

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik

Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen

Markus Maurer

Dissertation

Vorsitzender des Promotionsausschusses:	Prof. Dr. phil. B. Färber
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. E.D. Dickmanns
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. R. Onken
Tag der Prüfung:	21. Juli 2000
Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:	Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Neubiberg, den 27. Juli 2000

Kurzfassung

Die Fähigkeit zu sehen wird die Kraftfahrzeuge in den nächsten Jahrzehnten grundlegend verändern. In der vorliegenden Dissertation wird ein hardwareunabhängiges Gesamtkonzept für die Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen vorgestellt, das an der Universität der Bundeswehr aus langjähriger praktischer Erfahrung mit sehenden Versuchsfahrzeugen abstrahiert wurde. Die entwickelten Ansätze wurden in den Versuchsfahrzeugen VaMP und VaMoRs erfolgreich getestet, die international bekannt wurden durch automatisch quer- und längsgeführte Fahrten auf europäischen Autobahnen. Entscheidungsträgern bietet die Arbeit eine Einführung in kommende Aufgabenstellungen, Forschern und Entwicklern ein fundiertes Konzept, das die hierarchische, verhaltensorientierte Systemarchitektur, die objekt-orientierte Wissensrepräsentation, die automatische Generierung von Verhalten, die situationsgerechte, maschinelle Verhaltensentscheidung und die flexible Automatisierung umfaßt.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik (ISF) der Universität der Bundeswehr München.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. E.D. Dickmanns, der die Arbeit anregte, mit großem Interesse begleitete und mit viel Engagement förderte. Herrn Prof. Dr. R. Onken danke ich herzlich für die mehrjährige Begleitung und Unterstützung meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferats.

Für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung von Wahrnehmungsmodulen danke ich meinen Kollegen Dr. R. Behringer, Dr. D. Dickmanns, S. Fürst, R. Gregor, U. Hofmann, V. von Holt, M. Lützeler, A. Rieder, Dr. F. Thomanek und Dr. S. Werner. Besonders zu Dank verpflichtet bin ich T. Hildebrandt und K.-H. Siedersberger für die exzellente Unterstützung beim Aufbau des Versuchsfahrzeugs VaMP. Wichtig waren für mich ausführliche Diskussionen mit O. Nilubol, D. Schädlich, K.-H. Siedersberger und R. Vollmar, die Studien- und Diplomarbeiten zur Automatisierung mit Rechnersehen anfertigten, und mit meinen Kollegen Dr. K.-D. Otto und Dr. A. Schubert. F. Pieper und H.-G. Wein danke ich für das große Engagement, mit dem sie Mensch-Maschine-Schnittstellen für die flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen entwickelt haben, Herrn Dr. W. Fohrer für die gründliche Durchsicht der Arbeit. Mein Dank gilt allen Mitarbeitern des Instituts, besonders des Sekretariats und der Werkstatt, für die gute Zusammenarbeit.

Meiner Frau danke ich für Ihre aktive Unterstützung und Ihr Verständnis für diese Arbeit.

Böhmfeld, im März 2000

für Monika und Thomas

Inhaltsverzeichnis

I	Einführung	1
1	Einleitung	2
1.1	Motivation grundlegender Konzepte	3
1.1.1	Automatisierung mit Rechnersehen	4
1.1.2	Flexible Automatisierung	4
1.1.3	Zum Gebrauch des Begriffs ‘Autonomie’	5
1.2	Entwicklungshintergrund am ISF	6
1.2.1	Wahrnehmung und Verhaltensgenerierung mit dem 4D-Ansatz	6
1.2.2	Projektrahmen	9
1.3	Struktur und Beitrag der Arbeit	10
2	Stand der Technik	12
2.1	Amerikanische Gruppen	13
2.1.1	Carnegie Mellon University	13
2.1.2	National Institute of Standards and Technology	16
2.1.3	Ohio State University	16
2.1.4	University of California, Berkeley	17
2.2	Asiatische Gruppen	17
2.2.1	Mazda	17
2.2.2	Ministerium für internationalen Handel und Industrie	18
2.2.3	Mitsubishi	18
2.2.4	Nissan	18
2.2.5	Toyota	19

2.2.6	Universität Pohang und Hyundai	19
2.3	Europäische Gruppen	19
2.3.1	BMW	19
2.3.2	C-VIS	20
2.3.3	Daimler-Benz	20
2.3.4	Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung . .	22
2.3.5	Institut national de recherche en informatique et en automatique	23
2.3.6	Niedersächsisches Projekt ‘Autonomes Fahren’	23
2.3.7	Ungarische Akademie der Wissenschaften und Knorr-Bremse, Ungarn	24
2.3.8	Universität Parma	24
II	Ein System zur flexiblen Automatisierung von Kraftfahrzeugen	25
3	Funktionale Systemarchitektur	26
3.1	Der Mensch als Vorbild für autonome Systeme	27
3.1.1	Fertigkeitsbasiertes Verhalten	28
3.1.2	Regelbasiertes Verhalten	29
3.1.3	Wissensbasiertes Verhalten	29
3.1.4	Wissensrepräsentation	29
3.1.5	Vorbild für technische Systeme?	30
3.2	Ansätze zur Strukturierung komplexer Systeme	31
3.2.1	Theorie der hierarchischen Mehrebenensysteme	31
3.2.2	Theorie der intelligenten Führungssysteme	34
3.2.3	Zum Gebrauch des Begriffs ‘Intelligenz’	35
3.2.4	Echtzeitfähige Führungssysteme	37
3.2.5	Verhaltensbasierte Architekturen	38
3.3	Systemarchitektur für sehende autonome Fahrzeuge am ISF	40
3.3.1	Hardware-spezifische Ebene	40
3.3.2	4D-Ebene	42
3.3.3	Regelbasierte Ebene	44
3.3.4	Wissensbasierte Ebene	45

4	Modelle zur Generierung von Verhalten	47
4.1	Hierarchie der Beschreibungsebenen	48
4.1.1	Dynamische Modelle auf der 4D-Ebene	48
4.1.2	Implizites Modellwissen auf der hardware-spezifischen Ebene	50
4.1.3	Repräsentationsformen auf der regelbasierten Ebene	50
4.1.4	Symbole als integrale Repräsentation physikalischer Phänomene	54
4.1.5	Verknüpfung von regelbasierter und 4D-Ebene	55
4.2	Objektorientierte Modellierung	55
4.3	Repräsentation physikalischer Objekte	58
4.3.1	Straßen und Landmarken	58
4.3.2	Selbstrepräsentation für situationsgerechtes Verhalten	58
4.3.3	Fremdfahrzeuge	63
4.3.4	Fahrermodell	66
5	Fahrzeugführung	67
5.1	Struktur der Fahrzeugführung	67
5.1.1	Teilsysteme der Regelstrecke ‘Kraftfahrzeug’	68
5.1.2	Hierarchische Fahrzeugführung	69
5.1.3	Flexible Struktur zur Generierung von Verhalten	75
5.2	Überwachung der Regelkreise zur Laufzeit	75
5.2.1	Anforderungen an Regelkreise	75
5.2.2	Einschwingverhalten eines Regelkreises	76
5.2.3	Integralkriterien	77
5.3	Automatische Querführung	78
5.3.1	Automatische Querführung auf der 4D-Ebene	78
5.3.2	Überwachung der automatischen Querführung	83
5.4	Automatische Längsführung	84
5.4.1	Realisierung der Verhaltensweisen	85
5.4.2	Anforderungen an die Längsregelung	88

6	Situationsgerechte Verhaltensentscheidungen	90
6.1	Realisierte Lösungsansätze für sehende Straßenfahrzeuge	90
6.1.1	Verhaltensgenerierung im Versuchsfahrzeug Vita II von Daimler-Benz	91
6.1.2	Ansätze zur Verhaltensentscheidung im Straßenverkehr an der Carnegie Mellon University	92
6.1.3	Verhaltensentscheidungen für die Fahrzeuge der Universität der Bundeswehr	92
6.1.4	Kritik der Ansätze	93
6.2	Zentrale Entscheidungen	94
6.2.1	Zentrale Entscheidungsinstanz	98
6.2.2	Überwachung der Leistungsfähigkeit	101
6.2.3	Situationserfassung für die Fortbewegung	102
6.2.4	Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung	104
 III Hardware-spezifische Realisierungen und Ergebnisse		112
7	Systembeschreibung auf der hardware-spezifischen Ebene	113
7.1	Versuchsfahrzeuge für autonome Mobilität und Rechnersehen	113
7.1.1	Aufbau des Versuchsfahrzeugs VaMP	114
7.1.2	Elektronisch ansteuerbare Stellglieder	118
7.1.3	Rechner zur Fahrzeugansteuerung	119
7.1.4	Hardware-spezifische Regelkreise	121
7.2	Rechner und Prozesse	123
7.2.1	Transputer-basiertes System zur visuellen Wahrnehmung	124
7.2.2	Kompaktes Wahrnehmungssystem	126
7.2.3	Maschinelle Wahrnehmung und Verhaltensentscheidung mit Personalcomputern	126

8 Experimentelle Ergebnisse	134
8.1 Automatische Langstreckenfahrt	135
8.2 Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen	141
8.2.1 Hybrider adaptiver Tempomat	142
8.2.2 Automatische Notbremsung	145
8.2.3 Automatische Querführung	151
8.2.4 Autonome Missionen	155
9 Zusammenfassung und Ausblick	159
Literatur	162

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein hardwareunabhängiges Gesamtkonzept für die flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen vorgestellt, das aus langjähriger praktischer Erfahrung mit sehenden Versuchsfahrzeugen abstrahiert wurde. Das Konzept umfaßt eine hierarchische, verhaltensorientierte Systemarchitektur, die objekt-orientierte Wissensrepräsentation, die automatische Generierung von Verhalten und die situationsgerechte, maschinelle Verhaltensentscheidung. Der Grad der Automatisierung als neuer Freiheitsgrad im System wird abhängig von der aktuellen Leistungsfähigkeit gewählt, die durch Gütemaße bestimmt wird. Für die flexible Automatisierung werden geeignete Strukturen zur Generierung von Verhalten vorgestellt. Die Initiative und Verantwortung für autonomes Handeln im System übernimmt eine zentrale Entscheidungsinstanz.

Die entwickelten Ansätze wurden im Versuchsfahrzeug VaMP erfolgreich getestet, das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde. International Maßstäbe gesetzt hat VaMP bei Fahrten mit automatischer Quer- und Längsführung im öffentlichen Straßenverkehr. Mit dem erwartungsbasierten, multifokalen, sakkadischen Wahrnehmungssystem wurden exemplarisch die Grade der Automatisierung ‘hybrider, adaptiver Tempomat’, ‘automatische Querführung’, ‘automatische Notbremsung’ und ‘autonome Längs- und Querführung’ erfolgreich demonstriert.

Teil I

Einführung

Kapitel 1

Einleitung

Die Erfindung des Automobils durch Benz 1885 und Daimler 1886 ermöglichte eine ‘selbstbewegliche’ Fortbewegung, die auf einen Antrieb durch äußere Kräfte nicht angewiesen war.¹ Als technologische Basisinnovation erlangte das Auto wirtschaftlich eine herausragende Bedeutung und wurde im 20. Jahrhundert ein bedeutender Motor der Volkswirtschaft. In der modernen Gesellschaft ermöglicht das Auto breiten Teilen der Bevölkerung der ‘entwickelten Länder’ eine bis dahin unerreichte individuelle Mobilität. Wegen der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bedeutung des Kraftfahrzeugs werden jährlich Tausende Verkehrstote und gravierende Umweltschäden in Kauf genommen. Die Verkehrsdichte hat stark zugenommen, was häufig zu Staus führt, aber auch immer wieder zu komplexen Verkehrssituationen, die den Fahrer mental überfordern.

Industrie und Staat unternehmen große Anstrengungen, um den motorisierten Individualverkehr zu erhalten, seine negativen Folgen zu minimieren und seine volkswirtschaftlichen Kosten zu senken. Dank technischer und gesetzlicher Maßnahmen sinkt die Zahl der Verkehrstoten und der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch der zugelassenen Autos ständig. Die Zahl der Verkehrstoten ist von 1980 bis 1998 von 15050 in Westdeutschland auf 7792 in Gesamtdeutschland gesunken, obwohl gleichzeitig die Zahl der zugelassenen Kraftfahrzeuge von 29.2 Millionen auf 49.6 Millionen gestiegen ist (Zahlenangaben nach dem Statistischen Bundesamt²). Maßgeblich zur Senkung der Todesfälle im Straßenverkehr beigetragen haben passive Schutzmaßnahmen wie Sicherheitsgurte, Kopfstützen, Airbags und verstärkte Fahrgastzellen. Dank der Einführung von aktiven Fahrwerksregelsystemen wie Antiblockiersystem (ABS), Antriebsschlupfregelung (ASR) und Fahrdynamikregelung (FDR) (Bosch 1995) bleibt das Fahrzeug in einem größeren Arbeitsbereich auch für den untrainierten Fahrer beherrschbar.

¹‘Auto- [zu griech. autós]: bedeutet ... selbst, persönlich, eigen’ (Duden 1989); ‘Automobil ... [zu lat. mobilis = beweglich]’ (Duden 1989)

²Statistisches Bundesamt (1995). Statistik: Verkehr und Reisen. BTX *48484527# zitiert nach Behringer (1996). Statistisches Bundesamt (2000), <http://www.statistik-bund.de>, 11. 2. 2000. ADAC (1989): Verkehrs- und Unfallentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland 1970 - 1988, Verkehr und Unfälle 12, (Zusammenfassung von Daten des Statistischen Bundesamtes), ADAC-Zentrale München, 1989; zitiert nach Kopf (1993).

Bis heute hat die Pferdekutsche, das bevorzugte Transportmittel früherer Jahrhunderte, einige Vorzüge gegenüber dem Automobil: Dank seiner Wahrnehmungsfähigkeiten kann das Pferd Auffahrunfälle selbständig verhindern. Auch wenn der Kutscher eingeschlafen ist, weicht es nicht vom Weg ab. Auf dem Rückweg zum Stall findet es die Route in der näheren Umgebung des Stalls selbständig. Im Automobil ist dagegen die ständige Aufmerksamkeit des Fahrers Voraussetzung für eine sichere Fortbewegung. Im Vergleich zum Automobil hat die vom Pferd gezogene Kutsche dank der Wahrnehmungsfähigkeiten des Pferdes eine höhere Autonomie.

Die Entwicklung von leistungsfähigen Mikroprozessoren macht es heute möglich, auch technische Systeme mit Wahrnehmungsfähigkeiten auszurüsten. Seit den fünfziger Jahren werden Radarsensoren in Kraftfahrzeuge eingebaut, um Fremdfahrzeuge wahrzunehmen und die Fahrzeuglängsführung zu automatisieren (ika 1999). Shakey, einer der ersten mobilen Roboter, wurde Ende der sechziger Jahre an der Stanford Universität aufgebaut. Der Roboter war in der Lage, die Umgebung mit einer Fernsehkamera wahrzunehmen und geplanten Trajektorien nachzufahren (Nilsson 1969).³ Seit Ende der siebziger Jahre werden in Europa, in Japan und in den USA Ansätze entwickelt, um Fahrfunktionen in Kraftfahrzeugen mit Rechnersehen zu automatisieren (Kapitel 2; Tsugawa 1979;⁴ Dickmanns 1980; Klass 1985). Die ersten Systeme zur Automatisierung der Längsführung mit Radar werden als ‘Abstandsregeltempomaten’ oder ‘adaptive Tempomaten’ (Adaptive Cruise Control, ACC) 1999 in Fahrzeugen von Daimler-Chrysler⁵ und von Jaguar als Zusatzausstattung angeboten. Für Hahn (1996) markiert ACC den Beginn einer Entwicklung, an deren Ende autonome Fahrzeuge stehen.

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Systemarchitektur für die Automatisierung von Fahrfunktionen im Kraftfahrzeug vorgestellt, die bei der Automatisierung von einzelnen Fahrfunktionen im Straßenverkehr, aber auch bei autonomen Missionen gleichermaßen erfolgreich getestet wurde. Die Systemarchitektur wurde als offene Architektur entworfen, die erweiterbar ist und damit offen für zukünftige Entwicklungen.

1.1 Motivation grundlegender Konzepte

Zwei Konzepte, die im Titel dieser Arbeit enthalten sind, sollen zunächst erläutert und motiviert werden: das Konzept der ‘flexiblen Automatisierung’ und das Konzept der ‘Automatisierung mit Rechnersehen’.

³Das Experiment wurde im intermittierenden Betrieb durchgeführt: Zunächst wurde ein Bild aufgenommen und 15 Minuten auf Rechnern im Labor analysiert. Anschließend konnte der Roboter einen Meter bewegt werden. Nilsson, N. (1969): A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques. Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-69). Washington D.C., May. Reprinted in *Autonomous Mobile Robots*, Vol. 2, eds. Iyengar and A. Elfes, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, 1991, pp. 233-44. zitiert nach Arkin (1998, S. 16-17).

⁴Tsugawa, S., T. Yatabe, T. Hirose & S. Matsumoto (1979): An Automobile with Artificial Intelligence. Proc. 6th Int. Joint Conference on Pattern Recognition, Tokyo, August 20-23, 1979, S. 893 - 895, zitiert nach Enkelmann (1997).

⁵Produktname: ‘Distronic’

1.1.1 Automatisierung mit Rechnersehen

Das Auge ist das wichtigste Sinnesorgan des Menschen, über das er einen Großteil seiner Informationen über die Umwelt aufnimmt (vgl. Anderson 1989). Der Fahrer eines Kraftfahrzeugs erfaßt den Straßenverlauf und andere Verkehrsteilnehmer in der Umgebung überwiegend visuell. Zusätzlich wurde für den Menschen im Straßenverkehr eine Infrastruktur aufgebaut, um Strukturen und Regeln deutlich zu machen, die ebenfalls visuell wahrgenommen wird. Daher liegt es nahe, von autonomen Straßenfahrzeugen visuelle Wahrnehmungsfähigkeiten zu fordern. Nur wenn ein autonomes Fahrzeug in der Lage ist, die Infrastruktur ebenfalls zu erkennen, wird es eine ähnliche Vorstellung von der Situation bekommen wie der Mensch. Dies ist notwendig, um sicher und erfolgreich im Straßenverkehr zu fahren. Außerdem läßt sich für den Menschen das Verhalten des technischen Systems besser abschätzen, wenn Mensch und Roboter über ähnliche Informationen verfügen. Nur Rechnersehen verfügt in den nächsten Jahren über das Potential, alle relevanten Informationen in der Umgebung ohne zusätzliche Infrastruktur zu erfassen. Gegenüber aktiven emittierenden Verfahren wie Radar oder Laser erfolgt die Wahrnehmung passiv und ohne Belastung der Umwelt.

