschnitte die tatsächlich erreichte mittlere Geschwindigkeit  $v_{mm}$  berechnet werden. Diese Geschwindigkeitswerte werden mit den in der Wissensbasis eingetragenen Werten verglichen. Bei Abweichungen ist dann eine Aktualisierung der Wissensbasis erforderlich. Sinnvoll ist eine Korrektur jedoch nur dann, wenn die tatsächlich erreichte Geschwindigkeit sich nicht aus eigenen Zielvorstellungen, wie z. B. einer durch *Central Decision* eingeschränkten Höchstgeschwindigkeit, oder aufgrund eines singulären Ereignisses, wie z. B. einer Verkehrsstockung aufgrund eines Unfalls, ergab. Um den Wert für  $v_m$  korrigieren zu können, muß die Anzahl  $n$  der Proben bekannt sein, aus denen der in der Wissensbasis abgelegte Wert für  $v_m$  berechnet wurde. Bei bekannter Anzahl  $n$  ergibt sich der neue gemittelte Wert für die erwartete Geschwindigkeit auf dem Streckenabschnitt zu:

$$v'_m = \frac{(n \cdot v_m + v_{mm})}{(n + 1)} \quad (7.17)$$

Bei zeitlich gestaffelten Geschwindigkeitswerten erfolgt eine Korrektur des entsprechenden Eintrags. Bei Streckenabschnitten, für die noch keine zeitliche Staffelung vorliegt, wird diese eingeführt: für den zeitlichen Bereich, in dem der Streckenabschnitt befahren wurde, wird der neue Wert eingetragen, in den anderen Bereichen wird der alte Wert beibehalten.

#### Schicht 4: Straßengeometrie

Wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben, zeichnen sich die einzelnen Elemente der Straßenkarte durch konstante geometrische Parameter aus. Bei der automatischen Kartengenerierung muß daher zum einen die genaue Schätzung dieser Größen, zum anderen die Detektion der Übergänge von einem Segment zum anderen erfolgen. Für die Schätzung der Verläufe der horizontalen und vertikalen Krümmungen werden die vom Wahrnehmungsexperten für "Straßen" geschätzten geometrischen Größen der Fahrbahn verwendet. R. Behringer hat in [5] gezeigt, daß die Krümmungsschätzung hinreichend genau ist, um daraus den horizontalen Straßenverlauf zu rekonstruieren. Für die Segmentierung des Verlaufs in Abschnitte mit festen Klothoidenparametern ergeben sich einige Besonderheiten durch das von diesem Modul verwendete Modell der gemittelten Klothoide. Durch die bildaufnehmenden Kameras kann in der Regel nur ein kleiner Teil der Länge des befahrenen Straßensegments auf einmal erfaßt werden. Die Vorausschauentfernung  $L_v$  der Kameras wird in Abhängigkeit von der Situation und der vorliegenden Domäne adaptiert. Die Segmentlängen der am häufigsten befahrenen Straßenkategorien liegen aber meist erheblich über dem Wert für  $L_v$ . Daher wird erst während der Fahrt ein Segment vollständig erfaßt. Beim Übergang zwischen zwei Segmenten treten trotz des kontinuierlichen Krümmungsverlaufs Sprünge in der Schätzgröße  $c_1$  auf, die theoretisch Dirac-Impulse in der Zeitableitung bewirken, die als Differentialbeziehung nicht modellierbar sind. Zur Schätzung der horizontalen Fahrbahnkrümmung wurde von E. D. Dickmanns [16] daher das Verfahren des gemittelten Krümmungsmodells entwickelt.

Dabei werden in jedem Zyklus für die innerhalb des Vorausschaubereichs der Kameras liegenden Straße die Krümmungsparameter ( $c_{0hm}$  und  $c_{1hm}$ ) einer Klothoide geschätzt, die in der Entfernung  $L_v$  zum Fahrzeugschwerpunkt dieselbe

laterale Ablage  $\Delta y(L_v)$  erzeugt. Details zum gemittelten Krümmungsmodell sind im Anhang C zu finden.

Zur Bestimmung der Klothoidenparameter der einzelnen Segmente muß der Verlauf von  $c_{0hm}$  in Bereiche mit konstanter Steigung, also mit  $c_{1hm} = const.$ , unterteilt werden.

Für die Segmentierung eines eindimensionalen Signals in Abschnitte mit konstanter Steigung wurde von U. Hofmann ein Operator entwickelt. Ursprünglich war dieser als Bildverarbeitungsoperator konzipiert, um lineare Verläufe des Grauwertes in einzelnen Bildausschnitten zu detektieren. Der zugrundeliegende Algorithmus ist derzeit noch nicht veröffentlicht, das Verfahren wird aber in seiner voraussichtlich im Jahr 2002 erscheinenden Dissertation [40] detailliert beschrieben werden. Mit geringen Modifikationen und Erweiterungen wird dieses Verfahren hier zur Straßensegmentierung eingesetzt<sup>1</sup>.

In Abbildung 7.8 ist das Ergebnis für die Segmentierung eines Datensatzes für die horizontale Krümmung  $c_{hm}$  dargestellt.

Der vorliegende Datensatz wurde in 9 Segmente unterteilt. Daraus lassen sich nun die Klothoidenparameter  $[c_{0h}, c_{1h}, l]$  für die einzelnen Abschnitte bestimmen zu:

$$l = L_e - L_a \quad (7.18)$$

$$c_{0h} = c_{ha} \quad (7.19)$$

$$c_{1h} = \frac{c_{he} - c_{ha}}{l} \quad (7.20)$$

Eine minimale Segmentlänge wird dabei vom Segmentierungsverfahren nicht berücksichtigt. Segmentlängen, die kleiner als die Vorausschauentfernung  $L_v$  sind, können aber nicht aufgelöst werden. In einem Nachbearbeitungsschritt werden daher die Längen der generierten Segmente überprüft. Unterschreitet die Länge  $l(i)$  des Segments  $i$  die Vorausschauentfernung  $L_v$ ,

$$l(i) < L_v,$$

so werden zwei benachbarte Segmente so vereinigt, daß für den Bahnwinkel des neuen Segments gilt:

$$\Delta\chi'_c = \Delta\chi_c(i) + \Delta\chi_c(i-1)$$

Mit Gleichung (C.4) ergeben sich die Klothoidenparameter des neuen Segments zu:

<sup>1</sup>Dieses Verfahren lieferte bessere Ergebnisse als ein vom Autor in [32] vorgestelltes Verfahren und kommt deshalb hier zum Einsatz.



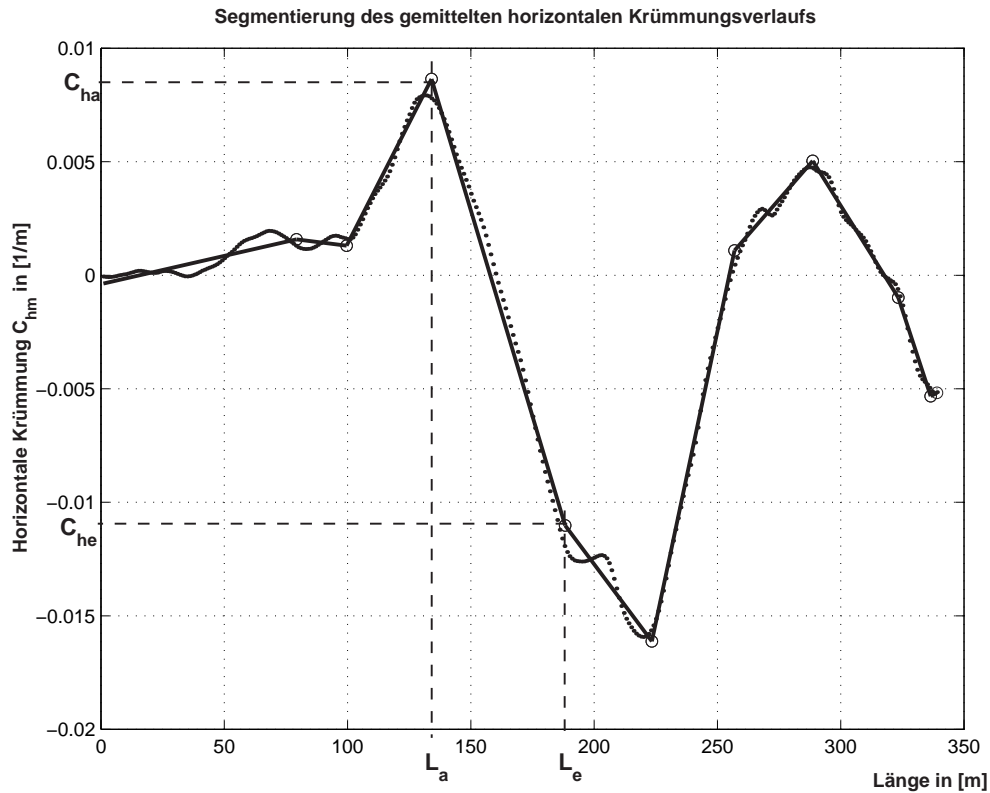


Abb. 7.8: Bestimmung der Klothoidenparameter

$$\begin{aligned}
 l'(i-1) &= l(i-1) + l(i) \\
 c'_0(i-1) &= c_0(i-1) \\
 c'_1(i-1) &= \frac{c_1(i-1) \cdot l(i-1)^2 + c_1(i) \cdot l(i)^2 + 2 \cdot l(i) \cdot (c_0(i) - c_0(i-1))}{(l(i) + l(i-1))^2}
 \end{aligned}
 \tag{7.21}$$

Die Bestimmung der Parameter  $c_{0v}$  und  $c_{1v}$  für die Vertikalkrümmung und der Parameter  $b_0$  und  $b_1$  für die Breite der Fahrspur erfolgt analog dazu aus dem Verlauf der zugehörigen Schätzgrößen.

Die ermittelten Segmentgrenzen für die Horizontalkrümmung, die Vertikalkrümmung und die Fahrspurbreite fallen in der Regel nicht zusammen. Die Segmentierung des vermessenen Straßenabschnitts erfolgt so, daß innerhalb eines Abschnitts die Parameter  $(c_{0v}, c_{1v}, c_{0h}, c_{1h}, b_0, b_1)$  konstant bleiben. Damit lassen sich alle geometrischen Parameter der befahrenen Fahrspur ermitteln.



## 8 Experimentelle Ergebnisse

Im folgenden Kapitel wird anhand von Ergebnissen realer Versuchsfahrten die Interaktion der in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Komponenten erläutert.

### 8.1 Erstellung der Wissensbasen

Für die Durchführung von Versuchsfahrten standen der Truppenübungsplatz der Bundeswehr in Pfullendorf und die Rollwege und Abstellflächen des ehemaligen Flughafens auf dem Campus der Universität der Bundeswehr München in Neubiberg zur Verfügung. Da für diese Bereiche kein kommerzielles digitales Kartenmaterial verfügbar war, wurde ein teilautomatisiertes Verfahren zur Kartenerstellung entwickelt. Als Eingangsdaten für die Kartographierung dient dabei das während einer manuellen Fahrt über das Testgelände aufgezeichnete Signal eines *Differential-GPS* Empfängers (DGPS).

Die für den Truppenübungsplatz Pfullendorf erstellte Karte ist im Anhang B.1 zu finden.

### 8.2 Planung autonomer Missionen

Die Planung einer autonomen Fahrmission durch den Bediener erfolgt über die Mensch-Maschine Schnittstelle des Systems. Ausgehend von der automatisch bestimmten Anfangsposition des Fahrzeugs in der Umwelt erfolgt die weitere Planung durch die Vorgabe von Viapunkten und dem Missionsziel durch den Bediener. Dabei werden stets drei Pläne mit unterschiedlichen Optimierungskriterien erstellt. Abbildung 8.1 zeigt die Visualisierung einer fertig geplanten Fahrmission auf dem Wegenetz des Campus der UniBwM durch die Mensch-Maschine Schnittstelle. Für die drei geplanten Routen können neben dem Streckenverlauf auch charakteristische Größen visualisiert und über eine systeminterne Schnittstelle den Entscheidungsinstanzen zur Verfügung gestellt werden, damit ein Plan akzeptiert oder eine Neuplanung initiiert werden kann.