Bei der Entwicklung des Rechnersehens an der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) war das Wirbeltierauge Vorbild. Zunächst wurde der Schwerpunkt auf die Entwicklung des Bewegungssehens oder dynamischen Sehens gelegt, das sich in der Evolution generell und auch in der Entwicklung jedes einzelnen Menschen früher als das piktoriale Sehen ausprägt (Dickmanns 1987). Das Prinzip des sakkadischen Sehens, das sich beim Menschen und bei Wirbeltieren durchgesetzt hat, fand seine Entsprechung in den Plattformen zur aktiven Blickrichtungssteuerung in den Versuchsfahrzeugen VaMoRs und VaMP (Abschnitt 1.2, Schiehlen 1995).

1.1.2 Flexible Automatisierung

Flexible Automatisierung bedeutet, daß der Grad der Automatisierung zur Zeit des Systementwurfs nicht festgelegt wird, sondern abhängig von verschiedenen Kriterien im Betrieb verändert werden kann. Der Grad der Automatisierung (GdA) wird damit als neuer Freiheitsgrad im System eingeführt. Wichtige Kriterien für die Bestimmung des GdA sind der Nutzerwunsch, die Anpassung an die aktuelle Leistungsfähigkeit und an die aktuelle Domäne.

Die Entscheidung, welche Fahrfunktionen automatisiert werden sollen, liegt beim Nutzer. Das Angebot von automatisierten Fahrfunktionen sollte an die Domäne angepaßt werden. Verschiedene Fahrfunktionen können in stark reglementierten Domänen wie Autobahnen leichter realisiert werden als in anderen. Dazu muß das Fahrzeug die Domäne erkennen können und domänenabhängig Fähigkeiten anbieten. Die Information, in welcher Domäne sich das Fahrzeug gerade befindet, kann auch bei der Auslegung von Verhaltensfähigkeiten verwendet werden.

Die flexible Automatisierung bietet die Möglichkeit, den GdA an die aktuelle Leistungsfähigkeit des Systems anzupassen. Es dürfen nur solche Fahrfunktionen vom System übernommen werden, die mit der aktuellen Leistungsfähigkeit des Systems sicher beherrscht werden. Als Referenz für die Fehlersicherheit von Systemen wird in dieser Arbeit der aufmerksame menschliche Fahrer angenommen.

Der Übergang vom automatischen Fahren zum manuellen Fahren ist dabei nicht unkritisch. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle muß so gestaltet werden, daß auch untrainierte Fahrer nicht in Gefahr geraten, wenn sie die Kontrolle wieder übernehmen müssen. Gelingt die Abstimmung von Mensch und Maschine, dann bietet das Konzept der flexiblen Automatisierung die Möglichkeit, komplexe Wahrnehmungssysteme auch dann schon zu nutzen, wenn sie nur in ausgewählten Domänen oder nur unter bestimmten Umweltbedingungen sicher zur Verfügung stehen. Die flexible Automatisierung stellt erhöhte Anforderungen an das System: Die Prozeßstruktur und die funktionale Struktur müssen entsprechend den aktuellen Anforderungen im Betrieb konfiguriert werden.

In den Versuchsfahrzeugen der Universität der Bundeswehr wurden bisher folgende Grade der Automatisierung realisiert: Ohne Rechnersehen kann mit Hilfe eines Radars ein ‘adaptiver Tempomat’ angeboten werden. Ist zusätzlich ein System zur visuellen Wahrnehmung vorhanden, kann die Geschwindigkeit an die Straßenkrümmung, die Verkehrsdichte oder auch an gefährliche Verkehrsteilnehmer angepaßt werden. Abhängig von der Ausrüstung und der Domäne können autonome Missionen durchgeführt werden.

Automatisches Spurhalten, automatische Querführung und autonome Querführung sind Grade der Automatisierung für die Querführung. Dabei wird bei der automatischen Querführung der Spurwechsel vom System ausgeführt, nachdem er vom Fahrer kommandiert wurde. Bei der autonomen Querführung werden Spurwechsel vom System aufgrund der aktuellen Verkehrssituation initiiert und ausgeführt.⁶

1.1.3 Anmerkungen zum Gebrauch des Begriffs ‘Autonomie’

In der technischen Fachliteratur hat der Begriff ‘Autonomie’ unterschiedliche Bedeutungen. In dieser Arbeit wird das Attribut ‘autonom’ zunächst im Sinne von ‘bordautonom’ verwendet. Ein ‘autonomes Fahrzeug’ bewegt sich in der für den Menschen geschaffenen Umgebung und benötigt keine zusätzliche Infrastruktur. Teilautomatisierte Systeme, in denen der Mensch im Betrieb Aufgaben übernehmen muß, werden auch als semiautonome Fahrzeuge bezeichnet. Dadurch wird wiederum unterstrichen, daß sie keine andere Infrastruktur für die automatisierten Aufgaben benötigen als der Mensch.

Nach Antsaklis & Passino (1993) muß ein autonomes Fahrzeug seine Aufgaben trotz signifikanter Unsicherheiten der Regelstrecken und der Erkennungsprozesse in einer dynamischen Umgebung über längere Zeiträume sicher ausführen. Es muß in der Lage

⁶Eine formale Darstellung der Auswahl des GdA erfolgt in Abschnitt 4.1.3 mit Hilfe von Zustandskarten.

sein, auftretende Fehler in Sensorik und Aktuatorik zu erkennen und ohne Hilfe von außen adäquat zu reagieren. Ein System mit einem hohen Grad an Autonomie adaptiert sich an Veränderungen der Regelstrecken, der Umgebung und der Ziele.

Im Sinne des Gebrauches von ‘Autonomie’ bei Kant erhält das autonome Fahrzeug ‘Selbstbestimmung im Rahmen eines übergeordneten (Sitten-)Gesetzes’ (Feil 1987, S. 112), das in diesem Fall der Mensch vorgibt. Autonomie ist in diesem Zusammenhang nicht mit Autarkie oder Souveränität zu verwechseln (Feil 1987).

1.2 Entwicklungshintergrund der Arbeit am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik

Diese Arbeit wurde durch zwei Faktoren wesentlich geprägt: Den 4D-Ansatz, der am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik (ISF) entwickelt wurde, und die Ziele der Drittmittelprojekte, durch die diese Arbeit teilweise finanziert wurde.

1.2.1 Wahrnehmung und Verhaltensgenerierung mit dem 4D-Ansatz

Der 4D-Ansatz nutzt Methoden der Systemdynamik, um visuelle Szenen zu erkennen. Merkmale eines physikalischen Objektes werden mit Hilfe von internen, vierdimensionalen (4D-) Modellen in Raum und Zeit auf die 2D-Bildebene abgebildet. Nach einer Initialisierungsphase, in der geeignete Objekthypothesen aufgestellt werden, wird die rechenaufwendige Merkmalsextraktion in der Verfolgungsphase aufgrund der internen Modellvorstellung über das Objekt gesteuert.

Die Grundidee des 4D-Ansatzes, dynamische Modelle zur visuellen Wahrnehmung einzusetzen, wurde 1980 von Dickmanns formuliert (Dickmanns 1980). Meissner (1982) hat den Ansatz angewandt auf das Problem der Stabilisierung eines Stabwagensystems mit Rechnersehen. Wünsche (1988) realisierte ein autonomes Andockmanöver eines Luftkissenfahrzeugs an ein stationäres Zielobjekt in einer technischen Umgebung. Die Zustände wurden dabei mit einem Kalmanfilter geschätzt.

Bekannt wurde der 4D-Ansatz besonders durch den Einsatz bei der Automatisierung von Fahrfunktionen von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen. Das Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen (VaMoRs) fuhr 1987 eine 20 Kilometer lange Strecke automatisch quergeregelt mit einer Geschwindigkeit von 96 km/h auf einem Autobahnteilstück der A-92 (München-Deggendorf), das noch nicht für den öffentlichen Verkehr freigegeben war (Dickmanns & Zapp 1987). Die Modellierung der Fahrbahn durch eine horizontale und eine vertikale Krümmung (Dickmanns & Mysliwetz 1992) wurde inzwischen auch in industrielle Implementierungen aufgenommen (z.B. Bosch). Ansätze von Hock (1994) erlaubten die Erkennung von Landmarken und die Schätzung ihrer Lage relativ zum Versuchsfahrzeug. Brüdigam (1994) entwickelte Regelungen und

Vorsteuerungen zum Spurfahren, zum Spurwechsel und zum Konvoifahren, die auch heute noch - teilweise in optimierter Form - in den Versuchsfahrzeugen eingesetzt werden. Die Fähigkeit, Querstraßen zu erkennen und in diese abzubiegen, demonstrierte Müller (1996) in VaMoRs.

Mit dem Versuchsfahrzeug VaMP, das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde (Abschnitt 7.1.1), wurde automatisches Fahren im PKW demonstriert. Mit den von Thomanek (1996) entwickelten Ansätzen konnten die Relativlage von Fremdfahrzeugen vor und hinter dem autonomen Fahrzeug mit Rechnersehen geschätzt werden (Abschnitt 7.2.1). Behringer (1996) erweiterte die Eigenzustandsschätzung relativ zur Fahrbahn und die Formschätzung der Fahrspur. Kujawski (1995) entwickelte an der Fakultät für Informatik der UniBwM Ansätze für autonome Spurwechsel auf der Autobahn (Abschnitt 6.1.3). Der Eigenzustand bezüglich eines inertialen Koordinatensystems kann mit Verfahren geschätzt werden, die Werner (1997) implementierte.

Neben den dynamischen internen Modellen zeichnet sich der Wahrnehmungsansatz am ISF der UniBwM durch Sichtbereiche unterschiedlicher Auflösung - einen hochauflösenden zentralen und einen gering auflösenden peripheren Bereich - und eine aktive Blickrichtungssteuerung aus. Die auf der Plattform zur aktiven Blickrichtungssteuerung (Mysliwetz und Dickmanns 1986,⁷ Schiehlen 1995) montierten Kameras können um die Gier- und die Nickachse (VaMP nur Gierachse) gedreht und damit auf interessante Merkmale in der Szene gerichtet werden. Die verschiedenen Auflösungsbereiche werden dabei mit Kameras unterschiedlicher Brennweite realisiert. So umfaßt das sogenannte MarvEye (**M**ulti-focal **a**ctive, **r**eflex-like reacting **v**ehicle **E**ye, multifokales, aktives, reflexhaft reagierendes Fahrzeugauge) zwei auswärts schielende Weitwinkelkameras und zwei zentral blickende Telekameras unterschiedlicher Brennweite (Abschnitte 7.1.1 und 7.2.3, Dickmanns 1995b). Im jüngsten System zur visuellen Wahrnehmung wurden die drei Grundgedanken des Ansatzes in den Namen aufgenommen: Das EMS-System zur visuellen Wahrnehmung ist ein erwartungsbasiertes, multifokales, sakkadisches Wahrnehmungssystem (**E**xpectation-based, **M**ulti-focal, **S**accadic Vision System, Dickmanns 1999).

Erfolgreich eingesetzt wurde der 4D-Ansatz auch bei autonomen Missionen von Flurförderfahrzeugen (Hock 1994), bei automatischen Landeanflügen mit Rechnersehen in Flugzeugen (Schell 1992) und Helikoptern (Werner 1997) sowie bei automatischer Teleoperation eines Greifvorgangs im Weltraum (Fagerer 1996; Dickmanns 1997a).

Eine wichtige Voraussetzung für die flexible Automatisierung war die Trennung zwischen der Methodik des 4D-Ansatzes und dem Anwendungsgebiet durch Dickmanns (1997a), die in den vorhergehenden Implementierungen nicht gegeben war: 'Die Modelle sind in den Programmen fixiert; eine Trennung zwischen der Methodik des 4D-Ansatzes und dem Anwendungsgebiet wurde nicht durchgeführt.' (Dickmanns 1997a, S. 27)

⁷Mysliwetz B. und Dickmanns E. D., A vision system with active gaze control for real-time interpretation of well structured dynamic scenes. Proc. Intelligent Autonomous Systems, p. 477-483, Dec. 1986. zitiert nach Schiehlen (1995).

Thorpe (1992) unterschätzt den 4D-Ansatz, wenn er Schwierigkeiten sieht, symbolische Repräsentationen in den 4D-Ansatz zu integrieren:

‘Dickmanns and Graefe, who have done very good work in autobahn following, view the whole problem as control theory. Each higher level is merely a loop, operating at a slower speed. This seems to work very well for following the carefully-designed autobahns, and extends nicely to modeling other physical systems such as visual servoing for aircraft landing. But it seems to be harder to extend to symbolic reasoning of the form ‘the driver of that car is a young guy with his arms around his girlfriend, paying more attention to her than to the road. I’d better give them a wide margin.’

In Kapitel 4 wird gezeigt, daß - entgegen Thorpe’s Auffassung - die dynamischen internen Modellvorstellungen besonders geeignet sind, um zu symbolischen, internen Repräsentationen zu gelangen.

Bei der flexiblen Automatisierung von Fahrfunktionen wird berücksichtigt, daß der 4D-Ansatz ein komplexer Wahrnehmungsansatz und kein Meßverfahren ist. Während bei einem Meßverfahren physikalische Größen mit einer geeigneten Methode direkt gemessen werden, müssen die Meßwerte bei der visuellen Wahrnehmung erst interpretiert werden. Bei der Fahrspurerkennung beruht die Hypothese über den Fahrspurverlauf bei kantenbasierten Verfahren auf einer Folge von gemessenen hell-dunkel-Übergängen im Videobild. Nur mit umfangreichem Hintergrundwissen können diese Muster im Bild als Begrenzung einer Fahrspur interpretiert werden, zu der die Kamera eine bestimmte Relativlage hat. ‘Die [internen; MM] Modelle sind auch bei noch so erfolgreicher Verwendung nur Hypothesen über eine die Muster verursachende reale Außenwelt.’ (Dickmanns 1997a, S. 3) Wahrnehmen bedeutet damit auch, die Hypothesen über die Umwelt für wahr zu nehmen (vgl. Dickmanns 1997a, S. 3).

Der Unterschied zu Meßverfahren wird auch bei einem Blick auf Theorien zur menschlichen Wahrnehmung deutlich:

‘It is widely held that human vision, for instance, cannot be explained as an entirely ‘data-driven’ or ‘bottom-up’ process, but needs, at the highest levels, to be supplemented by a few ‘expectation-driven’ rounds of hypothesis testing (or something analogous to hypothesis testing). Another member of the family is the ‘analysis-by-synthesis’ model of perception that also supposes that perceptions are built up in a process that weaves back and forth between centrally generated expectations, on the one hand, and confirmations (and disconfirmations) arising from the periphery on the other hand (e.g., Neisser, 1967). The general idea of these theories is that after a certain amount of ‘preprocessing’ has occurred in the early or peripheral layers of the perceptual system, the tasks of perception are completed - objects are identified, recognized, categorized - by generate-and-test cycles.’ (Dennett 1991, S. 12)

Besonders unter Zeitdruck weichen die internen Modelle mitunter stark von der äußeren Welt ab. Unter Zeitdruck trifft das Gehirn nach Dennett (1991, S. 142) vereinfachende Annahmen, die in Grenzfällen auch zu alternierenden Interpretationen führen können.

‘The brain’s task is to guide the body it controls through a world of shifting conditions and sudden surprises, so it must gather information from that world and use it swiftly to ‘produce future’ - to extract anticipations in order to stay one step ahead of disaster ... So the brain is under significant time pressure. It must often arrange to modulate its output in the light of its input within a time window that leaves no slack for delays. On the input side, there are perceptual analysis tasks, such as speech perception, which would be beyond the physical limits of the brain’s machinery if it didn’t utilize ingenious anticipatory strategies that feed on the redundancies in the input.’ (Dennett 1991, S. 144)

Die Zuverlässigkeit, mit der die komplexe Interpretation bei der Wahrnehmung gelingt, kann nach dem aktuellen Stand der Technik nur selten analytisch berechnet werden. ‘In der Regel wird die Zuverlässigkeit daran gemessen, wie gut sich die Modelle und die daraus abgeleiteten Vorhersagen und Aktionen während langer Test- und Erprobungsserien in der Außenwelt bewähren.’ (Dickmanns 1997a, S. 20) In dieser Arbeit dient der menschliche Fahrer als Vergleichsmaßstab: Ist die maschinelle Wahrnehmung so gut wie die der besten zwei Prozent der menschlichen Fahrer, dann ist sie für 98 Prozent eine wertvolle Unterstützung (vgl. auch Abschnitt 5.4.2).

1.2.2 Projektrahmen

Der überwiegende Teil dieser Arbeit entstand im Rahmen von Drittmittelprojekten, deren Ziele die Arbeit beeinflusst haben.

In der dritten Phase des europäischen Forschungsprojektes ‘Prometheus’ (‘Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety’) von Juli 1993 bis Dezember 1994 sollte in Zusammenarbeit mit Daimler-Benz die Machbarkeit von autonomen Fahrten auf der Autobahn gezeigt werden. Dazu wurden von Daimler-Benz und dem ISF die beiden Versuchsfahrzeuge Vita II (Abschnitt 2.3.3) und VaMP (Abschnitt 7.1.1) aufgebaut, die automatische Quer- und Längsführung auf öffentlichen Autobahnen demonstrierten (Abschnitt 7.2.1). Im Projekt ‘Cleopatra’ (ESPRIT Projekt 8329, ‘Clusters of Embedded Parallel Time Critical Applications’, 1994 - 1996) lag der Forschungsschwerpunkt auf der Erhöhung der Robustheit von einzelnen automatischen Fahrfunktionen auf der Autobahn durch den Einsatz von Hochleistungsrechnern (Abschnitt 7.2.2; Werner et al. 1995; Dickmanns et al. 1995; Maurer et al. 1996a; von Holt & Thomanek 1996; Maurer et al. 1996b). In den Projekten ‘AutoNav’ (‘Autonome Navigation’; Albus 1997; Baten 1998) und IFF (‘Intelligente Fahrzeug-Funktionen’) werden autonome Fahrzeuge für militärische Anwendungen erforscht.

In ‘Prometheus’, ‘Cleopatra’ und in der ersten Phase von ‘AutoNav’ stand die Automatisierung von Fahrfunktionen auf der Autobahn im Vordergrund. Im Rahmen dieser Projekte wurden die Systemarchitektur und die einzelnen Fahrfunktionen zunächst für die Autobahn entwickelt. Entsprechend werden sie auch mit dem Stand der Technik von Ansätzen für diese Domäne verglichen (Kapitel 2 und Abschnitt 6.1). Der entstandene Ansatz ist jedoch erweiterbar für andere Applikationen. Dies konnte im weiteren Verlauf von ‘AutoNav’ bei autonomen Missionen auf Straßen niedriger Ordnung (Abschnitt 8.2.4) gezeigt werden. Mit den von Baten (2000) entwickelten Wahrnehmungsfähigkeiten wird der Ansatz auch bei Fahrten in weglosem Gelände tragen, sobald genügend Rechenleistung für die Wahrnehmungsaufgaben zur Verfügung steht. Das Konzept zur flexiblen Automatisierung ist nicht auf Landfahrzeuge beschränkt: Die Systemarchitektur (Kapitel 3), die interne Wissensrepräsentation (Kapitel 4) und die zentrale Verhaltensentscheidung (Kapitel 6) können auch in Luft- oder Flurförderfahrzeugen eingesetzt werden.

1.3 Struktur und Beitrag der Arbeit

Nach der Motivation der flexiblen Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen in diesem Kapitel wird im zweiten Kapitel des einleitenden Teils aufgezeigt, daß es derzeit außerhalb der UniBwM kein realisiertes Gesamtkonzept für ein autonomes, sehendes Landfahrzeug in gut strukturierter Umgebung gibt. Kanal (1993, S. 252) sieht auch bei einer weitergefaßten Aufgabenstellung Bedarf für die systematische Untersuchung von komplexen Systemen:

‘But the integration of heterogeneous computational components, multiple sensors producing different types of data, and heterogeneous knowledge bases, is a significant systems design problem for which we currently have only ad-hoc techniques.’

In Teil II dieser Arbeit wird aus langjähriger Praxis mit der Automatisierung von Fahrfunktionen mit Rechnersehen eine Systemarchitektur für autonome Fahrzeuge abstrahiert und unabhängig von der Hardware dargestellt. Zunächst wird die funktionale Systemarchitektur diskutiert, die neben dem Entwicklungshintergrund am Institut (Abschnitt 1.2) auch durch Modelle menschlicher Bediener (Abschnitt 3.1) und durch Systemarchitekturen beeinflusst wurde, die bislang nicht in Straßenfahrzeugen zum Einsatz kamen (Abschnitt 3.2). Die geeignete Repräsentation des Wissens im technischen Agenten (Kapitel 4) ist neben der funktionalen Architektur entscheidend für reaktionsschnelles Handeln in einer Vielzahl von Situationen. Die Modelle, die das Wissen über die Welt intern repräsentieren, werden hierarchisch (Abschnitt 4.1) und objektorientiert (Abschnitte 4.2 und 4.3) strukturiert. Voraussetzung für verantwortungsvolles Handeln ist das Wissen des Agenten über sich selbst und seine eigenen Fähigkeiten (Abschnitt 4.3.2).

Im Rahmen des Systems zur flexiblen Automatisierung wird die Generierung von Verhaltensweisen (Kapitel 5) und die Verhaltensentscheidung (Kapitel 6) neu formuliert. Der Grad der Automatisierung richtet sich neben dem Nutzerwunsch und der Domäne nach der aktuellen Einschätzung der eigenen Leistungsfähigkeit. Dazu werden Güte- maße in der Fahrzeugführung eingeführt: Jede Reglerklasse enthält Qualitätsmaße, die die aktuelle Regelgüte quantitativ bewerten (Abschnitt 5.2).

Die in Teil II entwickelte Systemarchitektur hebt sich auch dadurch von anderen Archi- tekturen ab, daß sie erfolgreich im Straßenfahrzeug eingesetzt wurde (Teil III). Kapitel 7 beschreibt den realisierten Versuchsaufbau, mit dem weltweit bislang unerreichte Ergebnisse erzielt wurden (Kapitel 8). Im experimentellen Teil der Arbeit wird eine Möglichkeit aufgezeigt, die entwickelte Systemarchitektur zu realisieren, die für For- schungszwecke besonders geeignet ist. Zur kommerziellen Nutzung im Kraftfahrzeug läßt sich das Konzept zur flexiblen Automatisierung auch mit serientauglichen Sensoren, Aktuatoren und Rechnern umsetzen.

Kapitel 2

Stand der Technik bei der Automatisierung von Fahrfunktionen mit Rechnersehen

Seit zwanzig Jahren wird die Automatisierung von Fahrfunktionen im Kraftfahrzeug mit Rechnersehen in Europa, Japan und Nordamerika erforscht (Dickmanns 1980, Tsugawa et al. 1979, Thompson 1977).¹ Die Entwicklung von Testfahrzeugen, bei denen Fahrfunktionen mit Rechnersehen automatisiert werden, ist eng mit der technologischen Entwicklung von Hardware für die Bildverarbeitung verbunden. Die erste Generation von Testfahrzeugen bestand aus Lastkraftwagen, die genügend Platz, elektrische Leistung und Kühlung zur Verfügung stellten, um die großvolumigen, oft selbst entwickelten Rechneranlagen aufzunehmen.²

Dank der zunehmenden Rechenleistung und der Miniaturisierung von Rechnerkomponenten konnten in der zweiten Generation von Versuchsfahrzeugen auch Personenkraftwagen zu autonomen Fahrzeugen umgebaut werden. Ansätze, denen die Verringerung der Kamerahöhe Schwierigkeiten bereitet, werden immer noch häufig in Fahrzeugen mit größerer Fahrzeughöhe demonstriert. Wegen der geringeren technologischen Hürden hat sich die Zahl der Versuchsträger gegenüber der ersten Generation vervielfacht.

Die folgende Darstellung konzentriert sich auf Entwicklungen der zweiten Generation in gut strukturierter Umgebung, die zwischen 1994 und 1999 veröffentlicht wurden.³

¹Tsugawa, S., T. Yatabe, T. Hirose & S. Matsumoto (1979): An Automobile with Artificial Intelligence. Proc. 6th Int. Joint Conference on Pattern Recognition, Tokyo, August 20-23, 1979, S. 893 - 895, zitiert nach Enkelmann (1997) und Thompson, A. M. (1977): The Navigation System of the JPL Robot. Proc. 5th Int. Joint Conference on Artificial Intelligence, Cambridge/Mass., August 22-25, 1977, 749-757. zitiert nach Enkelmann (1997).

²Übersichten über diese Generation von Testfahrzeugen finden sich z.B. bei Zapp (1988), Mysliwetz (1990), Hock (1994), Brüdigam (1994), Müller (1996) und Enkelmann (1997).

³Das Kapitel erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Besonders im industriellen Bereich gibt es zunehmend Versuchsträger, deren Fähigkeiten aus Wettbewerbsgründen nicht mehr veröffentlicht werden. Auch ist es wegen der Fülle der Veröffentlichungen möglich, daß erstklassige Versuchsträger

Als wichtigste Quellen dienten die Konferenzbände der Konferenzen ‘Intelligent Vehicles’ (IV 1994; IV 1995; IV 1996; IV 1998) und ‘Intelligent Transportation Systems Conference’ (ITSC 1997; ITSC 1999), die sich zu den führenden Konferenzen für die Automatisierung von Fahrfunktionen in Straßenfahrzeugen entwickelt haben.

Berücksichtigt werden bei der Darstellung des aktuellen Standes der Technik Ansätze, bei denen Fahrfunktionen mit Rechnersehen in Versuchsfahrzeugen automatisiert werden. Simulationsergebnisse geben nur bedingt Auskunft, ob Ansätze tatsächlich geeignet sind, Fahrfunktionen zu automatisieren. Automatisierungsansätze auf der Basis von zusätzlicher Infrastruktur oder aktiven Sensoren werden ebensowenig berücksichtigt wie reine Warnfunktionen, bei denen kein Aktuatoreingriff erfolgt.

Im Mittelpunkt der Diskussion stehen die Versuchsfahrzeuge, ihre Fähigkeiten zu Wahrnehmung, Entscheidung und Ausführung und die dokumentierten experimentellen Ergebnisse. Experimentelle Ergebnisse von Langstreckenfahrten sind ein gutes Indiz dafür, daß die Versuchsträger sich von Experimentierplattformen hin zu Fortbewegungsmitteln entwickeln. Sollten Angaben zur funktionalen Systemarchitektur, zur internen Repräsentation, zur Bestimmung der eigenen Leistungsfähigkeit oder zur flexiblen Automatisierung vorliegen, werden diese besonders diskutiert. Die Übersicht über die weltweiten Aktivitäten wird zeigen, daß sich die Arbeiten auf Realisierungen von einzelnen Fähigkeiten konzentrieren. Ein realisiertes Gesamtkonzept für ein autonomes, sehendes Landfahrzeug in gut strukturierter Umgebung findet sich in den zitierten Veröffentlichungen nicht. Diese Arbeit möchte einen Beitrag liefern, diese Lücke zu schließen.

2.1 Amerikanische Gruppen

2.1.1 Carnegie Mellon University

Das Robotikinstitut an der Carnegie Mellon University (CMU) ⁴ in Pittsburgh gehört zu den Pionieren auf dem Gebiet der autonomen Fahrzeuge. Die Arbeit auf dem Gebiet begann 1984 mit dem Fahrzeug ‘Terregator’, einem kleinen Fahrzeug mit sechs Rädern (Hebert et al. 1997, S. 1). In dem Projekt ‘Autonomous Land Vehicle’ (ALV) wurde ein Kleintransporter zum ‘Navigationslabor’ (‘Navigation Laboratory’, Navlab) umgerüstet (Thorpe et al. 1988). Heute gehört die Gruppe zu den aktivsten universitären auf dem Gebiet der autonomen Fahrzeugführung in verschiedensten Domänen; in autobahnähnlicher Umgebung gehören die Nachfolger von Navlab zu den Referenzsystemen.

nicht berücksichtigt wurden. Das gilt besonders dann, wenn die Veröffentlichungen nicht in englischer Sprache vorliegen.

⁴Laut Zeit-Magazin Nr. 11 vom 8. 3. 1996 ‘eine erste Adresse für maschinelles Sehen’, die unter Experten auch der ‘Vatikan’ genannt wird.

Demonstrierte Fähigkeiten

Auf Straßen höherer Ordnung wurden in den letzten Jahren zwei Ansätze intensiv an der CMU untersucht. Das System ALVINN ('Autonomous Land Vehicle In a Neural Network') basiert auf einem dreischichtigen neuronalen Netz, das ein Bild der Straße als Eingangssignal nimmt und daraus eine Lenkrichtung für die automatische Querführung ermittelt. Das Netz wird in einer Trainingsphase durch einen korrekt fahrenden menschlichen Fahrer trainiert (Pomerleau 1997a, S. 53 - 72). Mit ALVINN können auch Spurwechsel durchgeführt werden. Dafür wird zwischen zwei trainierten Netzwerken umgeschaltet (Jochem et al. 1995b).

Im RALPH-System ('Rapidly Adapting Lateral Position Handler') wird zunächst die Straßenkrümmung und dann der Eigenzustand zur Straße erfaßt (Pomerleau 1995; Pomerleau & Jochem 1996). Seit 1997 ist RALPH kommerziell verfügbar (Thorpe et al. 1997). Der Ansatz stellt eine Abkehr von den jahrelang verfolgten neuronalen Ansätzen zugunsten einer wenn auch noch schwach ausgeprägten internen physikalischen Repräsentation dar. Mit RALPH kann gleichzeitig auch die Sichtbarkeit der Fahrbahn bestimmt werden (Pomerleau 1997b).

Für die Erkennung von Fremdfahrzeugen werden überwiegend emittierende Sensoren eingesetzt. Im Nahbereich verwenden Langer & Thorpe (1995) Ultraschallsensoren, um parallel einzuparken. Im Fernbereich werden Fahrzeuge mit Radar erkannt (Langer 1996; Langer & Kumar 1997).

Das System RACCOON ('A Real-time Autonomous Car Chaser Operating Optimally at Night') verfolgt Schlußlichter von Fahrzeugen in der Nacht mittels Rechnersehen (Sukthankar 1993). Batavia et al. (1997) berichten von einem Ansatz mit Rechnersehen, bei dem Fahrzeuge im toten Winkel mit optischem Fluß erkannt werden sollen.

Versuchsfahrzeuge und experimentelle Ergebnisse

Von den Nachfolgern von Navlab, die fortlaufend numeriert sind, wurden in den letzten Jahren hauptsächlich Navlab 5 - 10 für Autobahnanwendungen eingesetzt. Bekannt wurde Navlab 5 durch die Langstreckenfahrt 'No Hands across America', die ein großes Echo in der Presse gefunden hat (Pomerleau & Jochem 1996). Navlab 5 wurde auf Basis eines Pontiac Trans Sport (Baujahr 1990) aufgebaut und mit Hilfe einer sogenannten 'tragbaren, verbesserten Navigationsunterstützung' ('Portable Advanced Navigation Support', PANS, Jochem et al. 1995a) für die automatische Querführung umgerüstet. Navlab 5 ist mit DGPS (Differential Global Positioning System, differentiell globales Positionierungssystem), einem optischen Kreisel und einer Sony Farbkamera ausgerüstet (Details in Jochem et al. 1995a).

Automatische Querführung wurde bis zu einer Geschwindigkeit von 90 m.p.h., der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs, auf einem Testgelände demonstriert (Jochem et al. 1995a). Bei der Tour 'No Hands across America' von Washington D.C. nach San

Diego konnten 2796 Meilen von insgesamt 2850 Meilen oder insgesamt 98.1 Prozent automatisch quergeregelt gefahren werden (Abschnitt 8.1, Pomerleau & Jochem 1996).

Auf der Demonstration des Nationalen Konsortiums für automatisierte Highways der Vereinigten Staaten ('US National Automated Highway System Consortiums', NAHSC) im August 1997 in San Diego führte die CMU die 'Demonstration freier Agenten' ('Free Agent Demonstration', Thorpe et al. 1997) an. An der Demonstration waren vier sogenannte vollautomatische Fahrzeuge, zwei Busse und zwei Limousinen, und ein teilweise automatisiertes Fahrzeug, ein Oldsmobile Silhouette Minivan (Navlab 8), beteiligt. Die vollautomatischen Limousinen Navlab 6 und 7 vom Typ Pontiac Bonneville wurden von General Motors umgerüstet. Die Busse Navlab 9 und Navlab 10 vom Typ New Flyer City Busses von Houston Metro wurden von der Firma K2T Inc. umgerüstet. Die Firma Assistware lieferte ein System zum Rechnersehen mit dem RALPH-Algorithmus, die Firma Delco Radarsysteme und Mensch-Maschine-Schnittstellen, die Firma Hughes digitale Radios. Radarsysteme wurden für den Vorausschau- und die seitlichen Bereiche eingesetzt, ein Laser-Radar überwachte den rückwärtigen Raum. In der Demonstration wurden die Fähigkeiten 'Einfahren in die Spur', 'Regelung der Geschwindigkeit und des Abstands', 'Spurfolgen und Spurwechsel', 'Hinderniserkennung' und kooperative Manöver gezeigt. Auch Warnsysteme beim Spurverlassen wurden demonstriert. Der Ansatz der 'Freien Agenten' erlaubt autonomes Fahren, wenn keine zusätzliche Infrastruktur verfügbar ist, und automatisches Fahren in Kooperation mit anderen Fahrzeugen, wenn Basisstationen und weitere automatische Fahrzeuge in der Nähe sind (alle Angaben nach Thorpe et al. 1997).

Systemarchitektur

Es ist bemerkenswert, daß es an der CMU trotz der geschilderten umfangreichen Aktivitäten auf dem Gebiet der Automatisierung von Fahrfunktionen mittels Rechnersehen keine Darstellung der Systemarchitektur für Straßenanwendungen gibt.⁵ Ausführlich wird dagegen die Systemarchitektur für unbemannte Landfahrzeuge ('unmanned ground vehicles') diskutiert, die im Rahmen eines militärischen amerikanischen Forschungsprogramms entwickelt wurde (Hebert et al. 1997). Im Mittelpunkt des Ansatzes stehen Verhaltensweisen mit genau definierten und abgegrenzten Aufgaben, die Sollgrößen für die Fahrzeugregelung generieren. In Konfigurationen, in denen mehrere Verhaltensweisen Sollgrößen für die gleichen Aktuatoren erzeugen, ermittelt das zentrale Schiedsrichtermodul ('arbiter') DAMN ('Distributed Architecture for Mobile Navigation', Hebert et al. 1997, S. 19-32) aus den von den einzelnen Verhaltensweisen generierten Sollgrößen eine gewichtete Summe als Führungsgröße für unterlagerte Regelkreise. Die Funktionsfähigkeit des Ansatzes wurde in Navlab II, einem geländegängigen Fahrzeug (High-Mobility, Multipurpose, Wheeled Vehicle, HMMWV), bei Fahrten

⁵'Are you talking about the system architecture for the vehicle? I don't think there is such a paper, at least not very complete.' Persönliche Kommunikation mit C. Thorpe am 8. 1. 1999 mit elektronischer Post.

im Gelände demonstriert (Hebert et al. 1997, S. 3). Für die Verhaltensweisen, die speziell für das Gelände entwickelt wurden und damit außerhalb der betrachteten Domäne liegen, wird auf die Literatur verwiesen (Hebert et al. 1997; Kelly & Stentz 1998a; Kelly & Stentz 1998b).

2.1.2 National Institute of Standards and Technology

Am ‘nationalen Institut für Standardisierung und Technologie’ (‘National Institute of Standards and Technology’, NIST) wurde ein HMMWV mit Sensoren und automatisch ansteuerbaren Aktuatoren ausgerüstet. Mit diesem Fahrzeug konnte automatische Querführung mit Rechnersehen auf markierten, abgesperrten Straßen im NIST-Gelände mit bis zu 90 km/h demonstriert werden. Dies funktionierte auch bei starkem Regen und im Scheinwerferlicht bei Dunkelheit (Juberts et al. 1993). Die Systemarchitektur wurde mit Hilfe des echtzeitfähigen Führungssystems RCS formuliert (Abschnitt 3.2.4).

Ein vorausfahrendes Fahrzeug kann in einem ‘Konvoimodus’ verfolgt werden. Dabei wird allerdings nur die Querführung (!) automatisch ausgeführt: die Längsführung erfolgt durch den Sicherheitsfahrer. In einer Demonstration folgte das Fahrzeug dem vorausfahrenden über 33 km mit Geschwindigkeiten von 50 - 75 km/h über Straßen auf dem NIST-Gelände und angrenzende öffentliche Straßen. Zur Unterstützung der visuellen Objekterkennung wurde ein leicht zu verfolgendes Schild am vorausfahrenden Fahrzeug montiert. Zusätzliche Rechner, mit denen die Rechner im HMMWV über Funk verbunden waren, wurden auf einem zweiten Fahrzeug untergebracht (Schneiderman et al. 1995).