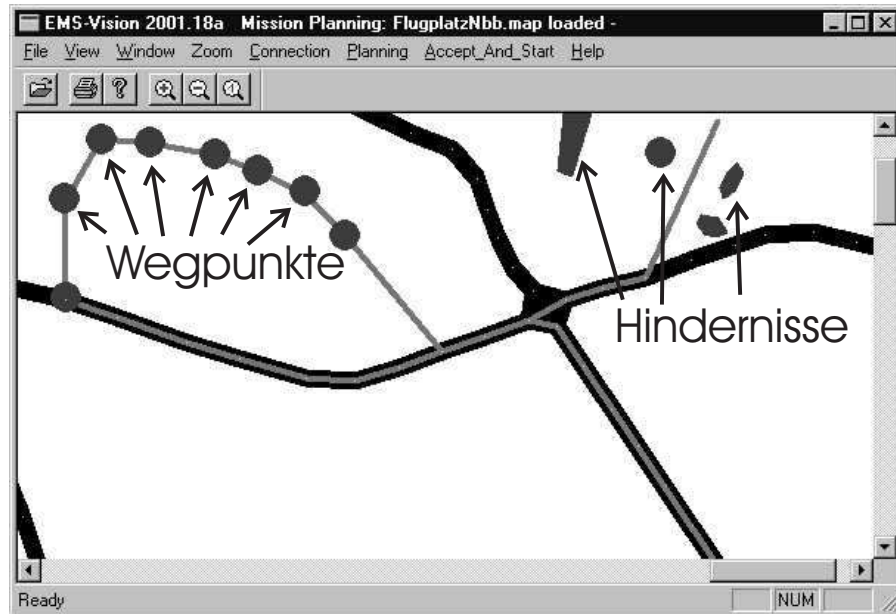


Abb. 8.1: Geplante Mission

### 8.3 Der Missionsplan

Aus der ausgewählten Route wird gemäß Abschnitt 6.3 ein Missionsplan erzeugt. Dieser Plan wird zusammen mit zusätzlicher Information in einer Textdatei abgespeichert. Diese Datei ist in mehrere Abschnitte unterteilt. Die obersten drei Abschnitte, siehe Tabelle 8.1, enthalten allgemeine Informationen über den Plan. Abschnitt 1 gibt den Zeitpunkt der Planung an. Abschnitt 2 spezifiziert, in welchen Einheiten die im Plan enthaltenen Längen, Zeiten und Geschwindigkeiten angegeben sind. Abschnitt 3 nennt die Karten für Straßen, Landmarken und Hindernisse, auf deren Grundlage die Berechnung des Plans erfolgte.

Tabelle 8.1: Der Missionsplan, Abschnitte 1 - 3

|  |
|--|
| EMS-Vision Mission Plan<br>Generated on Tue Dec 11 09:13:38 2001   |
| [Units]<br>TranslationUnit=[m]<br>TimeUnit=[s]<br>SpeedUnit=[km/h]   |
| [Maps]<br>Roadmap=U:/ini/Mission/maps/FlugplatzNbb.rds<br>Landmarkmap=U:/ini/Mission/maps/FlugplatzNbb.lmk<br>Obstaclemap=U:/ini/Mission/maps/FlugplatzNbb.obs |

Der vierte Abschnitt der Datei, Tabelle 8.2, beschreibt einige charakteristische Größen des Plans:

Hier wurde die "schnellste Route" ausgewählt. Die geschätzte Dauer der Mission sind 501 Sekunden, die geschätzte Streckenlänge beträgt 597 Meter. Bei dieser Mission müssen zwei Kreuzungen überquert werden.

Tabelle 8.2: Der Missionsplan, Abschnitt 4

|                   |   |         |
|-------------------|---|---------|
| [PlanInfo]        |   |         |
| Criterion         | = | fastest |
| Duration          | = | 501     |
| Distance          | = | 597     |
| NoOfIntersections | = | 2       |

Der fünfte Abschnitt der Textdatei enthält den eigentlichen Missionsplan. Die Mission beginnt mit einem Haltemanöver von 20 Sekunden Dauer. In dieser Zeit wird die Hypothese für die im nächsten Missionsplanelement spezifizierte Straße instanziiert und der zugehörige Wahrnehmungsexperte aktiviert. Der zugehörige Eintrag in der Straßenkarte wird mit dem eindeutigen Bezeichner *Road\_1* referenziert. Das zweite Planelement spezifiziert den Fahrauftrag *FOLLOW\_ROAD* auf der Straße *Road\_1* mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h. Gleichzeitig soll die Detektion der erwarteten Querstraße *Road\_2* erfolgen, die in die Kreuzung *Intersection\_1* einmündet.

Entsprechende Objekthypothesen für die Kreuzung und die Querstraße werden von der *Missionsüberwachung* in der *DOB* instanziiert. Die Querstraßenhypo-

Tabelle 8.3: Der Missionsplan, Abschnitt 5

| No. | Planelement  |
|-----|--|
| 1   | HALT<br>UNTIL DONE Dur[20.0] NEXT  |
| 2   | FOLLOW_ROAD Vel[10.0] Road_1<br>AND DETECT CROSSROAD Road_2 ON Intersection_1 Dist[45.0]<br>UNTIL DONE Len[100.0,0.0] LAST |
| 3   | INTERSECTION LEFT Intersection_1 ON Road_2 Vel[10.0]<br>UNTIL DONE Len[10.0,0.0] NEXT                                      |
| 4   | FOLLOW_ROAD Vel[10.0] Road_2<br>UNTIL DONE Len[20.0, 0.0] NEXT   |
| 5   | LEAVE_ROAD RIGHT NEXT  |

these wird dabei in 45 Metern Entfernung vor dem Fahrzeug eingefügt. Sollte eine Detektion während einer Wegstrecke von 100 Metern nicht möglich sein, wobei für dieses Transitionskriterium zusätzlich die aktuelle Positionsunsicherheit in Längsrichtung der Straße berücksichtigt wird, so soll direkt das letzte Missionsplanelement ausgeführt und das Fahrzeug angehalten werden. Bei erfolgreicher Detektion erfolgt beim Erreichen der Kreuzung die Transition in das nächste Planelement. An der Kreuzung soll ein Abbiegemanöver nach links auf die Straße *Road\_2* erfolgen. Nach einer Wegstrecke von 20 Metern soll das Fahrzeug die Straße nach rechts verlassen.

Tabelle 8.4: Der Missionsplan, Abschnitt 6

| No. | Planelement  |
|-----|--|
| 6   | WAYPOINT [11.6428814, 48.0770950]<br>UNTIL DONE Dist[5.0] NEXT   |
|     | ...  |
|     | WAYPOINT [11.6415799, 48.0769272]<br>AND DETECT CROSSROAD Road_2 Dist[35.0]<br>UNTIL DONE Dist[0.0] NEXT |

Das Planelement 6, Tabelle 8.4, spezifiziert eine Folge von 8 Wegpunkten, die nacheinander angefahren werden sollen. Als Fangbereich werden jeweils 5 Meter

angegeben (die folgenden Wegpunkte wurden in dieser Darstellung weggelassen und durch die Punkte angedeutet). Der letzte Wegpunkt liegt direkt auf der Straße *Road\_2*. Während der Annäherung an den Wegpunkt soll eine Detektion dieser Straße erfolgen. Eine entsprechende Objekthypothese wird hier aufgrund des geringen Abstands zum letzten Wegpunkt in 35 Metern Entfernung vor dem Fahrzeug instanziiert. Beim Erreichen der Straße soll die Transition in das nächste Planelement erfolgen.

Das Planelement 7, Tabelle 8.5, spezifiziert als geplante Fortbewegungsaufgabe das Auffahren auf die Straße *Road\_2* in die linke Richtung. Nach dem Auffahren soll das Fahrzeug über eine Wegstrecke von 120 Metern dem Straßenverlauf mit 7 km/h folgen. Danach folgt eine weitere Sequenz von Planelementen, die hier nicht weiter betrachtet werden. Der vollständige Missionsplan ist im Anhang B aufgeführt.

Tabelle 8.5: Der Missionsplan, Abschnitt 7

| No. | Planelement   |
|-----|---|
| 7   | ENTER_ROAD Road_2 LEFT  |
| 8   | FOLLOW_ROAD Vel[7.0] Road_2<br>UNTIL DONE Len[120.0,0.0] NEXT |
|     | ...   |
| 15  | STOP  |

## 8.4 Kontrollfluß

Der Systemstart beginnt mit der Aktivierung der Fähigkeiten auf den Rechnern des EMS-Systems. Dadurch wird die Handlungsfreiheit des Systems gewährleistet. Nach dem Abschluß der Planungsphase wird der akzeptierte Missionsplan an die *Missionsüberwachung* weitergereicht (Zyklus 1103, Tabelle 8.6) und das erste Missionsplanelement, ein zeitlich begrenzter HALT, wird vorbereitet. Zusätzlich wird bereits die Objekthypothese für das erwartete Straßenobjekt instanziiert. Nach Ablauf der spezifizierten Dauer wird im Zyklus 1605 die Transition in das Planelement 2, FOLLOW\_ROAD, vollzogen. Zusätzlich wird eine Hypothese über die erwartete Querstraße in der erwarteten Relativlage  $\underline{x} = [45, 0, 0, 0, 0, -90^\circ]$  (45 Meter vor dem Fahrzeug, um  $90^\circ$  nach links

orientiert) instanziiert.

Tabelle 8.6: Der Kontrollfluß, Teil 1

| ZyklusNo. | Aktion   |
|-----------|--|
| 1103      | log-file opened Tue Dec 11 09:15:12 2001<br>Mission monitoring on host pallas<br>Init HALT |
| 1103      | Inserting road [Road_1]  |
| 1604      | Exit HALT  |
| 1605      | Init FOLLOW_ROAD<br>Inserted Crossroad: 45.0 0.0 0.0 0.0 0.0 -1.57                         |

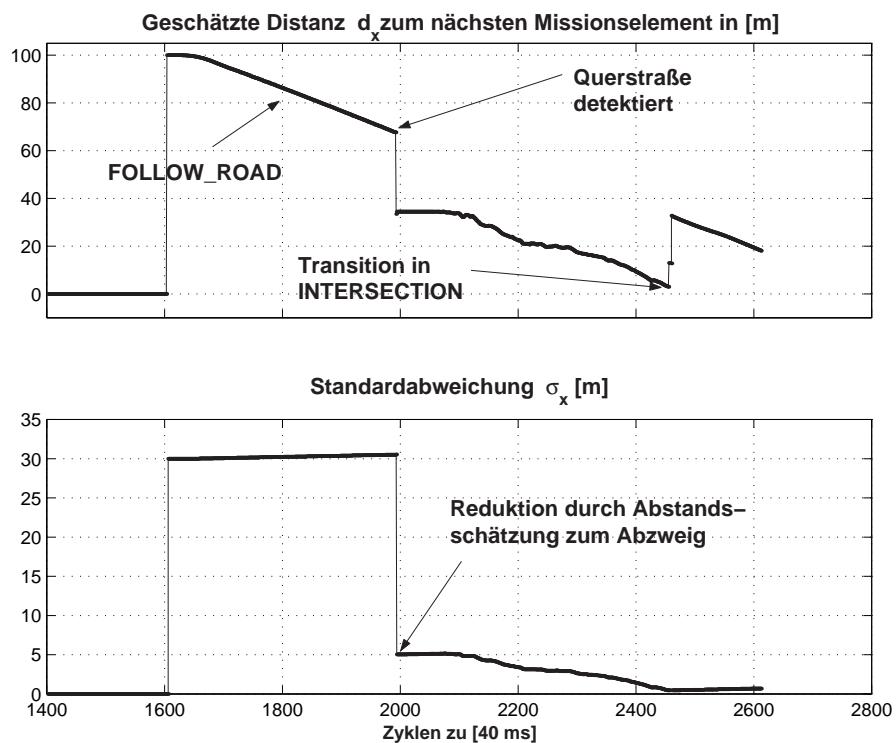


Abb. 8.2: Geschätzter Abstand zum nächsten Missionselement und die zugehörige Standardabweichung in der ersten Phase der Mission

Das Fahrzeug fährt entlang der Straße und nähert sich der Querstraße. Der Missionsfortschritt wird zunächst ausschließlich aufgrund der durch *IbSE* geschätzten Fahrzeugbewegung bestimmt. Im Zyklus 1993 (Abbildung 8.2 und Tabelle 8.7) wird die Querstraße durch den Wahrnehmungsexperten detektiert



und von da ab zyklisch im Bild verfolgt. Die Bestimmung des Missionsfortschritts basiert nun auf der geschätzten Relativlage zur Querstraße. In Abbildung 8.2 ist die geschätzte Entfernung zum nächsten Missionselement (oberer Plot) und die zugehörige Varianz (unterer Plot) dargestellt.

Der obere Graph in Abbildung 8.3 zeigt den Ablauf der Missionsplanelemente für den betrachteten Ausschnitt der Mission. Während zwei Missionsplanelementen werden Landmarken erkannt und die Relativlage zu den Landmarken zur Bestimmung des Missionsfortschritts ausgewertet. Aufgrund der größeren Positionsunsicherheit dauert es bei der ersten Querstraße 388 Zyklen, bis sie erkannt wird. Die zweite Landmarke wird fast unmittelbar nach der Instanziierung (8 Zyklen) detektiert.

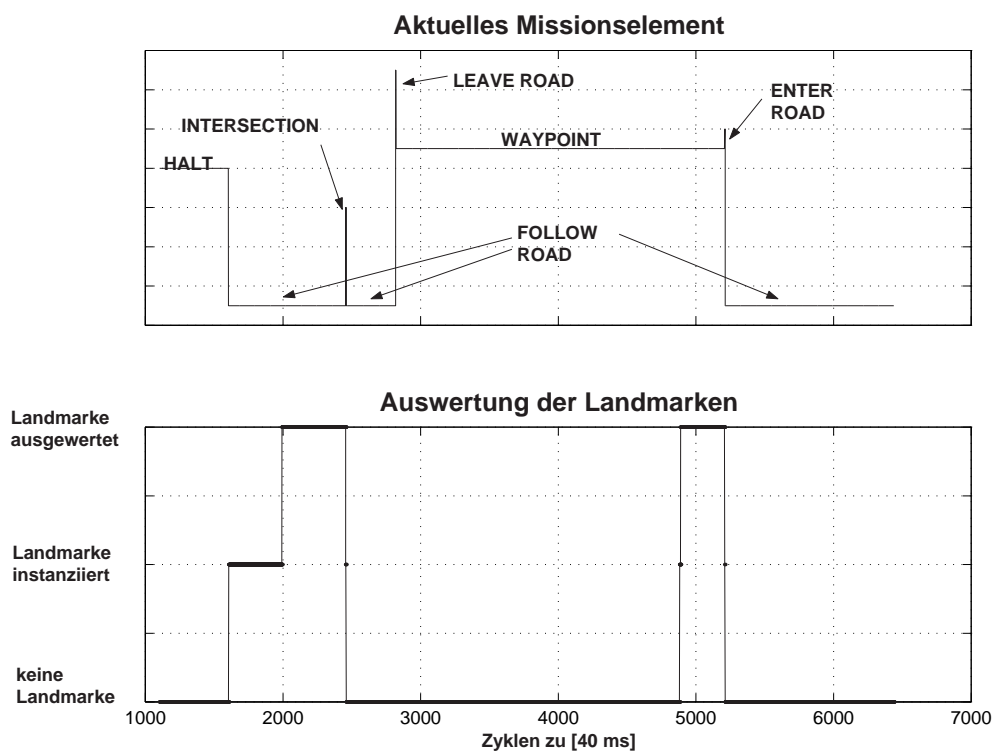


Abb. 8.3: Auswertung der Relativlage zu Landmarken während der gesamten Mission

Bei der Annäherung an eine Kreuzung erfolgt in *BDL* die Vorbereitung der Fortbewegungsfähigkeit "Abbiegen" durch die Bestimmung der Sollgrößen für das Vorsteuergesetz der Kurvenfahrt.

Im Zyklus 2455 (Tab. 8.7) ist der Startpunkt für das berechnete Vorsteuer-  
manöver erreicht. Die Fortbewegungsfähigkeit “Abbiegen” wird gestartet. Dies  
wird der *Missionsüberwachung* dadurch angezeigt, daß die Relevanzklasse der  
Querstraße durch *BDL* zurückgesetzt wird.

Nun kann die Reorganisation des Szenenbaums erfolgen. Die Objekte für die  
bisherige Eigenstraße, das Platzsegment und die Querstraße werden gelöscht  
und ein neues Objekt für die Eigenstraße wird eingefügt. Dieses Objekt wird  
mit den letzten Schätzgrößen für die Querstraße (Geometrie  $[c_0, c_1, b_0, b_1]$  und  
Relativlage  $[d_y, \psi]$ ) initialisiert. Beim Erreichen des Platzsegmentes erfolgt die  
Transition in das Planelement 3, INTERSECTION.

Tabelle 8.7: Der Kontrollfluß, Teil 2

| ZyklusNo. | Aktion                                      |
|-----------|---|
| 1993      | Landmark detected                           |
| 2455      | Relevance class reset by BDL                |
| 2456      | Exit FOLLOW_ROAD                            |
| 2457      | Init INTERSECTION                           |
| 2458      | Removed Landmark                            |
| 2458      | Removing road objects                       |
| 2458      | Inserting road [Road_2]                     |
| 2458      | new own road at: d_psi: -1.31rad d_y: 8.87m |
| 2458      | Setting road geometry 0.0 0.0 6.040 0.0     |
| 2460      | Exit INTERSECTION                           |

Im Zyklus 2461 (Tab. 8.8) erfolgt die Transition in das Planelement 4, FOL-  
LOW\_ROAD. Mit der Initialisierung erfolgt bereits die Vorbereitung des Plan-  
elements 5, WAYPOINT, durch Instanziierung der einzelnen Wegpunkte als  
Knoten in der *DOB*. Dies ermöglicht *BDL*, noch während die Fortbewegungsfähigkeit  
“Straße folgen” aktiv ist, die Berechnung der Größen für das Vorsteu-  
ergesetz im Planelement 5, LEAVE\_ROAD. Im Zyklus 2819 ist das Transiti-  
onskriterium für das Planelement 4 erfüllt und es erfolgt der Übergang in das  
Planelement 5, LEAVE\_ROAD.

Im Zyklus 2822 ist die Berechnung der Größen für das Vorsteuergesetz durch  
*BDL* abgeschlossen und die Fähigkeit “Straße verlassen” wird aktiviert (Tab. 8.9).  
Durch das Zurücksetzen der Relevanzklasse der Eigenstraße wird die Reorgani-  
sation des Szenenbaums durch die *Missionsüberwachung* ausgelöst. Das StraÙe-  
nobjekt wird aus der *DOB* gelöscht. Die einzelnen Wegpunkte werden der Reihe

Tabelle 8.8: Der Kontrollfluß, Teil 3

| ZyklusNo. | Aktion              |
|-----------|---------------------|
| 2461      | Init FOLLOW_ROAD    |
| 2461      | Inserted Waypoint_0 |
|           | ...                 |
| 2461      | Inserted Waypoint_7 |
| 2819      | Exit FOLLOW_ROAD    |

nach angefahren. Beim Erreichen des Fangbereichs um einen Wegpunkt wird der nächste Wegpunkt in der Liste als neues Referenzobjekt für die Fortbewegung vorgegeben.

Tabelle 8.9: Der Kontrollfluß, Teil 4

| ZyklusNo. | Aktion  |
|-----------|---|
| 2820      | Init LEAVE_ROAD                                     |
| 2822      | Relevance class reset by BDL                        |
| 2822      | Removing road objects                               |
| 2822      | Exit LEAVE_ROAD                                     |
| 2823      | Init WAYPOINT                                       |
| 3431      | Switching to next waypoint, min. dist 4.99m reached |
| 3676      | Switching to next waypoint, min. dist 4.99m reached |
| 3891      | Switching to next waypoint, min. dist 4.97m reached |
| 4083      | Switching to next waypoint, min. dist 4.92m reached |
| 4362      | Switching to next waypoint, min. dist 4.84m reached |
| 4562      | Switching to next waypoint, min. dist 4.94m reached |

In Abbildung 8.4 ist der Verlauf der Zustandsgrößen für die Sequenz von Wegpunkten dargestellt.

Beim Anfahren des letzten Wegpunkts wird eine Objekthypothese für die erwartete Straße instanziiert (Zyklus 4879, Tab. 8.10). Während der Annäherung an die Querstraße werden durch *BDL* zyklisch die Größen für das Vorsteuergesetz berechnet. Im Zyklus 5207 ist die Berechnung abgeschlossen und der Startpunkt für den Beginn des Vorsteuermanövers erreicht. *BDL* aktiviert die Fähigkeit *ENTER\_ROAD*. Die *Missionsüberwachung* führt die Transition in das Planelement 7, *ENTER\_ROAD*, durch. Der Szenenbaum wird umorganisiert, die Wegpunkte

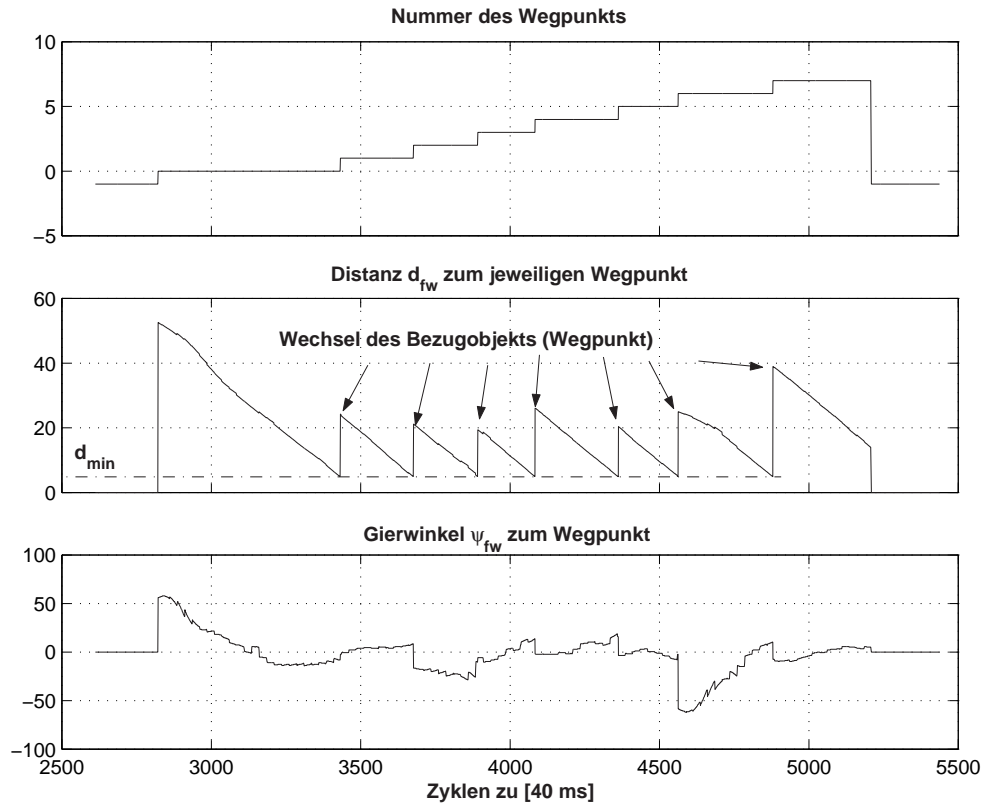


Abb. 8.4: Anfahren der Wegpunkte: beim Erreichen des Fangbereichs um den Wegpunkt ( $d_{min}$ ) erfolgt der Übergang zum nächsten Wegpunkt. Der Wert von  $d_f$  springt auf den Wert der Distanz zum neuen Bezugsobjekt

und die Querstraße werden gelöscht; ein neues Objekt für die Eigenstraße wird instanziiert und mit den Schätzgrößen der Querstraße initialisiert. Im Zyklus 5214 wird die Transition in das Planelement 8, FOLLOW\_ROAD, vollzogen.