2.1.3 Ohio State University

Der Ohio State University (OSU) wurden für die NAHSC Demonstration in San Diego drei Fahrzeuge vom Typ Honda Accord (Baujahr 1996) vom Hersteller zur Verfügung gestellt, bei denen alle Aktuatoren elektronisch angesteuert werden konnten. Diese wurden mit Sensoren zur Erfassung der Umgebung und der Eigenbewegung ausgerüstet: einem Laser-Radar für den Vorausschaubereich, einem von der OSU entwickelten Radar, einem einfachen monokularen System zum Rechnersehen, seitlichem Radar von der Firma Eaton-Vorad, einem Winkelratengeber und Sensoren für fahrzeuginterne Größen. Gezeigt werden konnten mit den Testfahrzeugen innerhalb genau definierter Szenarien die Fähigkeiten ‘Spurhalten’, ‘Spurwechsel’, ‘adaptiver Tempomat’ und ‘Anfahren’. Der Spurwechsel wurde nach der Diktion in dieser Arbeit automatisch, nicht autonom durchgeführt. Die Entwickler von der OSU heben die Fähigkeit, Fahrspuren auch mit Radar zu erkennen, besonders hervor. Dafür müssen die Fahrspuren mit radarreflektierenden Klebebändern markiert werden. Sind solche Markierungen nicht vorhanden, werden die Fahrspuren mit Hilfe von Rechnersehen erkannt (alle Informationen nach Özgüner et al. 1997a).

Zwei Methoden zur Datenvalidierung und Fehlererkennung werden von Schneider & Özgüner (1998) vorgestellt. Zur Erkennung von Fehlern in einem adaptiven Tempomaten ('Adaptive Cruise Control', ACC) werden mittels Kalman-Filter Fehler detektiert und durch Vergleich mit einem 'Fehler-Raum' bestätigt. Eine andere Methode, die auf redundanten Sensoren und deren kausalen Beziehungen aufbaut, wird zur Erkennung von Fehlern in einem Spurhaltealgorithmus eingesetzt.

Ein genau definiertes Szenario mit drei Fahrzeugen auf einer zweispurigen Schnellstraße (highway) modellieren Özgüner et al. (1997b) als 'hybrides System' (Abschnitt 4.1.5), um es in der Simulation genauer zu untersuchen. Dadurch erreichen sie eine formale Repräsentation des Systems, ohne jedoch weitergehende qualitative oder quantitative Aussagen über das Systemverhalten zu treffen.

2.1.4 University of California, Berkeley

An der University of California in Berkeley (UCB) entwickelten Košecká et al. (1997) in Zusammenarbeit mit Honda einen Ansatz zur automatischen Querführung, der sich am 4D-Ansatz orientiert. Damit erreichen sie in einem Honda Accord auf kalifornischen Highways Geschwindigkeiten bis zu 90 Meilen pro Stunde. Neben verschiedenen Regelstrategien wird auch der Einfluß des Vorausschaubereiches auf den geschlossenen Kreis diskutiert (Košecká et al. 1997; Košecká et al. 1998). Daneben wurden Algorithmen für binokulares Stereo entwickelt, um Fremdfahrzeuge und Straßenmarkierungen zu erkennen (Weber et al. 1995; McLauchlan & Malik 1997). Dabei werden der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und die Straßenkrümmung geschätzt. Berichte über Versuche im geschlossenen Kreis mit automatischer Längsführung liegen nicht vor (http://robotics.eecs.berkeley.edu/~janka/PATH/stereo_drive.html, Stand: 1.4.2000).

2.2 Asiatische Gruppen

2.2.1 Mazda

Yamamoto et al. (1999) diskutieren einen Ansatz zur automatischen Querführung mit Rechnersehen, bei dem Kameras, ein Gierratensensor und ein Lenkwinkelsensor eingesetzt werden. Entgegen der gängigen Praxis sind die Kameras bei dem Versuchsfahrzeug von Mazda auf Höhe der Außenspiegel so montiert, daß die optische Achse ungefähr senkrecht zur Fahrbahn steht. Mit dieser Konfiguration konnte automatische Querführung bis zu 80 km/h auf geraden und bis zu 60 km/h auf gekrümmten Strecken (Radius 180m) auf einer Teststrecke demonstriert werden.

2.2.2 Ministerium für internationalen Handel und Industrie

Am Maschinenbauinstitut (Mechanical Engineering Laboratory) des Ministeriums für internationalen Handel und Industrie (Ministry of International Trade and Industry, MITI) werden seit Mitte der siebziger Jahre mit einem Toyota Crown MS 60 Versuche unternommen, Fahrfunktionen mit Rechnersehen zu automatisieren. Tsugawa (1993) berichtet, daß mit einer Stereoanordnung Objekte in einer Entfernung von 5 m bis 20 m erkannt werden konnten. Die Querführung wird zu Beginn der Aktivitäten noch mit Odometrie (!) durchgeführt, wobei eine maximale Geschwindigkeit von 30 km/h bei Versuchsfahrten auf einer Versuchsstrecke gefahren wurde. Inzwischen konnte auch automatisches Spurhalten und automatischer Spurwechsel mit Rechnersehen auf einer Teststrecke demonstriert werden (Kato et al. 1996; Kato et al. 1997). Bei diesen Versuchen war das Versuchsfahrzeug mit einer Stereoanordnung auf dem Dach ausgerüstet. Die Spurmarkierungen werden mit der rechten Kamera, Fremdfahrzeuge mit der Stereoanordnung erkannt.

2.2.3 Mitsubishi

Im Rahmen des Projekts ASV⁶ entwickelte Mitsubishi ein Fahrzeug mit aktiven Sicherheitsfunktionen ('active safety ASV'). Das Fahrzeug ist mit einem Mehraugensystem ('Multi-Eye System') ausgerüstet, das aus zwei Videokameras für die Fahrspurerkennung, zwei scannenden Lasern, drei Stereokameras und Nahbereichssensoren besteht. Die Sicherheit des Fahrzeugs wird durch verschiedene Fahrerassistenzfunktionen erhöht, von denen im Rahmen dieser Arbeit nur die aktiv eingreifenden Systeme betrachtet werden, die einen Teil der Informationen mit Rechnersehen akquirieren. Mit Hilfe des Lasers und der Videokameras wird eine adaptive Tempomatfunktion realisiert. Alle Sensoren des Mehraugensystems werden zur 'automatischen Kollisionsvermeidung' benötigt, die die Kontrolle über die Lenkung und die Bremse übernimmt, wenn eine Kollision sonst unvermeidbar erscheint (alle Angaben nach Mimuro et al. 1996).⁷

2.2.4 Nissan

Bei der Firma Nissan wurde Ende der achtziger Jahre in Kooperation mit MITI ein Kleinbus zum 'persönlichen Fahrzeugsystem' ('Personal Vehicle System', PVS) umgerüstet. Eine um die Gierachse ausrichtbare Kamera wurde für die Fahrspurerkennung eingesetzt, eine Stereoanordnung zur Objekterkennung (Tsugawa et al. 1993; Tsugawa 1993). Bei der automatischen Querführung wurden auf abgesperrten Strecken Geschwindigkeiten von bis zu 60 km/h auf geraden Strecken und von 10 km/h in Kurven erreicht. Mit dem Versuchsfahrzeug konnten auf einem Testgelände automatische

⁶Das Projekt 'Advanced Safety Vehicle' ('Fahrzeug mit verbesserter Sicherheit') wurde vom japanischen Ministerium für Transport und den japanischen Fahrzeugherstellern durchgeführt.

⁷Aus der vorliegenden Quelle wird nicht deutlich, in welchem Stadium der Entwicklung sich die Systeme befinden.

Ausweichmanöver bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h und autonome Fahrten im Missionskontext demonstriert werden (alle Ergebnisse nach Hattori et al. 1993).

2.2.5 Toyota

Bei Toyota wurde ein ‘automatisches Fahrzeugsystem für Schnellstraßen’ (‘Automated Highway Vehicle System’, AHVS) entwickelt, das mit Rechnersehen in der Lage war, bis zu 50 km/h automatisch quergeführt zu fahren. Mit einem zusätzlichen Radar konnte das Versuchsfahrzeug auch einem vorausfahrenden Fahrzeug mit 30 - 40 km/h folgen (Tsugawa 1993). Inoue et al. (1993) beschreiben ein System zur automatischen Spurhaltung mit einer monokularen Kameraanordnung, mit dem automatisches Spurhalten auf einer Teststrecke bis zu 80 km/h demonstriert werden konnte.

2.2.6 Universität Pohang und Hyundai

Von der Firma Hyundai und der Universität Pohang werden verschiedene Testfahrzeuge für die automatische Quer- und Längsführung umgerüstet. Kim et al. (1995) und Choi et al. (1995) stellen Ansätze und Ergebnisse zur automatischen Querführung mit Rechnersehen mit dem Testfahrzeug PRV II (POSTECH road Vehicle II) vor, Lee et al. (1996) mit dem Fahrzeug PRV III. Beide Systeme können auf Teststrecken mit Geschwindigkeiten von 30 - 45 km/h automatisch quergeregelt fahren.

2.3 Europäische Gruppen

Die Entwicklung der Automatisierung im Kraftfahrzeug wurde in Europa von 1986 - 1994 im Rahmen des Projektes ‘Prometheus’ (1987 - 1994, Abschnitt 1.2.2) maßgeblich gefördert. 720 Millionen ECU wurden in Europa, davon 130 Millionen DM in Deutschland aufgewandt, um ein gemeinsames Konzept für den Straßenverkehr zu erstellen (Zahlenangaben nach Daimler-Benz 1994; Braess & Reichart 1995a; Braess & Reichart 1995b). In der Nach-Prometheus-Ära wurden die Forschungsvorhaben im Rahmen kleinerer Projekte oder von den Firmen und Instituten direkt finanziert.

2.3.1 BMW

BMW steht den Ansätzen zur Automatisierung von Fahrfunktionen traditionell skeptisch gegenüber (Braess & Reichart 1995a; Braess & Reichart 1995b; Donges & Naab 1996). Donges & Naab (1996) stellen einen Ansatz zur eingreifenden Fahrerunterstützung vor. Aufgrund der Fahrspurerkennung mittels Bildverarbeitung wird ein Moment auf das Lenkrad gegeben, das das Fahrzeug in der Spur hält. Die Autoren bezeichnen das System dennoch als Fahrerunterstützungssystem, weil das maximale Moment so

begrenzt wird, daß die automatische Querführung ohne menschliches Zusatzmoment nicht stabil ist. Kopf (1997) und Nirschl & Kopf (1997) untersuchen, welche Anforderungen an teilautomatisierte Systeme und deren Grenzen der Automatisierung zu stellen sind, so daß sie aus Sicht des untrainierten Fahrers durchschaubar und konsistent erscheinen. Diese Arbeiten deuten darauf hin, daß auch bei BMW die Bedenken gegenüber der Automatisierung von Fahrfunktionen abnehmen.

2.3.2 C-VIS

Die Firma C-VIS ('Computer Vision und Automation') stellt ein System zur Objekterkennung vor, das im Versuchsfahrzeug Vita II von Daimler-Benz (Abschnitt 2.3.3) im geschlossenen Kreis mit automatischer Längsführung ausführlich getestet wurde. Mit dem Modul 'VisionBumper', das auf einem Stereoansatz basiert, können 1 - 2 Objekte in einer Entfernung von 5 - 35 Metern erkannt werden. Da die erlaubte Fahrzeuggeschwindigkeit zwischen 0 - 50 km/h liegt, eignet sich das System für die Hinderniserkennung in der Stadt oder im Stau. Das System 'CarTrack' erlaubt auch einen Einsatz bei höheren Geschwindigkeiten (- 130 km/h), bei denen mit einer bifokalen Kameraanordnung Objekte in einer Entfernung von 5 - 100 Metern erkannt werden können (alle Angaben nach Bohrer et al. 1995).

2.3.3 Daimler-Benz

Im Rahmen des 'Prometheus'-Projektes rüstete Daimler-Benz⁸ zwei S-Klasse Limousinen mit elektronisch ansteuerbaren Aktuatoren aus. Das eine Fahrzeug wurde von der Universität der Bundeswehr zum 'Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen' (VaMoRs-P⁹, oder kurz VaMP, Abschnitt 7.1.1) umgerüstet, das andere von Daimler-Benz zu einer 'Applikation für die Technologie des Rechnersehens' ('Vision Technology Application', Vita II). Vita II ist mit insgesamt 18 Kameras ausgerüstet: An jeder Seite des Fahrzeugs befinden sich zwei Einheiten für Rechnersehen mit je 3 Kameras. Für den Vorausschau- und den Rückschaubereich ist das Fahrzeug mit je einer Plattform der UniBwM zum aktiven Sehen ausgestattet (z.B. Schiehlen & Dickmanns 1994). Im Vorausschaubereich verfügt Vita II zusätzlich über eine Stereokameraanordnung, die von Bildverarbeitungsmodulen der Universität Bochum (Brauckmann et al. 1994) und der Firma C-VIS (Abschnitt 2.3.2) genutzt wurde. Details zur technischen Ausrüstung finden sich, soweit Vita II und VaMP identisch sind, in Abschnitt 7.1.1 und bei Ulmer (1994). Wie VaMP demonstrierte Vita II im Rahmen des 'Prometheus'-Projektes automatische Längs- und Querführung auf der Autobahn A1 vom Flughafen Charles-de-Gaulle in Paris nach Lille als offizielles Demonstrationsfahrzeug der Gruppe 'Hindernisvermeidung' ('Obstacle Avoidance', CED-3). Besonders hervorzuheben ist die Fähigkeit, Verkehrszeichen zu erkennen (Zheng et al. 1994;

⁸seit 1998 Daimler-Chrysler

⁹P steht dabei für PKW als Unterscheidung von dem Mercedes Kastenwagen VaMoRs.

Estable et al. 1994; Ritter 1996), die in Zusammenarbeit mit der Universität Koblenz entwickelt wurde. Ein Modul zur Verhaltensgenerierung erlaubt es Vita II, autonom Spurwechsel durchzuführen, wobei der Fahrer die Aufgabe hat, die Fahrzeugführung zu überwachen (Abschnitt 6.1.1).

Wie BMW (Abschnitt 2.3.1) untersucht auch Daimler-Benz ein aktives Unterstützungssystem zur Spurhaltung (Franke et al. 1994; Mehring et al. 1996). Anders als beim Ansatz der Konkurrenz wird ein kleiner Korrekturwinkel zu dem vom Fahrer vorgegebenen Lenkwinkel addiert. Das System 'Optische Spurhaltung' wurde im Versuchsfahrzeug OSCAR ('Optically Steered CAR') getestet, einem Fahrzeug, das zwischen 1992 und 1995 bereits 3000 km automatisch quergeregelt zurücklegte (Franke et al. 1994).

Mit dem Versuchsfahrzeug OTTO untersuchte Daimler-Benz, wie Züge (' platoons') von Lastkraftwagen im gemischten Verkehr gebildet werden können. Dem ersten Fahrzeug, das manuell gefahren wird, folgen dicht aufeinander unbemannte. OTTO ist ein Mercedes-Benz D814 (7,5 Tonnen), dessen Aktuatoren elektronisch angesteuert werden können. Neben einer Videokamera verfügt OTTO auch über die Möglichkeit der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Mit Hilfe eines auf dem Vorderfahrzeug aufgebrauchten Testmusters, das alternativ passiv oder aktiv mit Infrarot realisiert wird, kann Triangulation auch mit einer Kamera zur Abstandsbestimmung eingesetzt werden. Automatische Quer- und Längsführung des Folgefahrzeugs wurde erfolgreich getestet und demonstriert (alle Angaben zu OTTO nach Franke et al. 1995). Die Kopplung zwischen den Fahrzeugen wird auch als 'elektronische Deichsel' bezeichnet (Metzler 1997).

Die mit OTTO entwickelte Technik wurde auch im PROMOTE - CHAUFFEUR Programm eingesetzt und auf der Konferenz 'Intelligent Vehicles IV' in Stuttgart 1998 erfolgreich demonstriert. Als Testfahrzeuge dienten dabei schwere ACTROS Nutzfahrzeuge von Daimler-Benz.¹⁰ Gehrig & Stein (1998) stellen einen Algorithmus vor, bei dem die seitliche Ablage eines folgenden Fahrzeuges von der Trajektorie des vorausfahrenden Fahrzeuges deutlich verringert wird.

Görzig & Franke (1998, S. 545ff.) sehen die in Abschnitt 3.3 vorgeschlagene funktionale Systemarchitektur als geeigneten Ansatz an, der die wachsenden Anforderungen an ein autonomes Fahrzeug erfüllt. Bei der softwaretechnischen Realisierung setzen sie ein Multiagenten-System ein, das die vorhandenen Ressourcen auf in spezifischen Situationen relevante Aufgaben fokussiert. Unter einem Agenten verstehen sie dabei eine funktionale Einheit, die Dienste liefert und einen gewissen Grad der Autonomie hat. Als Kommunikationssystem wird PVM ('Parallel Virtual Machine') verwendet; alle Rechenknoten verfügen über synchronisierte Zeitstempel.

¹⁰In dem Programm arbeiten Hersteller von Nutzfahrzeugen (Daimler-Benz, Centro Ricerche Fiat, IVECO), Zulieferer (Bosch, CRL, WABCO, ZF, ELTRAC), Dienstleister (TÜV Rheinland, Benz Consult, Centro Studi sui Sistemi Trasporto, MIZAR Automazione, Institut für Verkehrstechnik der Universität Köln), Rechtsanwälte (Pünder, Weber, Volhard und Axster) und Endnutzer (Alpen Straßen AG, Arcese Trasporti S.p.A., Willi Betz) zusammen. Alle Angaben nach einer Informationsbroschüre, die auf der IV '98 ausgehändigt wurde. Kontaktadresse: Matthias Schulze, Daimler-Benz AG, Dept.: T 728, 70546 Stuttgart.

Reichardt (1998) fordert Methoden zur Bestimmung der eigenen Leistungsfähigkeit, Veröffentlichungen zu Realisierungen sind mir nicht bekannt. Besonders betont werden auch die Anforderungen an die Sicherheit der Systeme (Metzler 1997). Konkrete Ansätze wurden im Bereich der elektronisch ansteuerbaren Lenkung entwickelt (Weiß 1993; Göbel 1994).

Reichardt (1998) und Metzler (1997) stellen einen Ansatz zur flexiblen Automatisierung vor, bei dem das Fahrzeug im Stau und bei Schrittgeschwindigkeit autonom fährt, sonst von einem menschlichen Fahrer gelenkt wird. Untersuchungen im Fahrsimulator haben ergeben, daß die Reaktionszeit des Fahrers nicht geringer wird, wenn er sich im autonomen Modus mit anderen Tätigkeiten wie etwa Büroarbeiten beschäftigt. Die Bediengeräte für die menschlichen Nebentätigkeiten sollten in das Lenkrad und das Armaturenbrett integriert werden, damit der Fahrer weder das Lenkrad loslassen noch den Blick weiter als zum Armaturenbrett abwenden muß.