Der weitere Verlauf der Mission ähnelt den vorangegangenen Abschnitten und wird daher hier nicht weiter erläutert. In Abbildung 8.5 sind die während der gesamten Missionsdurchführung gespeicherten Meßwerte eines DGPS-Empfängers in die Karte des Operationsgebietes eingezeichnet.

Tabelle 8.10: Der Kontrollfluß, Teil 5

| ZyklusNo. | Aktion   |
|-----------|--|
| 4879      | Switching to next waypoint, min. dist 4.96m reached<br>Inserted Crossroad: 35.0 0.0 0.0 0.0 0.00 -1.57 |
| 5207      | Relevance class reset by BDL   |
| 5208      | Exit WAYPOINT  |
| 5209      | Init ENTER_ROAD  |
| 5211      | Removed Waypoints  |
| 5211      | Removed Landmark   |
| 5211      | Inserting road [Road_2]  |
| 5211      | new own road at: d_psi: -1.44rad d_y: 10.98m   |
| 5211      | Setting road geometry 0.0 0.0 6.11 0.0   |
| 5213      | Exit ENTER_ROAD  |
| 5214      | Init FOLLOW_ROAD   |
|           | ...  |
|           | log-file closed Tue Dec 11 09:24:07 2001   |

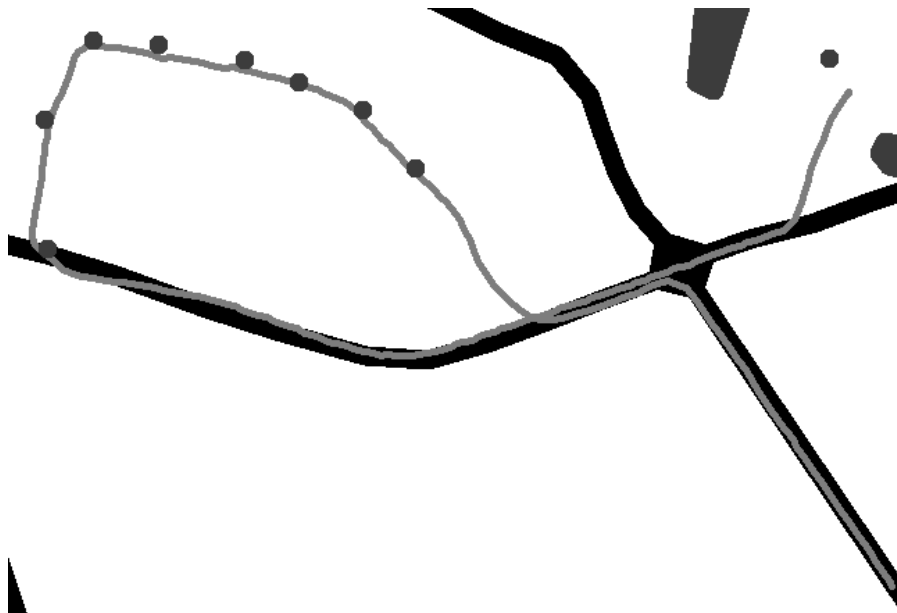


Abb. 8.5: Während der gesamten Mission gefahrene Trajektorie, Aufzeichnung der DGPS-Meßwerte

## 8.5 Positionsbestimmung an Landmarken

Abbildung 8.6 zeigt die globale Position des Fahrzeugs während einer Fahrmission analog zum vorangegangenen Abschnitt. Die Positionswerte wurden von der *Missionsüberwachung* auf Basis der vom Wahrnehmungsexperten geschätzten Relativlage zum Abzweig bestimmt. Zur Abschätzung der erzielten Genauigkeit ist zusätzlich der Verlauf der durch das Modul *IbSE* auf Basis von DGPS-Daten<sup>1</sup> geschätzten globalen Position des Fahrzeugs eingezeichnet. Die Positionswerte sind in einem lokalen kartesischen Koordinatensystem dargestellt. Bei der An-

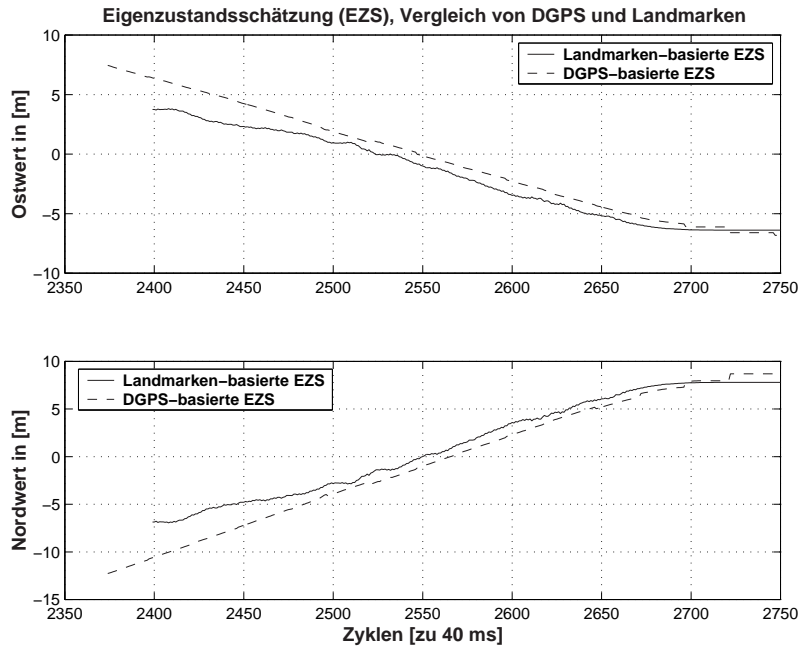


Abb. 8.6: Eigenzustandsschätzung basierend auf DGPS-Daten (gestrichelt) und relativ zu einem Abzweig während der Annäherung. Zur Verbesserung der Auflösung wurden die im globalen Koordinatensystem bestimmten Positionswerte in ein lokales UTM-Koordinatensystem mit dem Ursprung [697,011E, 5.328,312N] umgerechnet.

näherung an den Abzweig werden zunächst, solange der Abzweig noch nicht entdeckt wurde, von der Missionsüberwachung keine globalen Positionsdaten berechnet. Sobald der Abzweig entdeckt wurde (Zyklus 2400) und Schätzwerte für die Relativlage zum Abzweig zur Verfügung stehen, wird daraus ein Schätz-

<sup>1</sup>Im normalen Betrieb wird das GPS im C/A-Modus mit der damit verbundenen Standardabweichung von  $\sigma = 30m$  betrieben.

wert für die globale Fahrzeugposition berechnet und an die IbSE übermittelt.

Nach der Detektion der Querstraße, gekennzeichnet durch eine große Varianz der Abstands- und damit der Positionsschätzung, bleibt nach dem Einschwingen des Filters die Differenz für beide Werte über eine Phase von 200 Zyklen im Bereich von  $\pm 1.5m$ . Dies liegt im Rahmen der Meßgenauigkeit des verwendeten DGPS-Empfängers. Gegenüber der Verwendung von GPS als alleiniger Informationsquelle kann damit die Genauigkeit der globalen Positionsschätzung deutlich verbessert werden. Gegenüber dem permanenten Einsatz von DGPS bietet sich der Vorteil, daß die bildgestützte Positionsschätzung flächendeckend angewendet werden kann, während sich beim DGPS die Abschattungsproblematik gegenüber dem C/A-GPS verschärft, da sowohl die GPS-Signale als auch die Korrektursignale davon betroffen sind.

Abbildung 8.7 zeigt eine auf dem Flughafen Neubiberg verfügbare “natürliche” Landmarke, ein Radom.

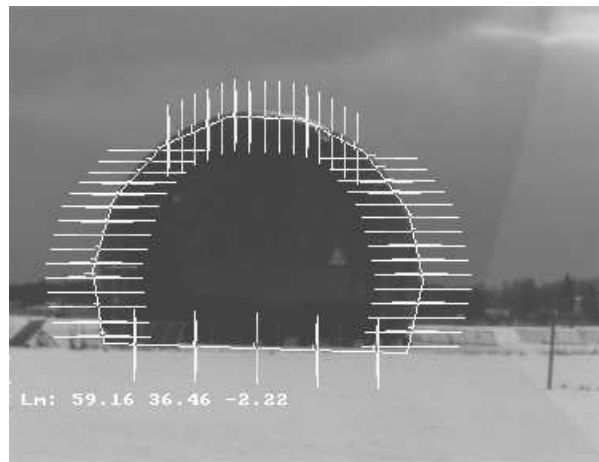


Abb. 8.7: Dreidimensionale Landmarke: Radom

Für dieses rotationssymmetrische Objekt wurde eine zweidimensionale Modellierung gemäß Abschnitt 5.1.4.1 eingeführt und in den allgemeinen Wahrnehmungsprozeß *EMSTrack* integriert.

Eine einfache Fahrmission bestand darin, während der Fahrt entlang einer Straße des Versuchsgeländes die Landmarke zu detektieren, im Bild zu verfolgen und dann in einem bestimmten Relativzustand zur Landmarke anzuhalten. Abbildung 8.8 zeigt den betreffenden Ausschnitt der Karte des Versuchsgeländes.

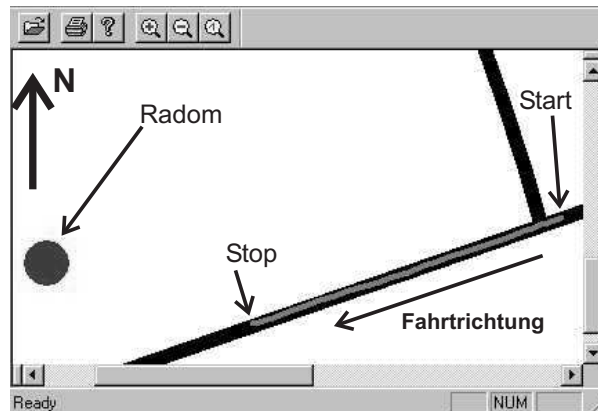


Abb. 8.8: Einfache Fahrmission zur Positionsschätzung an einer natürlichen Landmarke, Ausschnitt aus der Karte des Versuchsgeländes in Neubiberg.

Abbildung 8.9 zeigt den Verlauf der Schätzwerte für die Position der Landmarke “Radom” im körperfesten Koordinatensystem des Fahrzeugs, wie sie vom Wahrnehmungsexperten während der Verfolgungsphase zur Verfügung gestellt werden. Das Fahrzeug nähert sich an die Landmarke an und bleibt dann stehen.

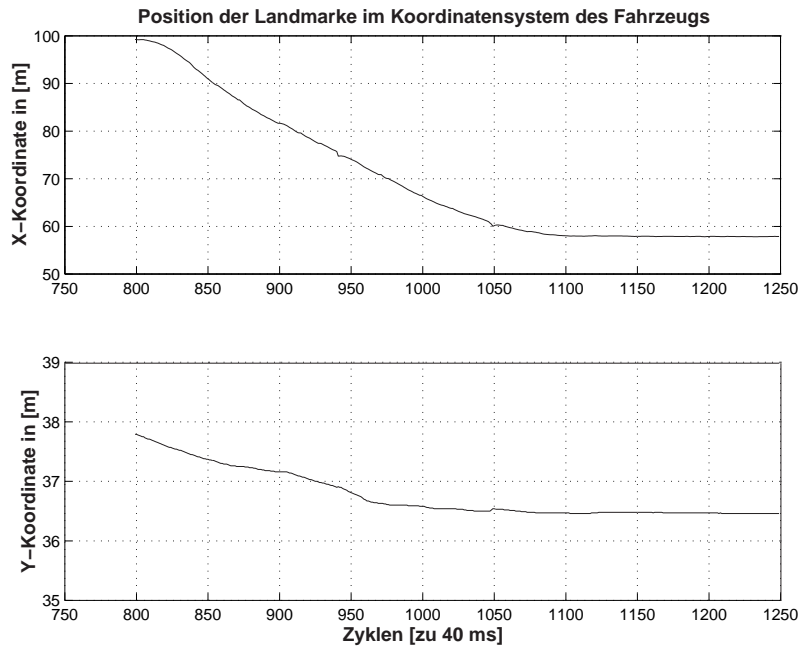


Abb. 8.9: Geschätzte Position der Landmarke im Koordinatensystem des Fahrzeugs während der Annäherung



Ab dem Zyklus 800 wird aus den Schätzgrößen für die Relativlage zur Landmarke die globale Position des Fahrzeugs berechnet. Abbildung 8.10 zeigt die Verläufe im Vergleich mit der DGPS-basierten Eigenzustandsschätzung durch *IbSE*. Die Positionswerte sind wiederum in ein lokales kartesisches Koordinatensystem umgerechnet. Nach dem Einschwingen des Filters verringern sich bei der weiteren Annäherung an die Landmarke die Differenzen zwischen den Kurven bis sie nahezu deckungsgleich verlaufen.

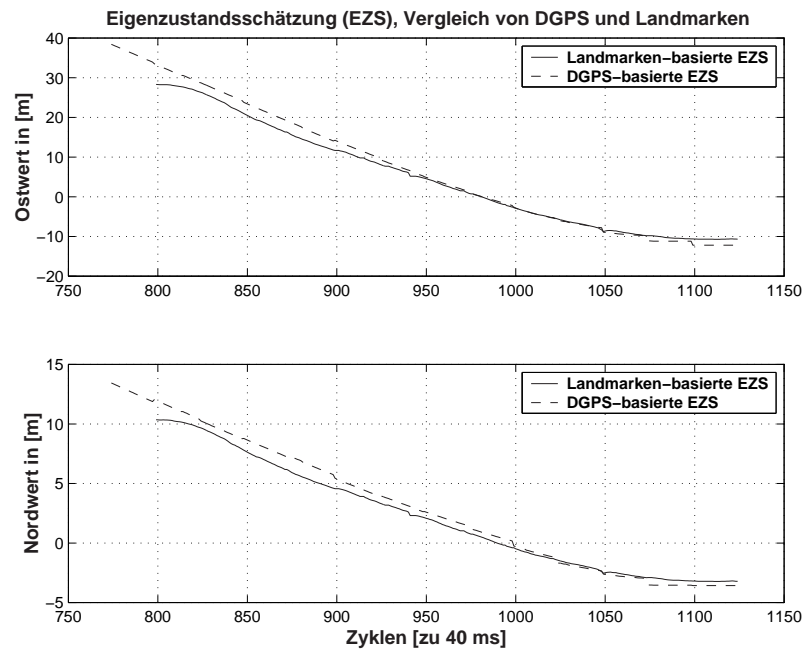


Abb. 8.10: Eigenzustandsschätzung basierend auf DGPS-Daten (gestrichelt) und relativ zu einer Landmarke während der Annäherung. Zur Verbesserung der Auflösung wurden die im globalen Koordinatensystem bestimmten Positionswerte in ein lokales UTM-Koordinatensystem mit dem Ursprung [696,781E, 5.328,132N] umgerechnet



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit stellte ein Konzept zur globalen Bahnführung eines autonomen Landfahrzeugs vor. Durch die explizite Repräsentation der einzelnen Fähigkeiten des Systems zur Wahrnehmung und Fortbewegung wird zusammen mit einem Aktivierungs- und Kontrollmechanismus ein effizienter Einsatz der Systemressourcen erzielt.

Die Planung komplexer Fahrmissionen erfolgt auf der Grundlage von Hintergrundwissen über das Operationsgebiet und die darin vorkommenden Objekte sowie über die Leistungsfähigkeit und Robustheit der eigenen Fähigkeiten.

Während der Durchführung einer Fahrmission ist eine Hierarchie von Entscheidungsinstanzen für die situationsgerechte Aktivierung der erforderlichen Fähigkeiten im Hinblick auf die aktuelle Situation und die durch den Plan spezifizierten langfristigen Ziele verantwortlich. Durch den ständigen Abgleich der resultierenden Fahrzeugbewegungen mit den geplanten Aktionen und durch die Positionsbestimmung relativ zu Landmarken wird der Fortschritt innerhalb der Mission auf mehreren zeitlichen und örtlichen Ebenen überwacht. Nach dem Abschluß einer Fahrmission kann, wenn keine neuen Aufträge vorliegen, der Datengehalt der Hintergrundwissensbasen mit den während früherer Missionen gemachten *Erfahrungen* verglichen und bei Bedarf aktualisiert werden.

Das entwickelte Konzept wurde im Rahmen des EMS-Vision Systems entwickelt und in das autonome Versuchsfahrzeug VAMORS integriert. Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Methoden und Algorithmen zur globalen Fahrzeugführung und der situationsgerechten Aktivierung einzelner Fähigkeiten konnte in ausgiebigen Fahrversuchen nachgewiesen werden.

Der weitere Ausbau der Repräsentationsmechanismen für die eigenen Fähigkeiten ist Gegenstand derzeitiger Arbeiten am ISF. Durch die noch detailliertere Modellierung der einzelnen Fähigkeiten und der Abhängigkeiten zwischen den dazu erforderlichen Komponenten, sowohl in Hard- als auch Software, sollen mehrere Ziele erreicht werden:

1. Noch flexiblere Möglichkeit der Parametrisierung der Fähigkeiten.

2. Möglichkeit der Selbstdiagnose bei Ausfall einer Komponente.
3. Möglichkeit, grundlegende Fähigkeiten neu zu kombinieren und damit neues komplexes Verhalten selbst zu lernen.

Gerade der Handlungsspielraum der Entscheidungsinstanzen wird sich dadurch weiter vergrößern. Damit wird ein weiterer Schritt in Richtung des Fernziels *Autonomes Fahrzeug* gemacht werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] J. Albus. 4-D/RCS: A Reference Model Architecture for Demo III. In *Procs. of the SPIE Conf. AeroSense '99, Session on Unmanned Ground Vehicle Technology*, Band 3693, Orlando (FL), apr, 7-8 1999.
- [2] R. C. Arkin. *Behavior-Based Robotics*. The MIT Press, Cambridge, Massachussetts, 1998.
- [3] S. Balakirsky, M. Salonish, S. Allen, E. Messina, J. Salinas. Advanced MMI/MP for Demo III XUVs. In *Procs. of the SPIE Conf. AeroSense '98*, Orlando (FL), April 1998.
- [4] S. Baten. EPC-D Embedded Personal Computer Daemon für Windows NT. *Interne Dokumentation*, 1997.
- [5] R. Behringer. Quantitative Kurserfassung einer Fahrspur durch Befahren mit einem sehenden Fahrzeug. In *DAGM-Symposium Mustererkennung*, Lübeck, September 1993.
- [6] R. Behringer. *Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufs durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1996.
- [7] M. Bertozzi, A. Broggi, G. Conte, A. Fascioli. Obstacle and lane detection on ARGO. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Boston, USA, November 1997.
- [8] M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli, S. Tommesani. Experiments using MMX-based processors for real-time image processing on the ARGO vehicle. In *Procs. of the 1998 IEEE Conference on Intelligent Vehicles* [43].
- [9] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli. The 2000 km test of the ARGO Vision-Based Autonomous Vehicle. *IEEE Intelligent Systems*, 55–64, Januar 1999.
- [10] R. Brooks. Intelligence without representation. *AI*, 47:139–159, 1991.

- 
- [11] C. Brüdigam. *Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1994.
- [12] B. Brumitt, M. Hebert. Experiments in Autonomous Driving With Concurrent Goals and Multiple Vehicles. In *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Leuven, Belgien, 1998.
- [13] J. Bullock, E. J. Krakiwsky. Analysis of the use of digital road maps in vehicle navigation. In *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 494–501, 1994.
- [14] Coombs, Murphy, Lacaze, Legowik. Driving Autonomously Offroad up to 35 km/h. In *Procs. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000*, 186–191, Detroit, USA, Oktober 2000.
- [15] D. Dickmanns. *Rahmensystem für die visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Informatik, 1997.
- [16] E. D. Dickmanns. Dynamic Computer Vision for Mobile Robot Control. In *Proc. 19th Int. Symp. and Expos. on Robots*, Sydney (Australia), November 1988.
- [17] E. D. Dickmanns. 4D-Szenenanalyse mit integralen raumzeitlichen Modellen. In Paulus (Ed.), *9. DAGM-Symposium Mustererkennung*, Nummer 149 in Informatik Fachberichte, Braunschweig, September 1987. Springer Verlag.
- [18] E. D. Dickmanns. Subject-Object Discrimination in 4D-Dynamic Scene Interpretation for Machine Vision. In *Proc. IEEE Int. Workshop on Visual Motion*, 298–304, Irvine, 1989.
- [19] E. D. Dickmanns, R. Behringer, D. Dickmanns, T. Hildebrandt, M. Maurer, F. Thomanek, J. Schiehlen. The seeing passenger car 'VaMoRs-P'. In *Procs. of the Intelligent Vehicles Symposium 1994* [42].
- [20] E. D. Dickmanns, T. Christians. Relative 3-d state estimation for autonomous visual guidance of road vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 7:113–123, 1991.

- [21] E. D. Dickmanns, B. Mysliwetz. Recursive 3-D state and relative ego-state recognition. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):199–213, Februar 1992.
- [22] G. Eberl. *Automatischer Landeanflug durch Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1987.
- [23] C. Fagerer, D. Dickmanns, E. D. Dickmanns. Visual grasping with long delay time of a free floating object in orbit. *Autonomous Robots*, 1(1):53–68, 1994.
- [24] U. Franke, F. Böttiger, Z. Zomotor, D. Seeberger. Truck Platooning in Mixed Traffic. In *Procs. of the Intelligent Vehicles Symposium 1995*, Detroit (MI), USA, 1995.
- [25] U. Franke, S. Görzig, F. Lindner, D. Mehren, F. Paetzold. Steps towards an intelligent vision system for driver assistance in urban traffic. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Boston, USA, November 1997.
- [26] U. Franke, S. Mehring, A. Suissa, S. Hahn. The Daimler-Benz Steering Assistant - a spin-off from autonomous driving. In *Procs. of the Intelligent Vehicles Symposium 1994* [42].
- [27] S. Fürst, E. D. Dickmanns. A vision based navigation system for autonomous aircraft. In *5th Int. Conf. on Intelligent Autonomous Vehicles IAS-5*, Sapporo, Japan, Juni 1998.
- [28] S. Fürst, S. Werner, E. D. Dickmanns. A single-computer HWIL simulation facility for real-time vision systems. In *Procs. SPIE Conf. on Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-loop Testing III, AeroSense '98*, Orlando (FL), April 1998.
- [29] A. Gelb, J. F. Kaspar, R. A. Nash, C. F. Price, A. A. Sutherland. *Applied Optimal Estimation*. The MIT Press, 12. Auflage, 1992.
- [30] R. Gregor. Akquisition und Darstellung von Umweltdaten zur visuell gestützten Fahrzeugführung. Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1994.