Die Fähigkeiten, die in den letzten Jahren für städtische Umgebungen entwickelt wurden, werden hier nicht näher erläutert, da sie außerhalb der betrachteten Domäne liegen (Franke et al. 1997; Paetzold & Franke 1998; Wöhler et al. 1998; Franke et al. 1998).

Als erstes kommerzielles Produkt mit Rechnersehen in Nutzfahrzeugen wird ein von der Firma Odetics¹¹ entwickeltes System im Jahr 2000 als Zusatzausstattung bei der Konzernmarke Freightliner angeboten, das bei Verlassen der Spur warnt (lane departure warning system, Coughlan 2000, S. 52).

2.3.4 Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung

Tölle (1996, S. 123) fordert ein ‘Kopilotensystem’, das ‘in der Lage sein muß, die vom Fahrer ausgeführten Fahrmanöver nachzubilden und automatisch nachzufahren.’ Dafür entwickelt er einen Ansatz zur generischen Berechnung von Solltrajektorien für Standardmanöver. Eine ausgewählte Manöversequenz ‘Fahrspurwechsel - Wenden’ wird mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems ‘MiniVISTA’ demonstriert (Gengenbach, 1994).¹²

Einen guten Überblick über die Wahrnehmungsfähigkeiten, die die Fahrspurerkennung, die Hinderniserkennung und die Erkennung von Kreuzungen einschließen, gibt Enkelmann (1997).

Als Testfahrzeuge stehen am Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB) ein Lastkraftwagen vom Typ Mercedes-Benz 609D und ein Personenkraftwagen vom Typ BMW 735L zur Verfügung, in denen alle Standardaktuatoren elektronisch angesteuert werden können (Tölle 1996). Seit Januar 1995 dürfen mit diesen Fahrzeugen auch im öffentlichen Straßenverkehr Versuchsfahrten vorgenommen werden (Enkelmann 1997, S. 71).

¹¹<http://www.odetics-its.com/html/products/autovupre.html>

¹²zitiert nach Tölle (1996).

2.3.5 Institut national de recherche en informatique et en automatique

Im Projekt PRAXITELE werden Züge mit mehreren kleinen Elektrofahrzeugen (max. sechs) mit Hilfe von Bildverarbeitung gebildet. Nur das erste Fahrzeug ist bemannt; alle weiteren folgen in einem geschwindigkeitsabhängigen Abstand von ein bis fünf Metern. Hat ein Fahrzeug des Zuges seinen Zielort erreicht, kann es selbständig parallel einparken. Der Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug werden mit Bildverarbeitung bestimmt (Daviet & Parent 1996). Laugier et al. (1996) beschreiben einen manöverbasierten Ansatz, mit dem auch Spurwechsel bei Schrittgeschwindigkeit demonstriert werden können.

2.3.6 Niedersächsisches Projekt ‘Autonomes Fahren’

In dem Projekt ‘Autonomes Fahren’ entwickelt ein niedersächsisches Konsortium mit Hilfe öffentlicher und industrieller Fördermittel autonome Fahrzeuge. Die Technik soll zunächst dazu dienen, Langstreckenfahrten auf Teststrecken zu automatisieren. Längerfristig ist auch an Anwendungen auf öffentlichen Straßen gedacht. An dem Projekt unter der Leitung von Volkswagen nehmen die Firmen Bosch, Kasprich-IBEO, Witt, das Institut SICAN und die Technische Universität Braunschweig teil. Die Testfahrzeuge, die dank des modularen Aufbaus in wenigen Stunden umgerüstet werden sollen, sollen im Endausbau mit einem Radar und zwei Videokameras in der Vorausschau, drei Laserscannern für 360 Grad Rundumsicht, differentiell globalem Positionierungssystem (DGPS) und inertialbasiertem Navigationssystem (INS) ausgerüstet werden (Weisser et al. 1998). Die Fahrspurerkennung soll redundant ausgelegt werden. Die Eigenlage relativ zur Fahrspur wird mit Hilfe von Rechnersehen erkannt. Zusätzlich wird sie auch mit DGPS, INS und einer hochgenauen digitalen Karte bestimmt (Goldbeck et al. 1998). Konzepte für die Erkennung und Verfolgung von Hindernissen stellen Stiller et al. (1998) vor; Ansätze zur Bahnplanung und Regelung entwickeln Becker et al. (1998). Ein Fahrroboter, der auf den Fahrersitz montiert wird, betätigt die konventionellen Stellglieder (Schwarze et al. 1998). Söhnitz & Schwarze (1999) entwerfen eine robuste Querregelung, bei der der Fahrroboter als Teil des Aktuators betrachtet wird.

Integraler Bestandteil des Projektes ‘Autonomes Fahren’ ist die Analyse der System-sicherheit (Binfet-Kull et al. 1998). Dazu wurden Maßnahmen auf den verschiedensten Ebenen getroffen: Als Leitlinien des Handelns wurden vorgegeben: Sicherheit vor Verfügbarkeit. Ein Fahrzeug, das in der Lage ist, mittels elektronischen Systemen ohne menschlichen Eingriff zu fahren (autonom), soll keine größere Bedrohung für den Menschen darstellen als die Bedrohung durch menschliche Fahrer. Verschärfend wird gefordert, daß die Maschine hundert Mal sicherer sein soll als Menschen.

Da bestehende Standards nur teilweise anwendbar seien, sollen eigene Standards für autonome Fahrzeuge entwickelt werden. Zur Qualitätssicherung sollen drei verschiedene Methoden angewendet werden: die Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse (‘failure

mode and effect analysis', FMEA), die Fehlerbaumanalyse und die Markov-Analyse. Redundanz der Komponenten soll durch funktionale Redundanz ersetzt werden. Als Beispiel wird ein elektronischer Kopilot entwickelt, der den Fahrroboter bei Fehlfunktionen korrigiert und das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführt (alle Angaben nach Binfet-Kull et al. 1998). Bisher wurde dazu eine 'automatische Notbremse' realisiert, die das autonome Fahrzeug bei einer Geschwindigkeit von maximal 7 m/s automatisch abbremst (Ameling 1999). Weisser et al. (1999) stellen ein Konzept für ein Gerät zur Fahrzeugdiagnose vor, das Fehlfunktionen bei den Fahrten auf der Versuchsstrecke entdecken und klassifizieren soll.

2.3.7 Ungarische Akademie der Wissenschaften und Knorr-Bremse, Ungarn

In einem ungarischen Forschungsprojekt soll das unbeabsichtigte Verlassen der Fahrspur detektiert und verhindert werden (Kovács et al. 1998, S. 46-50). Dazu wird ein Bildverarbeitungssystem zur Fahrspurerkennung und ein System zur Stabilitätskontrolle ('Drive Stability Control', DSC) kombiniert. Erkennt das System, daß das Fahrzeug die Fahrspur verlassen wird, so wird zunächst der Fahrer gewarnt. Reagiert er nicht, so wird über das DSC-System ein Moment erzeugt, das das Fahrzeug in der Spur hält.

2.3.8 Universität Parma

An der Universität Parma wird der GOLD-Algorithmus ('Generic Obstacle and Lane Detection') eingesetzt, um Hindernisse, Fahrspuren und die Eigenlage relativ zur eigenen Spur zu erkennen (Bertozzi et al. 1997). Für die Hinderniserkennung wird ein Stereoalgorithmus eingesetzt; bei der Spurerkennung wird versucht, durch eine Transformation die perspektivische Verzerrung zu eliminieren und die Spurmarkierungen kantenbasiert zu detektieren. Aufgrund der Ablage, des Gierwinkels zur Fahrspur und der ermittelten Krümmung wird das Fahrzeug quergeregelt (Bertozzi et al. 1998).

Als Versuchsfahrzeug wird das Fahrzeug ARGO,¹³ ein Lancia Thema 2000 mit elektronisch ansteuerbarer Lenkung, eingesetzt. Mit diesem Fahrzeug wurde auch die medienwirksam inszenierte 1000 Meilen-Fahrt (mille miglia) durchgeführt, die in Abschnitt 8.1 genauer analysiert wird.

¹³benannt nach der Argonautensage

Teil II

Ein System zur flexiblen Automatisierung von Kraftfahrzeugen

Kapitel 3

Funktionale Systemarchitektur

Die flexible Automatisierung von Fahrfunktionen mittels Rechnersehen erfordert Konzepte zur Strukturierung komplexer Systeme. Im folgenden Kapitel werden zunächst die Systemarchitekturen kurz zusammengefaßt, die diese Arbeit neben dem Entwicklungshintergrund am ISF (Abschnitt 1.2) beeinflußt haben. Darauf aufbauend wird die neue Systemarchitektur für autonome Fahrzeuge aus funktionaler Sicht dargestellt. In Kapitel 4 schließt sich eine Diskussion der im System repräsentierten Modelle und damit der Struktur der Wissensrepräsentation an. Aspekte der Fahrzeugführung und der Verhaltensentscheidung werden in den Kapiteln 5 und 6 vertieft.

Die naheliegende Frage, wie der Mensch komplexe Aufgaben wie das Führen eines Kraftfahrzeugs löst, führte zu der Aufstellung verschiedener Modelle menschlichen Verhaltens. Eines der bekanntesten, das drei-Ebenen Modell von Rasmussen, hat auch die hier vorliegende Systemarchitektur inspiriert (Abschnitt 3.1).

Besondere Bedeutung für diese Arbeit haben die Theorie der hierarchischen Mehrebenensysteme (Abschnitt 3.2.1) und die darauf aufbauenden ‘Intelligenten Führungssysteme’ (Abschnitt 3.2.2), wobei der Begriff der ‘Intelligenz’ in diesem Zusammenhang inflationär gebraucht wird (Abschnitt 3.2.3). Stimulierend für diese Arbeit war die Auseinandersetzung mit den am National Institute of Technology entworfenen ‘echtzeitfähigen Führungssystemen’ (RCS, Abschnitt 3.2.4), die im Rahmen des Projektes ‘AutoNav’ (Abschnitt 1.2.2) zusammen mit dem 4D-Ansatz (Abschnitt 1.2) die grundlegende Architektur für ein amerikanisches militärisches Projekt bilden (Demo III, Albus 1997). Die RCS-Architektur gehört zu den Ansätzen, denen Brooks (1986) als konstruktiven Gegenvorschlag seine Subsumptionsarchitektur, die wohl bekannteste verhaltensbasierte Systemarchitektur, entgegenstellt (Abschnitt 3.2.5). Das Verdienst der verhaltensbasierten Architekturen besteht darin, daß die Verhaltensweisen in den Mittelpunkt der Systemarchitektur gerückt wurden, die in Ansätzen aus dem Bereich der ‘künstlichen Intelligenz’ wie dem RCS zumindest zeitweise zu wenig berücksichtigt wurden.¹ Der Nachweis, daß mit verhaltensbasierten Ansätzen auch Kraftfahrzeuge geführt werden können, gelang an der Carnegie Mellon University (Abschnitt 2.1.1)

¹Einen guten Überblick über verhaltensbasierte Architekturen bietet Arkin (1998).

mit einem Ansatz, den Arkin (1998) als hybrid charakterisieren würde, da er (im Gegensatz zu Brooks 1986) explizite interne Modelle zuläßt.

Die in dieser Arbeit entwickelte Systemarchitektur ist einerseits hierarchisch strukturiert (Abschnitt 3.3), andererseits aber auch verhaltensorientiert (Abschnitt 5.1.2). Da sie auch eine zentrale Entscheidungsinstanz aufweist (Abschnitt 6.2), entspricht sie zumindest in einigen Punkten den Beobachtungen, die bei vergleichenden Architekturstudien gemacht wurden:

‘One of the striking observations of comparative architecture studies is that the architectural design tends, as much as anything, to reflect the organization of the architect. Thus, US government labs often propose hierarchical architectures; many corporate architectures are matrix-organized... A common University architecture has a centralized ‘intelligent’ or ‘coordinating’ module (functionally equivalent to the professor), surrounded by dedicated special-purpose modules that do all the work (read: graduate students)... It is probably true that the best way to organize the system you are building is to match the organization that is doing the work.’ (Thorpe 1992)

3.1 Der Mensch als Vorbild für autonome Systeme

Das Führen eines Kraftfahrzeuges in unbekannter, dynamischer Umgebung gehört zu den Aufgaben, die täglich von Millionen von Menschen gelöst werden. Was liegt also bei der Suche nach einer technischen Lösung näher, als menschliches Verhalten imitieren zu wollen?

Aus der Psychologie sind Modellierungen verschiedener Modellierungstiefe bekannt, die den Menschen als Bediener von technischen Systemen beschreiben.² Zunächst wird anhand eines einfachen Modells untersucht, ob sich daraus konstruktive Anregungen für den Aufbau eines technischen autonomen Systems ableiten lassen.

Abbildung 3.1 zeigt eine ‘simplified illustration of three levels of performance of skilled human operators’ (Rasmussen 1983, S. 258). Diese drei Ebenen menschlichen Verhaltens unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Repräsentationsformen, ihrem Grad der Abstraktion und ihrem Zeithorizont. In den folgenden Abschnitten wird das Modell nach Rasmussen (1983) vorgestellt, wobei die Rezeption Rasmussens durch Johannsen (1993) mit berücksichtigt wird. Rasmussen unterscheidet drei kognitive Verhaltens- oder Fertigkeitsebenen, die fertigkeitsbasierte Ebene, die regelbasierte Ebene und die wissensbasierte Ebene.

²Eine Einführung in verschiedene Modelle gibt Johannsen (1993).

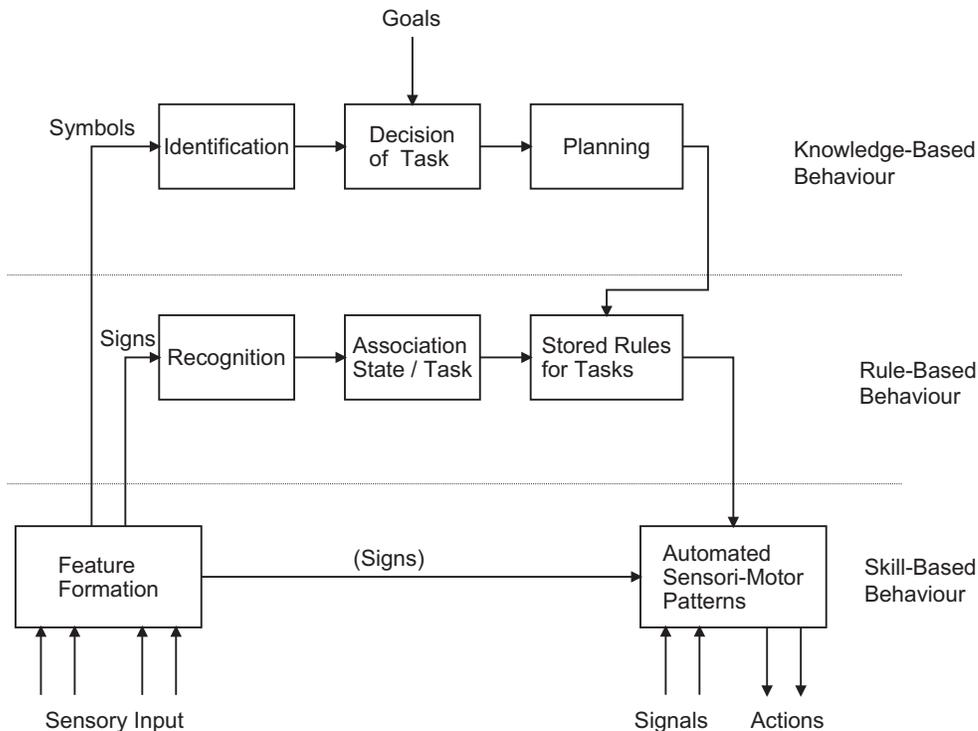


Abbildung 3.1: Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen (1983).

3.1.1 Fertigkeitsbasiertes Verhalten

‘The skill-based behavior represents sensory-motor performance during acts or activities which, following a statement of an intention, take place without conscious control as smooth, automated, and highly integrated patterns of behavior... Performance is based on feedforward control and depends upon a very flexible and efficient dynamic internal world model.’ (Rasmussen 1983, S. 258f)

Der Mensch trainiert sehr effiziente interne dynamische Modelle, die es ihm in Kombination mit seinem exzellenten Wahrnehmungsapparat erlauben, mit vergleichsweise langsamer Informationsverarbeitung schnell zu reagieren. Leider stützt sich die Rezeption von Rasmussen im deutschen Sprachraum vielfach auf Johannsen (1993), der das Kernstück des fertigkeitsbasierten Verhaltens - die internen dynamischen Modelle - ignoriert. An Stelle von Vorsteuerungen spricht Johannsen - immer noch Rasmussen rezipierend - von Regulationen (Rückkopplungen?) und verfälscht damit Rasmussens Modell erheblich.³

³Johannsen geht noch weiter, wenn er den Begriff ‘fertigkeitsbasiertes Verhalten’ in Rasmussens Schema (!) durch den Begriff ‘sensomotorische Fertigkeiten’ ersetzt und dazu bemerkt, dies werde ‘bei Rasmussen mißverständlich nur fertigkeitsbasiertes Verhalten oder skill-based behaviour genannt’ (Johannsen 1993, S. 133).

3.1.2 Regelbasiertes Verhalten

‘At the next level of rule-based behavior, the composition of such a sequence of subroutines in a familiar work situation is typically controlled by a stored rule or procedure... The point here is that performance is goal-oriented but structured by ‘feedforward control’ through a stored rule... The control is teleological in the sense that the rule or control is selected from previous successful experiences.’ (Rasmussen 1983, S. 259)

In vertrauten Situationen, die durch gespeicherte Regeln gemeistert werden können, setzt der Mensch regelbasiertes Verhalten ein. Die notwendigen Regeln können entweder durch Erfahrung erworben - erlernt - werden oder aus anderen Regeln abgeleitet werden. Bevor die Regeln eingesetzt werden können, muß die Situation zunächst als ‘bekannt’ oder ‘vertraut’ klassifiziert werden. Die Regeln werden auf einfache Weise - etwa als wenn-dann-Regeln - formuliert. Mit Hilfe der gespeicherten Regeln wird fertigkeitbasiertes Verhalten auf der unterlagerten Ebene koordiniert. ‘Der äußere Gesamteindruck regelbasierten Verhaltens ist der stereotyper Tätigkeiten in vielen Aufgabensituationen der meisten Mensch-Maschine-Systeme.’ (Johannsen 1993)

3.1.3 Wissensbasiertes Verhalten

‘During unfamiliar situations, faced with an environment for which no know-how or rules for control are available from previous encounters, the control of performance must move to a higher conceptual level, in which performance is goal-controlled and knowledge-based. In this situation, the goal is explicitly formulated, based on an analysis of the environment and the overall aims of the person. Then a useful plan is developed - by selection - such that different plans are considered... At this level of functional reasoning, the internal structure of the system is explicitly represented by a ‘mental model’ which may take several forms.’ (Rasmussen 1983, S. 259)

Sind Situationen unbekannt, muß der Mensch auf andere Methoden der Informationsverarbeitung auf einer höheren Ebene zurückgreifen. Diese Ebene wird dadurch gekennzeichnet, daß Ziele und Hintergrundwissen explizit repräsentiert werden. Aus der Menge möglicher Strategien - bei Rasmussen Plänen - wird eine hinsichtlich der Optimierungskriterien optimale ausgewählt. Auf der wissensbasierten Ebene existiert ein internes Modell von dem vom Menschen zu bedienenden technischen System.

3.1.4 Wissensrepräsentation

Rasmussen unterscheidet zwischen verschiedenen Informationsformen auf den drei kognitiven Verhaltensebenen, zwischen Signalen, Zeichen und Symbolen.

‘Signals are sensory data representing time-space variables from a dynamical spatial configuration in the environment, and they can be processed by the organism as continuous variables.

Signs indicate a state in the environment with reference to certain conventions for acts. Signs are related to certain features in the environment and the connected conditions for action. Signs cannot be processed directly, they serve to activate stored patterns of behaviour.

Symbols represent other information, variables, relations, and properties and can be formally processed. Symbols are abstract constructs related to and defined by a formal structure of relations and processes - which by conventions can be related to features of the external world.’ (Rasmussen 1983, S. 261)

Angewandt auf ein Verkehrsszenario sind die Zustandsgrößen eines Fahrzeugs typische Signale. Das Fahrzeug befindet sich in einem logischen Zustand wie Spurfahren, Spurwechsel oder Konvoifahren, der auch durch Zeichen dargestellt wird. Der erfahrene Fahrer interpretiert einen Ball, der auf die Straße rollt, als Symbol, daß ein Kind dem Ball auf die Straße folgen könnte. Mit dem Zeichen Ball im logischen Zustand ‘Rollt auf die Straße’ ist die Bedeutung ‘Vorsicht spielende Kinder’ konnotiert.

3.1.5 Vorbild für technische Systeme?

Das Modell nach Rasmussen enthält geeignete Konzepte zur Strukturierung komplexer Systeme: Es unterstützt unterschiedliche Abstraktionsebenen und Zeithorizonte. Die hierarchische Schichtung und die Etablierung unterschiedlicher Repräsentationsformen auf den einzelnen Schichten bewähren sich auch in technischen Systemen.

Relevante Unterschiede zwischen technischen Systemen und dem Menschen sollten jedoch nicht übersehen werden.

- Menschliche Informationsverarbeitung ist relativ langsam; elektrochemische Schaltvorgänge werden in etwa einer Millisekunde ausgeführt. Ihre Leistungsfähigkeit erhält sie durch hochparallele Verarbeitung: Das Gehirn enthält mindestens 15 Milliarden Nervenzellen; eine einzelne Nervenzelle kann bis zu mehreren 10000 Synapsen besitzen (Oeser & Seitelberger 1995, S. 44). Damit werden pro Sekunde etwa 1 Gbit Eingangsinformationen verarbeitet und etwa 10 Mbit ausgegeben (Oeser & Seitelberger 1995, S. 46). Die technische Hardware ist hingegen um mehrere (ca. 5 bis 7) Größenordnungen schneller (100 Mhz Taktrate entsprechen 10 Nanosekunden Zykluszeit), verfügt aber nur über einige wenige Querverbindungen. Hochparallele Rechnerarchitekturen und Algorithmen haben sich bisher nicht durchgesetzt.
- Die Aktuatorik in technischen Systemen ist oft um ein Vielfaches schneller und stärker als die des Menschen. Damit stehen dem technischen autonomen System

Verhaltensweisen zur Verfügung, die der Mensch nicht oder nur mit anderen Strategien ausführen kann.

- Mit dem 4D-Ansatz (Abschnitt 1.2, Dickmanns 1992) zum dynamischen maschinellen Sehen wurde ein Ansatz zur Erkennung entwickelt, der die direkte Kopplung von Sensorik und Motorik, wie sie bei Johannsen auf der sensomotorischen Ebene vorhanden ist, aufhebt und schon auf dieser Ebene physikalische Objekte explizit repräsentiert.
- Das maschinelle Lernen befindet sich, verglichen mit menschlichem Lernen, in den Anfängen. Daher sollte besonders bei sicherheitskritischen Anwendungen auf Methoden zurückgegriffen werden, bei denen Stabilität und Konvergenz beweisbar sind.

Tolle (1991, S. 89) weist darauf hin, daß es bei der Modellierung menschlichen Verhaltens auf die geeignete Modellierungstiefe ankommt. Er plädiert dafür, daß wir uns entgegen vorherrschenden modischen Trends ‘als nutzungsorientierte Ingenieure zunächst mit der obersten, allgemeinsten Modellierungsebene begnügen, also der Verhaltensebene und nur in Sonderfällen bei Detailfragen eine Modellierung der zweiten, neuronal orientierten Ebene nutzen’ (Tolle 1991, S. 89).

Im Bereich der Anthropotechnik wurden wesentlich detailliertere Modelle für menschliches Verhalten entwickelt als das diskutierte Drei-Ebenen-Modell.⁴ Je stärker diese Modelle aber auf die Repräsentation von Informationen im Menschen und auf die Verwaltung der beschränkten menschlichen Ressourcen eingehen, um so schwieriger wird es, aus der Modellierung der menschlichen Informationsverarbeitung Konzepte für technische Systeme abzuleiten.

3.2 Ansätze zur Strukturierung komplexer Systeme

3.2.1 Theorie der hierarchischen Mehrebenensysteme

Eine gute Einführung in die Theorie der hierarchischen Mehrebenensysteme geben Mesarovic et al. (1970). Abbildung 3.2 verdeutlicht die Grundidee der vertikalen Interaktion zwischen Modulen auf verschiedenen Ebenen einer Hierarchie (nach Mesarovic et al. 1970, S. 35). In Systemen, die unter Echtzeitbedingungen arbeiten, tritt Intervention einer höheren Ebene in die Arbeit einer unterlagerten Ebene häufig in der Form auf, daß die Parameter auf der unteren Ebene geändert werden. Die Module auf einer unterlagerten Ebene geben den höheren Ebenen ein Maß für ihre aktuelle Leistungsfähigkeit (‘performance’) an (Mesarovic et al. 1970, S. 36).

⁴Einen Überblick dazu findet man z.B. in Johannsen (1993).

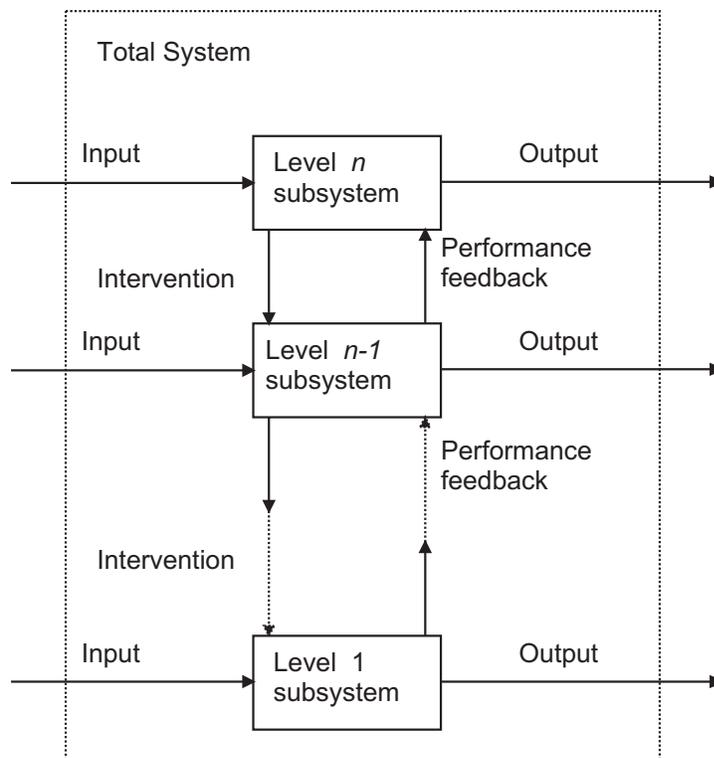


Abbildung 3.2: Vertikale Interaktion zwischen verschiedenen Hierarchieebenen (Mesarovic et al. 1970, S. 35)

Mesarovic et al. (1970, S. 37ff) unterscheiden zwischen drei verschiedenen Arten von Hierarchien:

- Hierarchie von Beschreibungsebenen ('stratum'),
- Hierarchie bei der Entscheidungsfindung ('layer'),
- Organisatorische Hierarchie ('echelon'),

die im folgenden näher erläutert werden sollen.

Hierarchie von Beschreibungsebenen

Ein komplexes Problem kann oft auf verschiedenen Beschreibungsebenen dargestellt werden. Auf jeder Beschreibungsebene gibt es geeignete Repräsentationsformen und Methoden, mit denen das Systemverhalten modelliert wird. Die Verwendung von mehreren Beschreibungsebenen führt zu einer Hierarchie der Beschreibungssprachen. Zwischen den Sprachelementen überlagerter Ebenen bestehen semantische Beziehungen. Bewegt man sich in der Hierarchie nach unten, erhält man eine detailliertere Erklärung; auf den höheren Ebenen erhält man ein tieferes Verständnis der Bedeutung.

Hierarchie bei der Entscheidungsfindung

Die Hierarchie bei der Entscheidungsfindung dient der vertikalen Zerlegung eines Problems in Teilprobleme (Mesarovic et al. 1970, S. 52). Dazu wird die Lösung eines komplexen Entscheidungsproblems ersetzt durch die Lösung einer Familie von sequentiell arrangierten, einfacheren Unterproblemen, so daß die Lösung aller Unterprobleme in der Familie die Lösung des ursprünglichen Problems ergibt (Mesarovic et al. 1970, S. 44). Die entstehende Hierarchie wird als Hierarchie der Entscheidungsebenen bezeichnet; das ganze Entscheidungssystem heißt Mehrebenen-Entscheidungssystem.

Organisatorische Hierarchie

In Erweiterung zu den Mehrebenen-Entscheidungssystemen führen Mesarovic et al. (1970, S. 50ff) Mehrebenen-Entscheidungssysteme mit mehreren Zielen ein. Zusätzlich zu den einfachen Mehrebenen-Entscheidungssystemen können bei diesen komplexeren Systemen konfliktive Ziele auftreten. Mesarovic et al. betonen eine hervorstechende Eigenschaft von Systemen mit organisatorischer Hierarchie:

‘... it is in the very nature of the multilevel, multigoal systems that the higher level units condition but do not completely control the goal-seeking activities of the lower level units. The lower level units have to be given some freedom of action to select their own decision variables; these decision variables might be, but are not necessarily, the ones which the higher level units would select. Such a freedom of action is noticeable in any social or biological multilevel system. In the man-made systems, use of resources available for decision making can be economized only if such a freedom of action is provided at the lower levels. It can be shown that it is *essential for the effective usage of the multilevel structure that the decision units be given a freedom of action*; a suitable division of decision-making effort among the units on different levels should be established.’ (Mesarovic et al. 1970, S. 50)

Die daraus entstehenden Entscheidungshierarchien zeichnen sich dadurch aus, daß die obere Entscheidungsinstanz die unteren Entscheidungsinstanzen zwar koordiniert, ihnen aber Handlungsspielraum läßt. Die unteren Entscheidungsinstanzen können sich in einem von der oberen Entscheidungsinstanz vorgegebenen Rahmen beeinflussen. Treten dennoch Konflikte auf oder genügt die Leistungsfähigkeit der untergeordneten Entscheidungsmodule nicht ihren Anforderungen, so bestimmt die obere Entscheidungsinstanz die einzuleitenden Handlungen. Die in Abschnitt 6.2 vorgestellten Entscheidungsmodule bilden in diesem Sinne eine organisatorische Hierarchie.

Eigenschaften hierarchischer Systeme

Für alle drei Arten von Hierarchien lassen sich folgende Grundkonzepte formulieren:

- Je höher eine Einheit in der Hierarchie angesiedelt ist, um so größer ist der Ausschnitt vom Gesamtsystem, den die Einheit überblickt.
- Die Entscheidungsperiode auf einer höheren Ebene ist länger als die auf der darunter liegenden.
- Eine Einheit auf einer höheren Ebene ist mit langsameren Aspekten des Systemverhaltens befaßt.
- Beschreibungen und Probleme auf höheren Ebenen sind weniger gut strukturiert, mit mehr Unsicherheit behaftet und schwieriger quantitativ zu formalisieren.

3.2.2 Theorie der intelligenten Führungssysteme

Nach Saridis wurde der Begriff ‘intelligente Führungssysteme’ (‘Intelligent Control Systems’) von Fu 1971 definiert als das Gebiet jenseits von adaptiven, lernenden und selbstorganisierenden Steuerungssystemen, in dem sich ‘Künstliche Intelligenz’ und ‘Operations Research’ treffen (Saridis 1985).

Eine Einführung in die Theorie der ‘Intelligenten Führungssysteme’ geben Antsaklis & Passino (1993). Für ein Raumfahrzeug mit hohem Grad an Autonomie konzipieren sie eine funktionale Systemarchitektur. Darüber hinaus fassen sie Grundprinzipien zusammen, die bei der Entwicklung eines ‘Intelligenten Führungssystems’ beachtet werden sollten.

Nach Antsaklis & Passino (1993) sollte ein ‘intelligentes Führungssystem’ einen hohen Grad an Fehlertoleranz aufweisen und die Fähigkeit, auch komplexe Handlungsabläufe zu planen. Es muß mit einer Schnittstelle zum Menschen und oft auch zu anderen technischen Systemen ausgestattet sein. Das System muß auf den oberen Ebenen die Fähigkeit haben, seine eigene dynamische Systemantwort aufzunehmen und damit zu überwachen, ob die Pläne richtig ausgeführt wurden. Im Fehlerfalle sollte das System ‘graceful degradation’ zeigen: Im autonomen Fall muß das System selbständig einen sicheren Zustand einnehmen; im semiautonomen Fall muß es dem menschlichen Bediener genügend Zeit geben, die Kontrolle über das System zu übernehmen. Antsaklis & Passino (1993) fordern, daß der Mensch bei aller ‘intelligenten Technik’ die letzte Verantwortung behält: Menschen sollten immer die Möglichkeit haben, die Kontrolle über das autonome System zu übernehmen.

Um die hohen Anforderungen zu erfüllen, schlagen die Autoren eine hierarchische funktionale Systemarchitektur mit drei Ebenen vor,⁵ die *Ausführungsebene* (execution level), *Koordinationssebene* (coordination level) und *Management- und Organisationsebene* (management and organization level) genannt werden. Wegen der unterschiedlichen

⁵Drei Ebenen hätten sich allgemein durchgesetzt, ohne daß dies wirklich zwingend für eine funktionale Systemarchitektur sei: ‘... somewhat standard viewpoint that there are three major levels in the hierarchy. It must be stressed that the system may have more or fewer than three levels (Antsaklis & Passino 1993, S. 7).’

Aufgaben, die vom System gelöst werden müssen, sind unterschiedliche Methoden sinnvoll: Auf den unteren Ebenen wird man mehr auf algorithmisch-numerische Methoden, auf den oberen Ebenen eher auf symbolische Methoden zur Entscheidungsfindung ('decision making symbolic methods') zurückgreifen.

Parameter eines Subsystems können von Systemen auf der nächsthöheren Ebene geändert werden. Alle Subsysteme melden Status und Gesundheitsinformationen ('status and health information', Antsaklis & Passino 1993, S. 8) an obere Ebenen. Die Einfachheit und der Grad der Abstraktion von Anweisungen in einem autonomen Regler hängt von der Leistungsfähigkeit seiner Komponenten ab. Je ausgeklügelter die Ausführungsebene ist, um so einfacher können die Befehle sein, die von der nächsthöheren Ebene vorgegeben werden.

Bestandteil auf jeder Ebene der Hierarchie ist ein Modul zur Entdeckung und Identifikation von Fehlern. Pflichten werden sukzessive von den höheren an die niedrigeren Ebenen delegiert. Je höher die Ebene sei, desto höher sei auch die Intelligenz der bearbeitenden Module um den Preis abnehmender Präzision: 'principle of increasing intelligence with decreasing precision' (Antsaklis & Passino 1993, S. 19).

Die funktionale Systemarchitektur nach Antsaklis & Passino (1993) hat den Charakter eines Pflichtenheftes für ein 'intelligentes Führungssystem'. Besonders auf den unteren Ebenen liegen Erfahrungen vor mit der Realisierung von Teilmodulen und Subsystemen. Insgesamt sehen die Autoren aber 'significant challenges well beyond current capabilities' (Antsaklis & Passino 1993, S. 3). Quantitative, systematische Techniken für die Entwicklung von 'intelligenten autonomen Steuerungen' existieren nach Einschätzung von Antsaklis & Passino (1993, S. 20) derzeit noch nicht. Dies läge zum einen daran, daß diese Systeme neu und unerforscht seien, zum anderen aber auch in hohem Maße hybrid, in dem Sinne, daß sie kontinuierliche und diskrete Zustandssysteme beinhalteten (Abschnitt 4.1.5). Die anstehenden Aufgaben machten eine hochgradig interdisziplinäre Forschung notwendig.

Die von Antsaklis & Passino (1993) formulierten Anforderungen an ein 'intelligentes Führungssystem' sind auch vom Führungssystem eines autonomen Landfahrzeugs auf Autobahnen zu erfüllen. Dabei beschränken sich die Autoren auf die theoretische Formulierung. Die Entwicklung technischer Lösungen bleibt den Realisierern überlassen.

Die Vorstellung von der Intelligenz an der Spitze der Entscheidungshierarchie und einfach strukturierten Agenten auf den unteren Ebenen, die auch bei Saridis (1985) und Albus (1991) zu finden ist, teile ich nicht. Die an der UniBwM entwickelten Systeme sehen intelligente Generalisten an der Spitze und intelligente Spezialisten auf den unteren Ebenen vor.