- [31] R. Gregor et al. A low cost vision system for automotive applications. In *30th International Symposium on Automotive Technology & Automation*, Florence, Italy, 1997.
- [32] R. Gregor. Off-line learning from perception for improving mission performance of autonomous vehicles. In *Procs. of the 1998 IEEE Conference on Intelligent Vehicles* [43].
- [33] R. Gregor. Wissensbasierte Navigation für autonome Straßenfahrzeuge. Interner Bericht UniBwM/LRT/WE13/IB 98-5, Universität der Bundeswehr München, 1998.
- [34] S. Hahn. Automation of Driving Functions - Future Development, Benefits and Pitfalls. In *Procs. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 1996*, 309–312, Tokyo, September 1996.
- [35] D. Harel. Statecharts: A visual formalism for complex systems. In M. Sintzoff (Ed.), *Science of Computer Programming*, Band 8, 231–274. North-Holland, Amsterdam, 1987.
- [36] M. H. Hebert, C. Thorpe, A. Stentz (Eds.). *Intelligent Unmanned Ground Vehicles - Autonomous Navigation at Carnegie Mellon*. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [37] F. Heimes. *Sichtsystem gestützte Fahrerassistenz im innerstädtischen Straßenverkehr*. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- [38] F. Heimes, K. Fleischer, H.-H. Nagel. Automatic generation of intersection models from digital maps for vision-based driving on innercity intersections. In *Procs. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000* [44], 498–503.
- [39] C. Hock. *Wissensbasierte Fahrzeugführung mit Landmarken für autonome Roboter*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1994.
- [40] U. Hofmann. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Angekündigt für 2002.
- [41] S. Hötzl. Ein flächenbasiertes Verfahren zur Erkennung einer Fahrspur mit Hilfe von multiplen Skalen. Interner Bericht UniBwM/LRT/WE 13/IB 94-10, Universität der Bundeswehr München, Dezember 1994.



- 
- [42] IEEE Industrial Electronics Society. *Procs. of the Intelligent Vehicles Symposium*, Paris, Frankreich, Oktober 1994.
- [43] IEEE Industrial Electronics Society. *Procs. of the Intl. Conf. on Intelligent Vehicles*, Stuttgart, Germany, Oktober 1998.
- [44] IEEE Intelligent Transportation Systems Council. *Procs. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Detroit (MI), USA, Oktober 2000.
- [45] T. Jochem, D. A. Pomerleau, C. Thorpe. Vision guided lane transition. In *IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, Detroit (MI), USA, 1995.
- [46] T. M. Jochem, D. A. Pomerleau, C. E. Thorpe. Vision-based neural network road and intersection detection and traversal. In *IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*, Pittsburgh, USA, August 1995.
- [47] M. Juberts, K. Murphy, M. Nashman, H. Scheiderman, H. Scott, S. Szabo. Development and Test Results for a Vision-Based Approach to AVCS. In *Proceedings of the 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation*, Aachen, Germany, sept 1993.
- [48] L. N. Kanal (Ed.). *Search in artificial intelligence*. Springer Verlag, New York, 1988.
- [49] W. Kinzel. *Präattentive und attentive Bildverarbeitungsschritte zur visuellen Erkennung von Fußgängern*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1994.
- [50] K.-D. Kuhnert. *Zur Echtzeit-Bildfolgeanalyse mit Vorwissen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1988.
- [51] J. Köseckà, R. Blasi, C. J. Tayler, J. Malik. Vision-based lateral control of vehicles. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Boston, USA, November 1997.
- [52] A. Lacaze, Y. Moscovitz, N. DeClaris, K. Murphy. Path Planning for Autonomous Vehicles Driving Over Rough Terrain. In *Proceedings of the ISIC/CIRA/ISAS '98 Conference*, Gaithersburg, MD, sept, 14-17 1998.
- [53] K. R. Larsen, K. Olson. Intersection navigation for unmanned ground vehicles. In *Procs. of the SPIE*, Band 2738, 14–25, 1997.

- [54] M. Lützeler. *Fahrbahnerkennung zum Manövrieren auf Wegenetzen mit aktivem Sehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 2002.
- [55] N. Luftfahrt. Luftfahrtnorm LN 9300, 1970. Blatt 1, Flugmechanik.
- [56] M. Lützeler, S. Baten. Road recognition for a tracked vehicle. In *Procs. SPIE Conf. on Enhanced and Synthetic Vision, AeroSense '00*, Orlando (FL), April 2000. SPIE.
- [57] M. Maurer. *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 2000.
- [58] M. Maurer, R. Behringer, S. Fürst, F. Thomanek, E. D. Dickmanns. A Compact Vision System for Road Vehicle Guidance. In *Proc. of the 13th International Conference on Pattern Recognition*, Vienna, 1996.
- [59] H. Meissner. *Steuerung dynamischer Systeme aufgrund bildhafter Informationen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1982.
- [60] A. Meystel, Y. Moscovitz, Messina, E. Mission Structure for an Unmanned Vehicle. In *Proceedings of the ISIC/CIRA/ISAS '98 Conference*, Gaithersburg, MD, sept, 14-17 1998.
- [61] N. Müller. Vorsteuermanöver zur Kurvenfahrt für ein durch Echtzeitbildverarbeitung autonomes Straßenfahrzeug. Interner Bericht UniBwM/LRT/WE 13/IB/91-3, Universität der Bundeswehr München, 1991.
- [62] G. E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8), April 1965.
- [63] N. Müller, S. Baten. Image processing based navigation with an autonomous car. In *Proc. Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, Karlsruhe, März 1995.
- [64] N. Müller. *Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Straßenfahrzeug*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1996.
- [65] R. Murray, L. Zexiang, S. Shankar Sastry. *A mathematical introduction to robot manipulation*. CRC press, Boca Raton, Florida, 1993.

- [66] B. Mysliwetz. *Parallelrechner-basierte Bildfolgen-Interpretation zur autonomen Fahrzeugsteuerung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1990.
- [67] H. Nagel, W. Enkelmann, G. Struck. FhG-Co-Driver: From Map-Guided Automatic Driving by Machine Vision to a Cooperative Driver Support. In *Mathematical and Computer Modeling, Vol. 22*, 1995.
- [68] B. Oestereich. *Objektorientierte Softwareentwicklung*. R. Oldenburg Verlag, München Wien, 3. Auflage, 1997.
- [69] K.-D. Otto. Einführung in die lineare Schätztheorie. Interner Bericht UniBwM/LRT/WE13/IB 88-1, Universität der Bundeswehr München, 1988.
- [70] R. P. Paul. *Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control*. The MIT-Press, Cambridge, Mass., 1981.
- [71] M. Pellkofer, E. D. Dickmanns. EMS-Vision: Gaze control in autonomous vehicles. In *Procs. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000* [44].
- [72] D. A. Pomerleau. *Neural Network Perception for Mobile Robot Guidance*. Dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, February 1992.
- [73] D. A. Pomerleau. Ralph: Rapidly adapting lateral position handler. In *IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, Detroit (MI), USA, 1995.
- [74] Richtlinien für die Anlage von Straßen. Planfreie Knotenpunkte (RAS-K-2), 1976.
- [75] Richtlinien für die Anlage von Straßen. Teil Linienführung (RAS-L), 1984.
- [76] Richtlinien für die Anlage von Straßen. Plangleiche Knotenpunkte (RAS-K-1), 1988.
- [77] A. Rieder. *Fahrzeuge sehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 2000.
- [78] R. Schell. *Bordautonomer automatischer Landeanflug aufgrund bildhafter und inertialer Meßdatenauswertung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1992.
- [79] J. Schick. *Gleichzeitige Erkennung von Form und Bewegung durch Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1993.

- [80] J. Schiehlen. *Kameraplattform für aktiv sehende Fahrzeuge*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1995.
- [81] M. Schmid. *3D-Erkennung von Fahrzeugen in Echtzeit aus monokularen Bildfolgen*, Band 293 aus *Fortschrittsberichte VDI, Reihe 10: Informatik/Kommunikationstechnik*. VDI Verlag, 1994.
- [82] R. Schmidt. *Einheitliches Bezugssystem in Deutschland und Europa - ein zusammenfassender Überblick*. BDVI-Forum 3/1992. Bonn, 1992.
- [83] M. Schraut. *Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme, 2000.
- [84] Schrödter. *GPS Satelliten-Navigation*. Franzis-Verlag GmbH. Poing, 1994.
- [85] I. Schwartz. PRIMUS: autonomous driving robot for military applications. In *Proc. SPIE Conf. on Unmanned Ground Vehicle Technology II, AeroSense '00*, Orlando (FL), April 2000. SPIE.
- [86] C. Shoemaker. The Future of Unmanned Ground Vehicles. In *30th International Symposium on Automotive Technology & Automation*, Florence, Italy, 1997.
- [87] C. Shoemaker, J. Bornstein. Overview and Update of the Demo II Experimental Unmanned Vehicle Program. In G. G. Gerhard, R. W. Gunderson, C. M. Shoemaker (Eds.), *Unmanned Ground Vehicle Technology II*, Band 4024 aus *Proc. SPIE*, 212–220, 04 2000.
- [88] K.-H. Siedersberger. Koordinaten und Koordinatensysteme für EMS-Vision. Interner Bericht LRT/WE13/IB 98-2, Universität der Bundeswehr München, 1999.
- [89] K.-H. Siedersberger. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Angekündigt für 2002.
- [90] K.-H. Siedersberger, M. Pellkofer, M. Lützel, E. D. Dickmanns, A. Rieder, R. Mandelbaum, L. Bogoni. Combining EMS-Vision and Helicopter Stereo for Obstacle Avoidance of Autonomous Vehicles. In *ICVS01*.

- 
- [91] B. Spiegel. *Die obere Hälfte des Motorrads, Über die Einheit von Fahrer und Maschine*. Motorbuch Verlag, Stuttgart, 1999.
- [92] Statistisches Bundesamt. Datenreport 1999, Zahlen und Fakten über die Bundesrepublik Deutschland, 1999.
- [93] A. Stentz. Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments. In *Proc of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 1994.
- [94] C. J. Taylor, J. Malik, J. Weber. A real-time approach to stereopsis and lane-finding. In *IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, Tokyo, Japan, September 1996.
- [95] F. Thomanek. *Visuelle Erkennung und Zustandsschätzung von mehreren Straßenfahrzeugen zur autonomen Fahrzeugführung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1996.
- [96] C. Thorpe, T. Jochem, D. A. Pomerleau. Automated highways and the free agent demonstration. In *International Symposium on Robotics Research*, October 1997.
- [97] V. v.Holt. Tracking and classification of overtaking vehicles on Autobahnen. In *Procs. of the Intelligent Vehicles Symposium 1994* [42], 314–19.
- [98] C. Voy, L. Hamm, F. Panik, D. Reister. *PROMETHEUS, ein europäisches Forschungsprogramm zur Gestaltung des Straßenverkehrs*. Nummer 612 in Elektronik im Kraftfahrzeugbau. VDI-Berichte, 1986.
- [99] S. Werner. Schätzung von Zustandsgrößen im Versuchsfahrzeug VaMP durch Auswertung von Inertialsensoren. Interner Bericht LRT/WE13/IB 96-3, Universität der Bundeswehr München, 1996.
- [100] S. Werner. *Maschinelle Wahrnehmung für den bordautonomen automatischen Hubschrauberflug*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1997.
- [101] P. H. Winston (Ed.). *Künstliche Intelligenz*. Addison-Wesley Verlag (Deutschland) GmbH, Bonn, 1987.
- [102] H.-J. Wünsche. Verbesserte Regelung eines dynamischen Systems durch Auswertung redundanter Sichtinformation unter Berücksichtigung der

- Einflüsse verschiedener Zustandsschätzer und Abtastzeiten. Interner Bericht LRT/WE13a/FB 83-1, Universität der Bundeswehr München, 1983.
- [103] H.-J. Wünsche. *Bewegungssteuerung durch Rechnersehen*, Band 20 aus *Fachberichte Messen - Steuern - Regeln*. Springer Verlag, Berlin, 1988. Dissertation. Universität der Bundeswehr München. Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik.
- [104] A. Zapp. *Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1988.
- [105] W. Zinkl. *Fahrzeug DB L508D VaMoRs - Umrüstung der Servo-Steuerung. Technischer Report*. Ing.-Büro W. Zinkl, Eurasburg, 1993.
- [106] Z. Zomotor, U. Franke. Sensor fusion for improved vision based lane recognition and object tracking with range-finders. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Boston, USA, November 1997.