3.2.3 Anmerkungen zum Gebrauch des Begriffs 'Intelligenz'

Der Begriff 'Intelligenz' wird in der technischen Literatur, besonders in der angelsächsischen, bisweilen abweichend vom allgemeinen Sprachgebrauch verwendet. In der Brockhaus-Enzyklopädie wird Intelligenz wie folgt erläutert:

‘Intelligenz [lateinisch, zu intellegere ‘erkennen’, ‘verstehen’, eigentlich ‘zwischen etwas wählen’] die, -, *Pädagogik* und *Psychologie*: im allgemeinen Verständnis eine bestimmte Form der Begabung, die sich als Fähigkeit (oder eine Gruppe von verschiedenen Fähigkeiten) äußert, anschauliche sowie abstrakte Beziehungen zu erfassen, herzustellen und zu deuten und dadurch sich an neuartige Situationen anzupassen und sie gegebenenfalls durch problemlösendes Verhalten zu bewältigen... Trotzdem [auch nach den intensiven Bemühungen in den letzten 90 Jahren; MM] konnte bisher keine allgemein anerkannte Definition für Intelligenz formuliert werden. Die besonders verbreitete Definition von W. Stein versteht Intelligenz als allgemeine geistige Anpassungsfähigkeit an neue Aufgaben und Bedingungen des Lebens...’ (Brockhaus 1990)

Beinhaltet die Definition von W. Stein noch die ‘allgemeine geistige Anpassungsfähigkeit an neue Aufgaben und Bedingungen des Lebens’, so begnügt sich der Robotiker J. Albus damit, Intelligenz als die Fähigkeit eines Systems zu definieren, in einer unsicheren Umgebung geeignet zu handeln (Albus 1991).⁶

Aber auch das ‘technische Komitee für intelligente Steuerungen’ (‘technical committee on intelligent control’) kann sich in dem Bericht ‘defining intelligent control’ (Antsaklis 1994) nicht auf eine einheitliche Definition des Begriffs ‘intelligence’ einigen.⁷ Der Alternativvorschlag, statt von ‘Intelligenter Steuerung’ von ‘autonomer Steuerung’ zu sprechen, wirft spätestens dann Probleme auf, wenn man sich auf eine Definition des Wortes ‘autonom’ einigen möchte.

In dieser Arbeit schließe ich mich der Haltung von P. Werbos an⁸ und benutze den Begriff der Intelligenz nicht zur Charakterisierung von technischen Systemen, sondern spreche von ‘Imitation von menschlichem Verhalten’- eine Diktion, die auch Saridis, einer der Begründer der ‘Intelligenten Steuerungen’, verwendet.⁹ Dabei wird die Ent-

⁶‘Intelligence is defined as that which produces successful behavior’ (Albus 1991, S. 473). ‘... intelligence will be defined as the ability of a system to act appropriately in an uncertain environment, where appropriate action is that which increases the probability of success, and success is the achievement of behavioral subgoals that support the system’s ultimate goal’ (Albus 1991, S. 474).

⁷‘In this report we do not even attempt to give general definitions of intelligence... Intelligent controllers are envisioned emulating human faculties such as adaptation and learning, planning under large uncertainty, coping with large amounts of data, ... This is the justification for the use of the term ‘intelligent’ in intelligent control, since these mental faculties are considered to be important attributes of human intelligence... An alternative term is ‘autonomous (intelligent) control’ (Antsaklis 1994, S. 58). Die Kontroverse äußert sich auch darin, daß dem allgemeinen Teil, den alle Autoren mittragen und dem das obige Zitat entnommen ist, persönliche Stellungnahmen einzelner Autoren folgen, in dem sie ihre persönliche, oft abweichende Meinung festhalten (s.u. Fußnote zu P. Werbos).

⁸In einer persönlichen Stellungnahme zum Artikel (Antsaklis 1994, S. 66) des ‘technischen Komitees für intelligente Steuerungen’, dem er selber angehört, distanziert sich P. Werbos von der Begriffsbildung: ‘If we have lots of nice little incremental improvements to make in control, I really wish we could agree to call them ‘smart control’ or ‘brilliant control’, and leave the word ‘intelligent’ alone.’

⁹(Saridis 1985): ‘... imitating functions of human behavior.’

scheidung, ob das von der Maschine erzeugte Verhalten als ‘intelligent’ zu bezeichnen ist, bewußt dem Leser mit seiner persönlichen Vorstellung von ‘Intelligenz’ überlassen.

Abschließend sei ein Beispiel aus der jüngeren europäischen Forschungsgeschichte genannt, das den inflationären Gebrauch von Begriffen in der Technik illustriert: Das System, das unter dem Namen ‘autonomous intelligent cruise control’ im Rahmen des Projektes ‘Prometheus’ erforscht wurde, wird derzeit unter dem Namen ‘Distronic’ dem Kunden zum Kauf angeboten.

3.2.4 Echtzeitfähige Führungssysteme

Seit den siebziger Jahren wird am National Institute of Standards and Technology (NIST, früher: National Bureau of Standards, NBS) eine Referenzarchitektur (‘reference model architecture’, RMA) für echtzeitfähige Führungssysteme (‘real-time control systems’, RCS) entwickelt. Albus (1991, S. 28-30) gibt einen kurzen Überblick über die verschiedenen Versionen von RCS. Den Kern von RCS bildet der Basisknoten, der in seiner aktuellen Form die Elemente ‘Sensorverarbeitung’ (‘sensory processing’), ‘Weltmodell’ (‘world model’), ‘Bewertung’ (‘value judgement’) und ‘Verhaltensgenerierung’ (‘behavior generation’) enthält (Abbildung 3.3, Albus & Meystel 1997). Durch horizon-

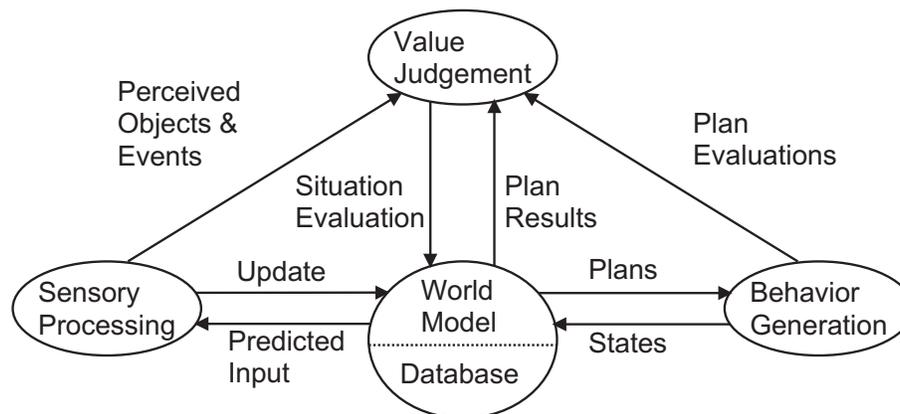


Abbildung 3.3: Ein Knoten in der RCS-Architektur (Ausschnitt) (Albus & Meystel 1997, S. 16)

tale und vertikale Verkettung der Basisknoten lassen sich komplexe Systemarchitekturen aufbauen, deren kanonische Form zu den wichtigsten Eigenschaften von RCS-RMA gehört.¹⁰ Die entstehende Hierarchie ist im Sinne von Mesarovic et al. (1970) eine organisatorische. Auf jeder Hierarchieebene sind zwei Beschreibungsebenen vorgesehen: die Zustands- und die symbolische Ebene.

Laut Dillmann & Huck (1991, S. 198) ist RCS eine weit verbreitete Architektur, die ‘als Grundlage für zahlreiche hierarchisch gegliederte Robotersystemarchitekturen’ dient.

¹⁰Persönliche Kommunikation mit J. Albus, 16.-18. September 1996, Universität der Bundeswehr.

Im Rahmen des Projekts ‘AutoNav’ (Abschnitt 1.2.2) wurde der Versuch unternommen, den 4D-Ansatz und RCS zu einer gemeinsamen Systemarchitektur zu vereinen und als Basisarchitektur für künftige autonome Systeme zu formulieren (Albus 1997). Beide Ansätze profitierten von der gemeinsamen Diskussion: Das ISF sah sich veranlaßt, die auf dem 4D-Ansatz basierende Systemarchitektur formaler darzustellen (Maurer & Dickmanns 1997a; Maurer & Dickmanns 1997b; Maurer 1998b; Dickmanns & Maurer 1999); in die RCS-Architektur wurden zentrale Ideen des 4D-Ansatzes aufgenommen. Es wurde jedoch auch deutlich, daß beide Systemarchitekturen aus fundamental unterschiedlichen Motivationen entstanden, die einer gemeinsamen Formulierung im Wege stehen.

Entsprechend seiner Aufgabe ist NIST in erster Linie an einer einheitlichen Beschreibung bestehender Systemarchitekturen interessiert. RCS gibt für die Elemente des generischen Knotens genaue Definitionen an. Wegen der kanonischen Verwendung des Knotens existiert damit für die gesamte Systemarchitektur ein eindeutiges Beschreibungsvokabular, das wegen der Verwendung der Begriffe auf mehreren Ebenen überwiegend abweichend von den fach- und umgangssprachlichen Bedeutungen benutzt wird. RCS definiert damit eine eigene Fachsprache zur Beschreibung von autonomen Systemen, mit der unterschiedliche Systeme verglichen werden können.¹¹ RCS ist ein deskriptiver Ansatz zur Beschreibung von Systemarchitekturen, der allerdings keine Anleitungen gibt, wie autonome Systeme aufzubauen sind. Bestätigt wird das von Mitgliedern von Albus Arbeitsgruppe, die RCS selbst bei eigenen Realisierungen nicht einsetzen.¹²

Im Gegensatz zu RCS entstanden Systemarchitekturen auf Basis des 4D-Ansatzes aus der praktischen Notwendigkeit zur Strukturierung komplexer Systeme. Die Architekturen wurden so entwickelt, daß die definierten Ziele unter den gegebenen technischen Randbedingungen erreicht wurden. Mit dem 4D-Ansatz steht ein konstruktiver Ansatz zum Aufbau von autonomen Systemen in dynamischer Umgebung zur Verfügung.

Beide Architekturen sind für die jeweiligen unterschiedlichen Zielsetzungen gut geeignet. Persönlich würde ich es vorziehen, beide Ansätze parallel je nach Zielsetzung einzusetzen, statt zu versuchen, sie zu vereinen. Der 4D-Ansatz würde durch die kanonische Form von RCS mit Überbau belastet, der den Blick auf die zentralen Aussagen verstellen könnte. RCS würde durch die Integration des 4D-Ansatzes an Abstraktion verlieren; die kanonische Form und das einheitliche Vokabular auf allen Ebenen wären in Gefahr.

3.2.5 Verhaltensbasierte Architekturen

Als bekanntester Vertreter der verhaltensbasierten Architekturen wird die ‘Subsumptionsarchitektur’ (‘subsumption architecture’) nach Brooks (1986) diskutiert. Der Ansatz

¹¹‘...this provides a nice vocabulary for comparing systems...’ (Thorpe 1992).

¹²Vortrag von S. Legowik und K. Murphy an der Universität der Bundeswehr, September 1996.

wurde als konstruktiver Gegenvorschlag zu traditionellen Führungsarchitekturen entwickelt, in denen in jedem Zyklus die Aufgaben Wahrnehmung, Modellierung, Planung, Ausführung von Aufgaben und Motorregelung abgearbeitet werden müssen.¹³

Im Mittelpunkt des Ansatzes steht die Verhaltensweise, die für eine bestimmte Aufgabe entworfen wird. Durch eine hierarchische Überlagerung von Verhaltensweisen kann auch komplexeres Verhalten generiert werden. Verhaltensweisen in einer höheren Schicht können niedrigere Schichten beeinflussen. Die Koordination der Verhaltensweisen innerhalb der Hierarchie wird dezentral mit Hilfe von erweiterten Zustandsautomaten ('augmented finite state machine', AFSM) vorgenommen, mit denen jede Verhaltensweise gesteuert wird (Abbildung 3.4). Eingangssignale können von oberen Ebenen ersetzt ('suppress'), Ausgangssignale ganz verhindert werden ('inhibit'). Verhaltensweisen werden bei Brooks überwiegend regelbasiert realisiert.

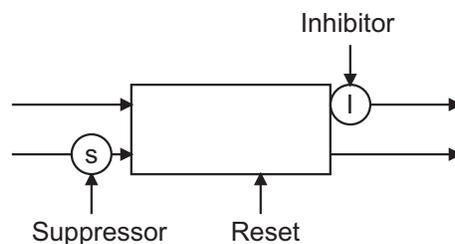


Abbildung 3.4: Erweiterter Zustandsautomat für eine Verhaltensweise in der Subsumptionsarchitektur (Abbildung vereinfacht nach Brooks 1986)

Unter Kritikern gilt das Koordinationsschema als wenig effizient.¹⁴ In sicherheitskritischen Anwendungen fehlt in der Architektur eine zentrale Entscheidungsinstanz, die Brooks für nicht notwendig hält.¹⁵

Thorpe (1992), der den Ansatz gründlich untersucht, lehnt die Subsumptionsarchitektur ab. Der Ansatz sei nur auf kleine, preiswerte Roboter anwendbar, die für viele Anwendungen ungeeignet seien. Subsumption sei die falsche Art der Zerlegung: Unterlagerte Ebenen, auf denen zeit- und sicherheitskritische Aufgaben erfüllt werden, müßten die Möglichkeit haben, die oberen Ebenen zu unterdrücken. Interne Modelle der Welt, die von Brooks abgelehnt werden, seien notwendig, um komplexere Aufgaben zu lösen. In einem Gedankenexperiment zeigt Sukthankar (1997, S. 108 - 110), daß die Subsumptionsarchitektur ungeeignet ist, um eine Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung im Straßenverkehr zu entwerfen, da sich die Verhaltensweisen in vielen Situationen gegenseitig behindern würden. Tatsächlich konnten mit der Subsumptionsarchitektur bisher nur kleine Spielroboter realisiert werden, die einfache Aufgaben lösen (Arkin 1998, S. 140).

¹³Häufig wird als typische traditionelle Architektur RCS genannt (Abschnitt 3.2.4, Albus 1991).

¹⁴'The priority-based coordination mechanism, the ad hoc flavor of behavior generation, and the architecture's hard-wired aspects limit the ways the system can be adapted during execution.' (Arkin 1998, S. 140)

¹⁵'no need for a central control module of a mobile robot' (Brooks 1986, S. 23).

3.3 Systemarchitektur für sehende autonome Fahrzeuge am ISF

Systemarchitekturen am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik sind aus der praktischen Notwendigkeit entstanden, komplexe Systeme zu strukturieren. Die in dieser Arbeit vorgestellte Architektur wurde entwickelt, um die Autonomie des Versuchsfahrzeugs VaMP (Abschnitt 7.1.1) auf der Autobahn zu erhöhen. Nach erfolgreichen Demonstrationen mit VaMP wurde der Ansatz auch auf das Versuchsfahrzeug VaMoRs übertragen (Abschnitt 7.1), das Überwachungsmissionen auf Straßen niedriger Ordnung vollautonom durchführen soll.¹⁶

In Abbildung 3.5 ist die funktionale Systemarchitektur für sehende autonome Fahrzeuge dargestellt. Die verschiedenen Aufgaben im automatischen Fahrzeug lassen sich nach Aufgaben der Wahrnehmung, der Entscheidung und der Aktion untergliedern. Die jeweiligen Module sind in Abbildung 3.5 untereinander gezeichnet. Wie auch bei Rasmussens Illustration menschlicher Informationsverarbeitung (Abschnitt 3.1, Rasmussen 1983) erscheinen unterschiedliche Repräsentationsformen und unterschiedliche Methoden abhängig vom Grad der Abstraktion und abhängig vom Zeithorizont sinnvoll.

In Erweiterung zu Rasmussens Schema wird die fertigkeitbasierte Ebene im vorgestellten Architekturansatz unterteilt in eine *hardware-spezifische Ebene* und eine *4D-Ebene* (Maurer 1998b; Dickmanns & Maurer 1999). Damit wird die unterschiedliche Qualität der Informationsverarbeitung auf den beiden Ebenen hervorgehoben. Auf der regelbasierten und der wissensbasierten Ebene soll jeweils Verhalten generiert werden, das mit dem des Menschen auf der gleichnamigen Ebene qualitativ vergleichbar ist. Mit Rücksicht auf die zugrundeliegende Hardware ('wetware') werden für das technische informationsverarbeitende System andere Repräsentationsformen gewählt (Kapitel 4) als in biologischen Systemen. Die Beschreibungsebenen lassen sich hierarchisch (Abschnitt 3.2.1, Mesarovic et al. 1970) anordnen. Damit entsteht im System eine Hierarchie der Beschreibungsebenen, die nicht notwendigerweise einer organisatorischen entspricht (Mesarovic et al. 1970, S. 37ff).

3.3.1 Hardware-spezifische Ebene

Ein wichtiges Merkmal der Systemarchitektur ist es, daß die hardware-spezifischen Module auf der gleichnamigen Ebene zusammengefaßt werden. Oberhalb der hardware-spezifischen Ebene erfolgt der Systementwurf strukturell hardware-unabhängig. Die hardware-spezifische Ebene umfaßt geeignete Aktuatoren und Sensoren für die gestellten Aufgaben, die Signalvorverarbeitung der Sensordaten und interne Stabilisierungssysteme der einzelnen Aktuatoren.

¹⁶Verschiedene Iterationen der Systemarchitektur wurden bereits veröffentlicht: Maurer & Dickmanns (1997a), Maurer & Dickmanns (1997b), Dickmanns & Maurer (1999), Maurer (1998b), Maurer (1999), oder sie liegen als interner Bericht vor (Maurer 1998a).