# A Kinematische Begrenzung: Der Wendekreis

Radfahrzeuge können im allgemeinen im Stand nicht gieren, so daß ein minimaler Wendekreis mit dem Radius  $r_{min}$  existiert. An Abzweigen, deren Radius  $r_{AB}$  kleiner ist als dieser minimale Wenderadius, muß daher eine Überprüfung vorgenommen werden, ob ein Abbiegemanöver vom Fahrzeug ohne Rangiervorgang durchgeführt werden kann. Ansonsten dürfen, sofern ein derartiges Manöver noch nicht autonom durchgeführt werden kann, derartige Abzweige bei der Missionsplanung nicht berücksichtigt werden. Im Vergleich zu der durch den Abzweigradius  $r_{AB}$  und die Fahrzeugbreite  $b_{FZG} = (2 \cdot y_{GR})$  vorgegebenen Grenzlinie für die Bewegung des Hinterachsmittelpunktes entsteht ein zusätzlicher Breitenbedarf; das Fahrzeug muß sowohl beim Einfahren ( $y_{D1}$ ) als auch beim Ausfahren ( $y_{D2}$ ) ausholen. Die Bahnkurve des Hinterachsmittelpunktes und die Grenzlinie berühren sich dabei im Punkt D. Die vom Fahrzeug erfahrene Winkeländerung beträgt dabei  $\psi_D$ . Die maximal nutzbare Fahrbahnbreite wird durch die Breite der befahrbaren Spuren (ohne bauliche Trennung durch Verkehrsinseln oder Leitplanken) auf der zuführenden und der abzweigenden Straße begrenzt. Abbildung A.1 soll die vorliegende Situation verdeutlichen.

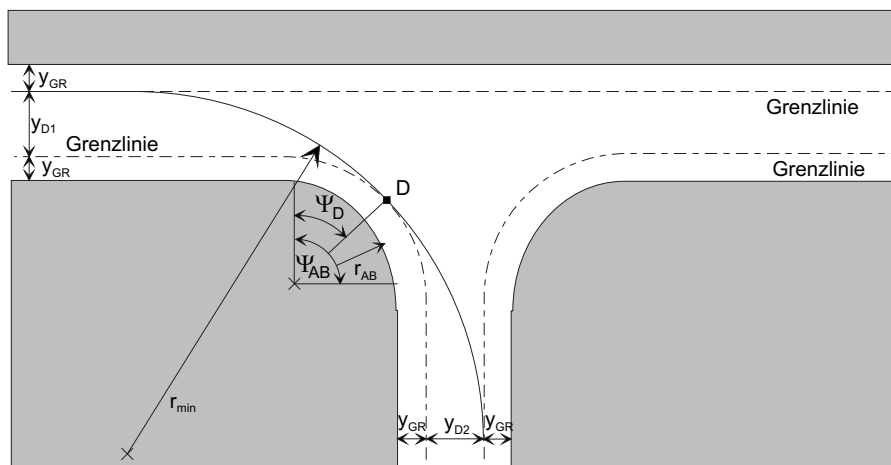


Abb. A.1: Kinematische Begrenzung beim Abbiegen

In [61] sind die Formeln für den zusätzlichen Breitenbedarf  $y_{D1}$  und  $y_{D2}$  hergeleitet worden, daher wird hier auf eine Herleitung verzichtet.

$y_{D1}$  und  $y_{D2}$  ergeben sich mit  $r'_{AB} = r_{AB} + y_{GR}$  zu:

$$y_{D1} = (r_{min} - r'_{AB}) \cdot (1 - \cos \psi_D) \quad (\text{A.1})$$

$$y_{D2} = (r_{min} - r'_{AB}) \cdot (1 - \cos(\psi_{AB} - \psi_D)) \quad (\text{A.2})$$

Die maximal möglichen Werte für  $y_{D1}$  und  $y_{D2}$  werden aus den im Umweltmodell "Straßen" für die zuführende und abzweigende Straße bekannten Werten für die Breite aller befahrbaren Spuren und der bekannten halben Fahrzeugbreite  $y_{GR}$  errechnet:

$$y_{D1m} = -2 \cdot y_{GR} + \sum b_{zi} \quad (\text{A.3})$$

$$y_{D2m} = -2 \cdot y_{GR} + \sum b_{ai} \quad (\text{A.4})$$

Formel A.3 in A.1 eingesetzt und nach  $\psi_D$  aufgelöst ergibt:

$$\psi_D = \arccos\left(1 - \frac{y_{D1m}}{r_{min} - r'_{AB}}\right) \quad (\text{A.5})$$

für das maximal mögliche Ausholen beim Einfahren in den Abzweig. Durch  $\psi_D$  ist der Breitenbedarf beim Ausfahren bereits festgelegt. Als notwendige Bedingung für die Durchführbarkeit des Abbiegemanövers ergibt sich nun mit dem berechneten  $\psi_D$ :

$$y_{D2m} \stackrel{!}{\geq} y_{D2} \quad (\text{A.6})$$

In abzweigende Straßen, die diese Breite nicht aufweisen, kann ohne Rangieren nicht abgelenkt werden. Da dieses Manöver derzeit noch nicht autonom durchgeführt werden kann, müssen diese Abzweige bei der Missionsplanung ausgespart werden.



## B Missionsdurchführung

### B.1 Hintergrundwissensbasen

Für die Durchführung autonomer Testfahrten wurden Hintergrundwissensbasen für die Wegenetze auf dem Truppenübungsplatz in Pfullendorf und dem Campus der Universität der Bundeswehr München erstellt.

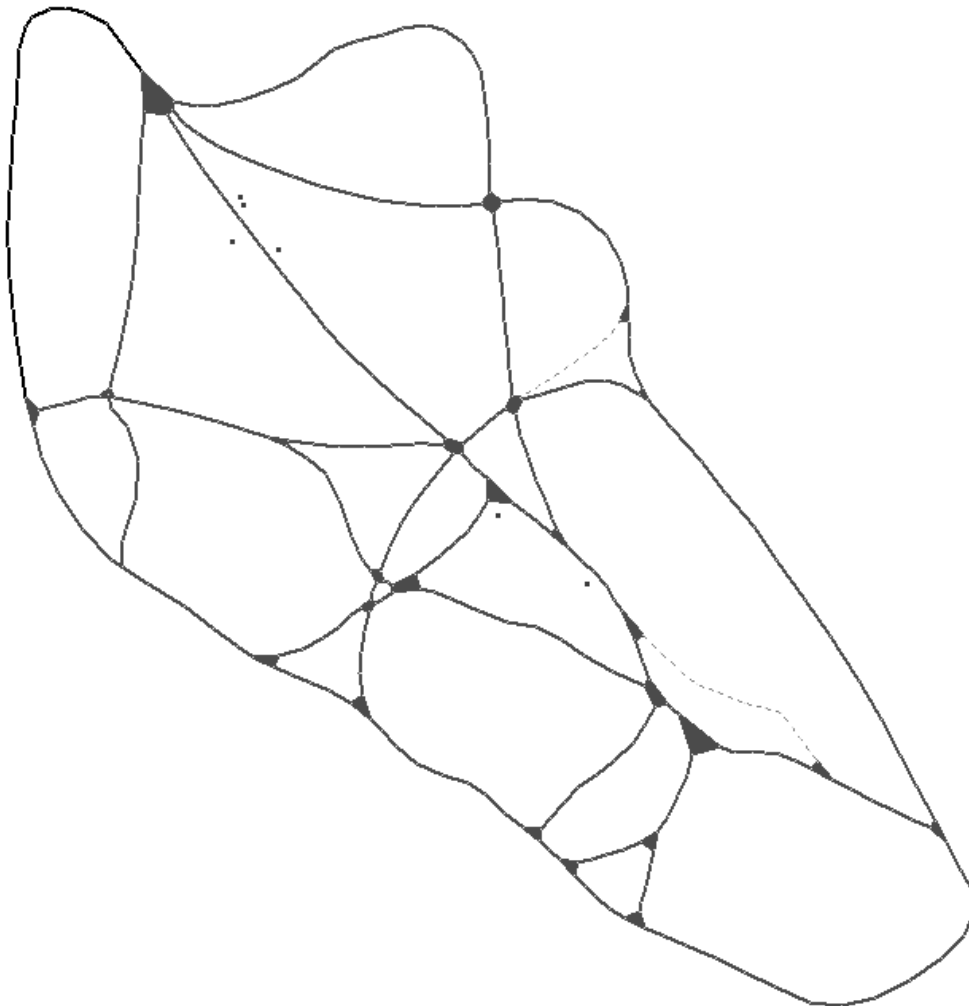


Abb. B.1: Karte des Truppenübungsplatzes Pfullendorf

Abbildung B.1 zeigt die Karte für den Truppenübungsplatz Pfullendorf. Das Wegenetz besteht aus 44 Straßensegmenten und 25 Knotenpunkten.

## B.2 Missionsplan für eine komplexe Fahrmission

EMS-Vision Mission Plan

Generated on Tue Dec 11 09:13:38 2001

[Units]

TranslationUnit=[m]

TimeUnit=[s]

SpeedUnit=[km/h]

[Maps]

Roadmap=U:/ini/Mission/maps/FlugplatzNbb.rds

Landmarkmap=U:/ini/Mission/maps/FlugplatzNbb.lmk

Obstaclemap=U:/ini/Mission/maps/FlugplatzNbb.obs

[PlanInfo]

Criterion = fastest

Duration = 501

Distance = 597

NoOfIntersections = 2

HALT

UNTIL DONE Dur[20.0] NEXT

FOLLOW\_ROAD Vel[10.0] Road\_1

AND DETECT CROSSROAD Road\_2 ON Intersection\_1 Dist[45.0]

UNTIL DONE Len[100.0,0.0] LAST

INTERSECTION LEFT Intersection\_1 ON Road\_2 Vel[10.0]

UNTIL DONE Len[10.0,0.0] NEXT

FOLLOW\_ROAD Vel[10.0] Road\_2

UNTIL DONE Len[20.0, 0.0] NEXT

LEAVE\_ROAD RIGHT NEXT

WAYPOINT [11.6428814, 48.0770950]

UNTIL DONE Dist[5.0] NEXT

WAYPOINT [11.6427135, 48.0772285]

UNTIL DONE Dist[5.0] NEXT

WAYPOINT [11.6425085, 48.0772934]

```
UNTIL DONE Dist[5.0] NEXT
WAYPOINT [11.6423302, 48.0773468]
UNTIL DONE Dist[5.0] NEXT
WAYPOINT [11.6420491, 48.0773868]
UNTIL DONE Dist[5.0] NEXT
WAYPOINT [11.6418367, 48.0774002]
UNTIL DONE Dist[5.0] NEXT
WAYPOINT [11.6416683, 48.0772304]
UNTIL DONE Dist[5.0] NEXT
WAYPOINT [11.6415799, 48.0769272]
AND DETECT CROSSROAD Road_2 Dist[35.0]
UNTIL DONE Dist[0.0] NEXT
ENTER_ROAD Road_2 LEFT
FOLLOW_ROAD Vel[7.0] Road_2
UNTIL DONE Len[120.0,0.0] NEXT
FOLLOW_ROAD Vel[5.0] Road_2
AND DETECT CROSSROAD Road_1 ON Intersection_1 Dist[45.0]
UNTIL DONE Len[60.0, 0.0] NEXT
INTERSECTION STRAIGHT Intersection_1 ON Road_3 Vel[5.0]
UNTIL DONE Len[10.6, 0.0] NEXT
FOLLOW_ROAD Vel[5.0] Road_3
UNTIL DONE Len[25.0, 0.0] NEXT
LEAVE_ROAD LEFT NEXT
WAYPOINT [11.6445238, 48.0774649]
UNTIL DONE Dist[5.0] NEXT
HALT
UNTIL DONE Dur[20.0] NEXT
STOP
```



## C Das gemittelte Krümmungsmodell

Bei Verwendung des gemittelten Krümmungsmodell werden für die innerhalb des Vorausschaubereichs der Kameras liegenden Straße die Krümmungsparameter ( $c_{0hm}$  und  $c_{1hm}$ ) einer Klothoide geschätzt, die in der Entfernung  $L_v$  zum Fahrzeugschwerpunkt dieselbe laterale Ablage  $\Delta y(L_v)$  erzeugt. Abbildung C.1 verdeutlicht diesen Zusammenhang: zwei Straßensegmente, eine Gerade ( $c_0 = 0$ ;  $c_1 = 0$ ) auf der sich das Fahrzeug befindet, und eine Kurve ( $c_0 = 0$ ;  $c_1 \neq 0$ ) liegen innerhalb der Vorausschauentfernung  $L_v$ . Die Kurve wird bis zu einer Länge  $l_c$  eingesehen. Innerhalb dieser Länge führt die Kurve zu einer lateralen Ablage von  $\Delta y_c$ . Die durch die gemittelte Klothoide über die Vorausschauentfernung  $L_v$  bewirkte Ablage  $\Delta y_{cm}$  ist gleich der über die ‘Eindringtiefe’  $l_c$  des vorderen Segments in den Sichtbereich der Kamera auftretenden Querablage  $\Delta y_c$ .

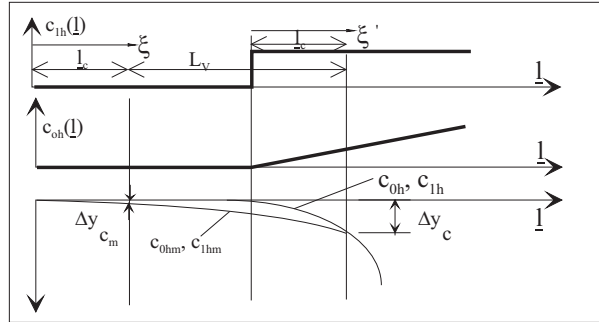


Abb. C.1: Die gemittelte Klothoide

Die Herleitung des Ansatzes wurde durch Dickmanns [16] ausführlich beschrieben und wird daher nicht weiter ausgeführt.

Für die Berechnung der gemittelten Größen werden zwei Bereiche betrachtet:

Im Intervall  $[0 \leq l_c \leq L_v]$  berechnet sich  $c_{1hm}$  zu:

$$c_{1hm}(\xi) = c_{1hm}(0)e^{-3\xi} + c_{1h} \left[ \xi^2 - \frac{2}{3}\xi + \frac{2}{9}(1 - e^{-3\xi}) \right], \quad (C.1)$$

mit der auf den Vorausschaubereich  $L_v$  normierten Eindringtiefe  $l_c$  als Laufkoordinate

$$\xi = l_c/L_v. \quad (\text{C.2})$$

Für das Intervall  $[l_c \geq L_v]$  wird eine neue Laufkoordinate  $\xi' = \xi - 1$  eingeführt. Für  $c_{1hm}$  ergibt sich:

$$c_{1hm}(\xi') = c_{1h}(1 - 0.455e^{-3\xi'}). \quad (\text{C.3})$$

Die durch ein Klothoidensegment hervorgerufene Änderung des Bahnwinkels  $\Delta\chi_c$  ergibt sich in Anwendung der Definition für die Krümmung  $c = d\chi/dl$  als Integral der Krümmung über der Lauflänge zu:

$$\Delta\chi_c = \int_0^{\Delta l} c(\lambda)d\lambda = c_0 \cdot \Delta l + c_1 \cdot \frac{\Delta l^2}{2} \quad (\text{C.4})$$

Der Verlauf einer Klothoide im kartesischen Koordinatensystem innerhalb eines Wegstückes  $l$  ergibt sich für kleine Winkeländerungen  $\Delta\chi$  zu:

$$\Delta x = \Delta l \quad (\text{C.5})$$

$$\Delta y = \frac{1}{2} \cdot c_0 \cdot \Delta l^2 + \frac{1}{6} \cdot c_1 \cdot \Delta l^3; \quad (\text{C.6})$$

Abbildung C.2 zeigt beispielhaft den Verlauf der horizontalen Krümmung  $c_{0h}$  und des zugehörigen Schätzwertes  $c_{0hm}$  für eine Folge von 5 Straßensegmenten.

Die Klothoidenparameter für die 5 Straßensegmente gemäß dem Umweltmodell "Straßen" sind in Tabelle C.1 gezeigt.

Tabelle C.1: Klothoidenparameter zu Abbildung C.2

|       | $c_0$ in $[1/m]$ | $c_1$ in $[1/m^2]$ | Länge $L_s$ in $[m]$ |
|-------|------------------|--------------------|----------------------|
| $S_1$ | 0                | 0                  | 100                  |
| $S_2$ | 0                | 0.0002             | 100                  |
| $S_3$ | 0.02             | 0                  | 100                  |
| $S_4$ | 0.02             | -0.0001            | 200                  |
| $S_5$ | 0                | 0                  | 50                   |

Vergleicht man den in Abbildung C.2 dargestellten Verlauf der Schätzgrößen  $c_{0hm}$  mit dem realen Verlauf von  $c_{0h}$ , lassen sich mehrere Feststellungen treffen:

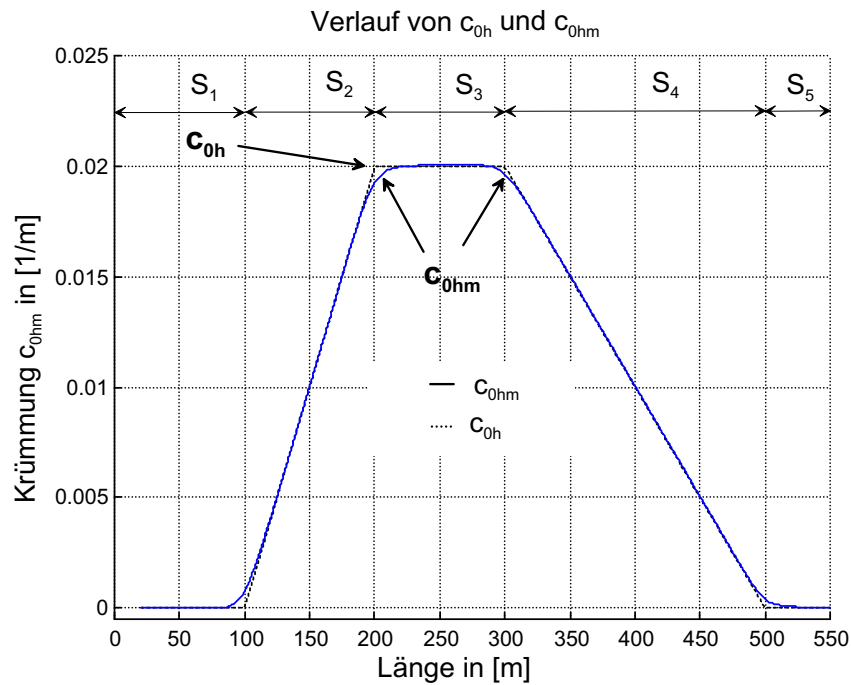


Abb. C.2: Verlauf der horizontalen Krümmung

- Ab der Entfernung  $L_v$  des Fahrzeugschwerpunktes zum Segmentübergang ist ein Anstieg (positiv oder negativ) der Schätzgröße zu verzeichnen.
- Ab einer Eindringtiefe  $l_c = 2L_v$  des Fahrzeugschwerpunktes in das Straßen-segment entspricht die Schätzgröße dem realen Wert.

Um daraus eine ortsfeste Modellierung einzelner Klothoiden zu erhalten, muß der Verlauf von  $c_{0hm}$  in Bereiche mit konstanter Steigung, also mit  $c_{1hm} = const.$ , unterteilt werden.





## Liste der verwendeten Abkürzungen

|         |   |
|---------|---|
| ACC     | ... Adaptive Cruise Control                                     |
| ALV     | ... Autonomous Land Vehicle                                     |
| AMS     | ... Autonome Mobile Systeme                                     |
| ARGO    | ... kein Akronym  |
| AutoNav | ... Autonomous Navigation                                       |
| AVCS    | ... Advanced Vehicle Control Systems                            |
| CCD     | ... Charge Coupled Device                                       |
| CMU     | ... Carnegie-Mellon-University                                  |
| CORDIS  | ... Community Research and Development Information Service      |
| D2      | ... 2. Deutsche Spacelab Mission                                |
| DARVIN  | ... Driver Assistance using Realtime Vision for Innercity areas |
| DGPS    | ... Differential Global Positioning System                      |
| DBS     | ... Dreiachsen-Bewegungs-Simulator                              |
| DOB     | ... Dynamische Objektdaten-Basis                                |
| DEMETER | ... Digital Electronic Mapping of the European Territory        |
| DFAD    | ... Digital Feature Analysis Data                               |
| DLR     | ... Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt          |
| DRM     | ... Digital Road Map  |
| DTED    | ... Digital Terrain Elevation Data                              |
| DW-R    | ... Digitalisierter Wiesel - Roboter                            |
| EBK     | ... Entfernungsbildkamera                                       |
| EDRA    | ... European Digital Road Map Association                       |
| EG      | ... Europäische Gemeinschaft                                    |
| EKF     | ... Erweitertes Kalman-Filter                                   |
| FE      | ... Fast Ethernet   |
| GDF     | ... Geographic Data File  |
| GOLD    | ... Generic Obstacle and Lane Detection                         |
| GPS     | ... Global Positioning System                                   |
| HMMWV   | ... High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle                  |
| IITB    | ... Institut für Informations- und Datenverarbeitung            |

|            |   |
|------------|---|
| IVHS       | ... Intelligent Vehicle Highway System  |
| KI         | ... Künstliche Intelligenz  |
| LKW        | ... Last-Kraft-Wagen  |
| LN         | ... Luftfahrtnorm   |
| MaK        | ... Maschinenbau aus Kiel   |
| MarVEye    | ... Multi-Focal active-reactive Vehicle Eye   |
| MIPS       | ... Million Instructions Per Second   |
| NASA       | ... National Aeronautics and Space Administration                                       |
| NN         | ... Normal Null (Meeresspiegel)   |
| PATH       | ... Partners for Advanced Transit and Highways  |
| PC         | ... Personal Computer   |
| PE         | ... photometrischen Eigenschaften   |
| PKW        | ... Personen-Kraft-Wagen  |
| PRIMUS     | ... Programm Intelligenter Mobiler Unbemannter Systeme                                  |
| PROMETHEUS | ... Program for an European Traffic with Highest Efficiency<br>and Unprecedented Safety |
| PVS        | ... Personal Vehicle System   |
| RAID       | ... Redundant Array of Independent Disks  |
| RALPH      | ... Rapidly Adapting Lateral Position Handler   |
| ROTEX      | ... Roboter-Technologie-Experiment  |
| RTCM       | ... Radio Technical Commission for Maritime Services                                    |
| SCI        | ... Scalable Coherent Interface   |
| SCSI       | ... Small Computer System Interface   |
| TFEDRM     | ... Task Force European Digital Road Map  |
| UniBwM     | ... Universität der Bundeswehr München  |
| UGV        | ... Unmanned Ground Vehicle   |
| US         | ... United States   |
| UTA        | ... Urban Traffic Assistant   |
| UTM        | ... Universale Transversale Mercator Projektion   |
| VaMoRs     | ... Versuchsfahrzeug zur autonomen Mobilität und Rech-<br>nersehen                      |
| VaMP       | ... VaMoRs-PKW  |
| WGS84      | ... World Geodetic System of 1984   |

# Index

- A\*-Algorithmus, 83
- Dynamische-Objekt**daten-Basis** DOB, 26
- Bewertungsfunktion, 73
- Digital Feature Analysis Data, 15
- Digital Terrain Elevation Data, 15
- EMS-Vision, 23
- Erkennungszustand, 44
- Fähigkeiten, 39
- gemittelt**es** Krümmungsmodell, 147
- Geographic Data File, 16
- Graph, 71
- Klassenhierarchie, 41
- Kontrollfluß, 43
- Koordinatensysteme, 51
- Landmarken, 62
- Missionsüberwachung, 91
- Multiple Skalen, 91
- Sensorkonzept, 23
- Szenenbaum, 26
- Transputer, 31
- Umweltmodell, 49
- Unified Modeling Language, 41
- Universale Transversale Merkator Pro-  
jektion, 52
- Verhaltensentscheidung, 28
- Wahrnehmungsmodul, 27
- Wissensbasen, 49
- Zustandskarten, 44