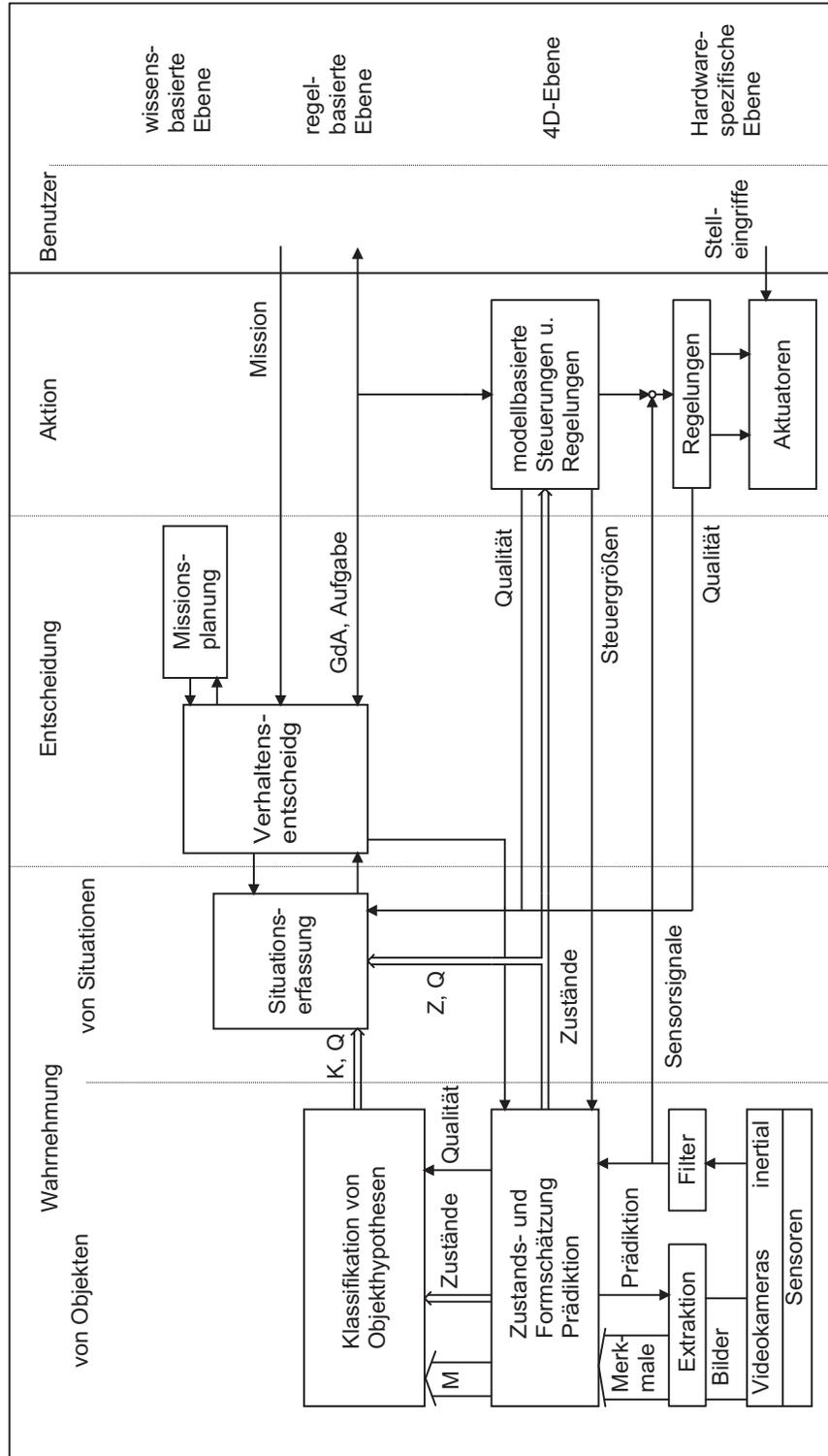


Abbildung 3.5: Funktionale Systemarchitektur für sehende autonome Fahrzeuge. M: Merkmale; GdA: Grad der Automatisierung; Q: Qualität; Z: Zustände; K: Klasse, der ein physikalisches Objekt zugeordnet wurde

Automatische Fahrzeuge sollten die Umgebung wie der Mensch über den optischen Kanal erfassen können (vgl. Abschnitt 1.1.1). Dazu wird das Fahrzeug mit mehreren Videokameras für den Vorausschaubereich und je nach Aufgabe auch für die Rückschau ausgerüstet. Durch den Einsatz von verschiedenen Brennweiten (multifokal) können sowohl Objekte im Nahbereich als auch im Fernbereich erkannt werden.

Zur Grundausstattung autonomer Systeme, die sich dynamisch in ihrer Umgebung bewegen, gehören Beschleunigungsaufnehmer und Winkelratengeber. Je nach Fahrzeugausrüstung können zusätzliche Sensoren wie die ABS-Radsensoren, Drucksensoren im Bremskraftverstärker oder Lenkwinkelgeber mit ausgewertet werden.

Neben den klassischen Aktuatoren zur Fortbewegung - Bremse, Drosselklappe und Lenkung - hat das autonome Fahrzeug Zugriff auf die Elektromotoren für die aktive Blickrichtungssteuerung. Die Kameras sind dazu auf einer Plattform zur aktiven Blickrichtungssteuerung montiert, die es erlaubt, die Kameras ± 60 Grad um die Gierachse zu schwenken (Schiehlen 1995). Je nach Aufgabe kann das Fahrzeug zusätzlich mit Manipulatoren und Spezialwerkzeugen ausgestattet werden (z.B. Volpe et al. 1996).

Die Sensordaten, die zunächst gefiltert werden, dienen Wahrnehmungsprozessen auf der nächsthöheren Ebene als Grundlage. Ausgewählte Signale werden sofort in unterlagerte Regler für die Aktuatoren zurückgekoppelt, um schnelle Regelkreise zu realisieren. Für automotiv Anwendungen werden Zykluszeiten zwischen 1 ms und 10 ms gewählt. Einige Systeme wie das Antiblockiersystem oder die Antriebsschlupfregelung (Bosch 1995) gehören zunehmend zur Serienausstattung von Kraftfahrzeugen.

Im semi-autonomen Fahrzeug hat der Fahrer die Möglichkeit, die Aktuatoren direkt zu beeinflussen. Durch die Einführung von elektronischen Aktuatoren entfällt jedoch zunehmend der direkte mechanische Zugriff auf die Stellglieder.

Die Methoden auf der hardware-spezifischen Ebene sind aus der Signalverarbeitung und der Regelungstechnik bekannt. Die Reglerauslegung auf der hardware-spezifischen Ebene wird in Abschnitt 5.1.2 und am Beispiel des Druckregelkreises im Versuchsfahrzeug VaMP in Abschnitt 7.1.4 näher erläutert. Die Hardware des Versuchsfahrzeugs VaMP wird in Abschnitt 7.1.1 beschrieben.

3.3.2 4D-Ebene

Als zweite Ebene wird die 4D-Ebene eingeführt, die nach dem 4D-Ansatz nach Dickmanns benannt wurde (Abschnitt 1.2, Dickmanns 1997b). Durch die 4D-Schätzprozesse werden aus den Sensorsignalen und dem Bilddatenstrom wenige Zustandsvariable gewonnen, die als Grundlage für Situationserfassung, Verhaltensentscheidung und Regelung dienen und damit zur erfolgreichen Durchführung der Mission verwendet werden.

Wie beim fertigkeitbasierten Verhalten des Menschen in der Modellierung nach Rasmussen (1983) nimmt auch im 4D-Ansatz das interne Modell eine zentrale Stellung ein. Die Grundstruktur der 4D-Modelle ist durch die Theorie linearer Systeme geprägt:

Physikalische Objekte werden mit Methoden der Zustandsraumdarstellung, mit Zustandsgrößen, Parametern und Steuergrößen, explizit repräsentiert. Explizite Modelle über das Bewegungsverhalten von Objekten sind in Form von System-, Eingangs- oder Transitionsmatrizen gegeben, die bei der Zustandsschätzung und bei der Berechnung der Reglerkoeffizienten Verwendung finden (Abschnitt 4.1.1, Dickmanns 1997b).

Auf der 4D-Ebene werden Schätzprozesse eingesetzt, die den Eigenzustand relativ zu allen aufgabenrelevanten Objekten und, wenn notwendig, deren Formparameter schätzen. Dabei werden dynamische und geometrische Modelle eingesetzt (Schick 1992).

Bei der Initialisierung von Objekthypothesen wird bereits das Wissen über die Domäne genutzt, in der sich das automatische Fahrzeug gerade befindet. Die Domäne enthält die Information, daß gewisse Objekte im Missionselement sicher existieren, andere auftreten können. Die restlichen im System repräsentierten Klassen von Objekten werden in der Domäne nicht erwartet. Für die möglichen Objekte sind generische Formmodelle mit den zulässigen Parameterbereichen und geeignete Bildoperatoren vorhanden.

Innerhalb einer Domäne suchen die spezialisierten Wahrnehmungsmodule im Videobild nach Merkmalsgruppierungen, aus denen sie Objekthypothesen generieren können. Erfüllt ein Merkmalscluster in der Bildebene die Formhypothese hinreichend gut (örtliches Vertrauensmaß), so wird eine 4D-Objekthypothese auf der 4D-Ebene aufgesetzt. Wenn das Objekt sicher genug verfolgt werden konnte (zeitliches Vertrauensmaß), so werden die Objekthypothese und das zugehörige (räumlich-zeitliche) Vertrauensmaß an die *Situationserfassung* (*Situation Assessment*, SitA, Abschnitt 6.2) geschickt.

Die Module auf der 4D-Ebene, die auf der Autobahn und auf Straßen niederer Ordnung eingesetzt werden, sind in Abbildung 3.6 skizziert. Die Eigenlage des Fahrzeugs wird relativ zu allen relevanten Objekten geschätzt: relativ zur Straße mit dem Modul *Straßenerkennung* (*Road Detection and Tracking*, RDT, Behringer 1996; Lützel & Dickmanns 1998; Hofmann 1999), zu anderen Fahrzeugen mit dem Modul *Hinderisenerkennung* (*Obstacle Detection and Tracking*, ODT, Thomanek 1996), dem Modul *Landmarkenerkennung* (*Landmark Detection and Tracking*, LDT, Gregor 1998; Pellkofer 1999) und relativ zur Horizontalebene (Normale zum Schwerevektor) mit dem Modul *Inertial-basierte Zustandsschätzung* (*Inertially based State Estimation*, IbSE, Werner 1996; Siedersberger 1999a). Außerdem wird die Form der Straße geschätzt, die bei deutschen Straßen höherer Ordnung durch eine horizontale und eine vertikale Klothoide beschrieben werden kann (Dickmanns & Mysliwetz 1992). Die Gestalt von Fahrzeugen wird derzeit durch die Fahrzeugbreite repräsentiert und ebenfalls mitgeschätzt.

Basierend auf den Zustandsgrößen werden in den Modulen *Blickrichtungssteuerung* (*Gaze Control*, GC, Schiehlen 1995; Rieder 1998) und *Fahrzeugführung* (*Vehicle Control*, VC, Kapitel 5) Steueraktivitäten ausgeführt, die entweder als 'Vorsteuerungen' realisiert werden, bei denen ein zeitlicher Verlauf von Steuerungen modellbasiert im voraus berechnet wird, oder als Rückkopplungsgesetze, bei denen die aktuelle Steuergröße unmittelbar von der Regeldifferenz abhängt (Abschnitt 5.1.2).

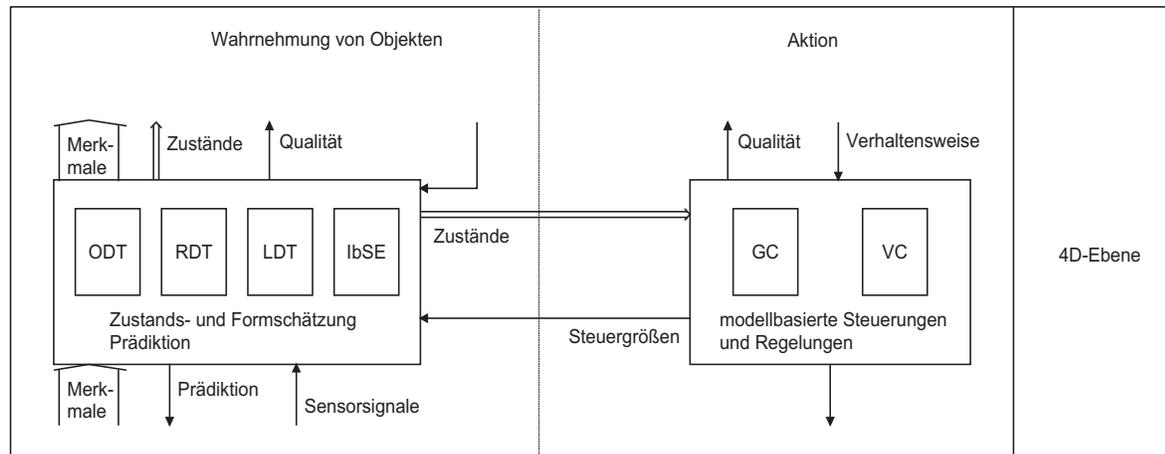


Abbildung 3.6: Module auf der 4D-Ebene.

ODT: Obstacle Detection and Tracking, Hinderniserkennung, RDT: Road Detection and Tracking, Straßenerkennung, LDT: Landmark Detection and Tracking, Landmarkenerkennung, IbSE: Inertially based State Estimation, Inertialbasierte Zustandsschätzung, GC: Gaze Control, Blickrichtungssteuerung, VC: Vehicle Control, Fahrzeugführung

Die Schätzprozesse verarbeiten die Signale mit einer Frequenz von 25Hz, genau der Frequenz, mit der nach der PAL-Norm volle Videobilder geliefert werden. Auch die Steueraktivitäten auf der 4D-Ebene werden mit einer Frequenz von 25Hz ausgeführt; damit hat sich auf der 4D-Ebene eine einheitliche Zykluszeit von 40ms etabliert.

Für einfache Folgeregelungen wie das automatische Spurfolgen oder das automatische Konvoifahren sind keine höheren Ebenen als die 4D-Ebene notwendig. Schon zur Einleitung von dynamischen Übergängen zwischen Regulationsphasen ist jedoch ein Situationsverständnis notwendig, das die Einführung eines zusätzlichen Vokabulars sinnvoll erscheinen läßt.

3.3.3 Regelbasierte Ebene

Psychologische Untersuchungen haben ergeben, daß der Mensch in vertrauten Situationen auf abgespeicherte Regeln zurückgreift, um die anstehenden Aufgaben zu lösen. Das technische System soll Verhalten generieren, das dem regelbasierten des Menschen entspricht.¹⁷ Auf der regelbasierten Ebene stehen für die Wahrnehmung, die Entscheidungsfindung und die Ausführung Mengen von Regeln zur Verfügung. Die Regeln sind kontextabhängig nach Domänen und Missionselementen (Abschnitt 3.3.4) gruppiert.

¹⁷Der Begriff 'regelbasiert' wird im Sinne von Rasmussen (1983) verwendet. Damit ist nicht impliziert, daß dazu ein Produktionssystem eingesetzt wird. In der Informatik versteht man unter einem regelbasierten System häufig ein Produktionssystem (Puppe 1988; Buchanan & Shortliffe 1984).

Die *Situationserfassung* analysiert die Situation hinsichtlich der Umstände, die für die Ausführung der aktuellen Aufgabe in dem jeweiligen Moment relevant sind (Abschnitt 6.2). Damit fügt sie der physikalischen Situationsbeschreibung durch systemdynamische Zustände auf der 4D-Ebene abstrahierte Attribute auf der regelbasierten Ebene hinzu. Die physikalische Situationsbeschreibung auf der 4D-Ebene enthält den Abstand und die Bewegung des Eigenfahrzeugs relativ zu anderen Objekten, Qualitätsmaße zur Bewertung von Hypothesen, Schwellwerte zur Klassifikation von Objekten und Hypothesen, die aktuellen Stellgrößen, internen Zustände und Parameter des Eigenfahrzeugs.

Auf der regelbasierten Ebene wird die Beschreibung der Situation erweitert um die explizite Repräsentation des eigenen Fahrzeugs mit seinen aktuellen Zielen, seiner Hardware und der Güte seiner aktuellen Fähigkeiten. Außerdem enthält die Situation die Aufgaben, die das System gerade ausführt, das Hintergrundwissen über die Domäne und eine bewertende Beschreibung anderer Objekte hinsichtlich der eigenen Ziele (Abschnitt 6.2).

Im semiautonomen Fahrzeug wird die Situation zusätzlich auf dem Hintergrund des Fahrer- oder Nutzerprofils bewertet. Im Fahrerprofil wird abgelegt, wie vertraut der aktuelle Fahrer mit dem System zur Fahrzeugautomatisierung ist und wie hoch seine Fähigkeiten und seine Toleranz sind, die Fehler des Systems auszugleichen, die mit den in der Situation repräsentierten Wahrscheinlichkeiten auftreten können.

In der *Verhaltensentscheidung* werden die Verhaltensmodi ausgewählt, die aufgrund ihrer Repräsentation auf der regelbasierten Ebene geeignet erscheinen, die Aufgaben des automatischen Fahrzeugs innerhalb der Mission erfolgreich zu erfüllen (Abschnitt 6.2.4). Diese Aufgaben werden auf der 4D-Ebene von Regelungen oder Steuerungen ausgeführt (Abschnitt 5.1.2).

Das automatische Fahrzeug überprüft ständig, ob sich - etwa aufgrund geänderter Umweltbedingungen - die Fähigkeiten des Systems verändern. Verschlechtern sich etwa die Erkennungsfähigkeiten (z.B. wegen schlechterer Sichtverhältnisse), so informiert das Fahrzeugführungssystem den Fahrer, daß er automatisierte Verhaltensmodi wieder selbst ausführen muß. Der menschliche Fahrer muß frühzeitig und eindeutig gewarnt werden, wenn Verhaltensmodi nicht mehr automatisiert werden können. Die Entwicklung einer geeigneten Mensch-Maschine Schnittstelle, die die flexible Automatisierung von Fahrfunktionen erlaubt, ist besonders dann eine anspruchsvolle Forschungsaufgabe, wenn sie auch für Benutzer geeignet sein soll, die nicht speziell trainiert worden sind.

3.3.4 Wissensbasierte Ebene

Wissensbasiertes Verhalten (nach der Definition von Rasmussen) ist beim Menschen notwendig, wenn er für eine identifizierte Situation keine Handlungsregeln abrufbar bereithält. Der Mensch leitet dann aus Metaregeln durch Assoziationen neue Handlungsregeln ab. Sowohl Metaregeln als auch abgeleitete Regeln sind durch Vokabular auf der regelbasierten Ebene darstellbar, werden allerdings schnell wieder vergessen,

wenn die Situation sich nicht wiederholt und sich nicht aufgrund sehr beeindruckender Erlebnisse im Zusammenhang mit dieser Situation besonders eingepreßt hat. Qualitativ andere (= wissensbasierte) Methoden werden bei der Ableitung der Regeln eingesetzt.

Nach Onken¹⁸ sind derzeit keine algorithmischen Analogien in der Technik zu den menschlichen wissensbasierten Methoden zur Ableitung der Handlungsregeln bekannt. Es gibt zwar hierzu Analyseuntersuchungen mit Experimenten zum Verhalten des Menschen. Onken hält wissensbasierte Methoden für technische Systeme auch nicht für notwendig:

Für Menschen ist das Erlernen und Trainieren von Regeln mühsam; die erlernten Regeln müssen ständig trainiert werden, um nicht vergessen zu werden. In technischen Systemen gibt es dagegen keine relevanten Beschränkungen für die Menge von Regeln. Sie können einfach implementiert werden und stehen dann ständig zur Verfügung. Als langfristiges Forschungsziel werden regelbasierte Inferenzmechanismen gesucht, die fehlende Regeln aus Metaregeln ableiten können.

Ein zentrales Konzept des wissensbasierten Verhaltens ist der Plan, der aufgrund von Zielen aufgestellt wird, um erfolgreich zu agieren. Ein Plan ist erforderlich, um Navigationsaufgaben durchzuführen. Verhalten in unbekanntem Situationen erfordert ebenfalls die Planung von Bewegungsabläufen. Um planen zu können, muß man das eigene System und die eigenen Fähigkeiten kennen: die interne Repräsentation der eigenen Fähigkeiten ist damit Voraussetzung jeder Planungsaktivität.

Der Plan zur Durchführung einer Mission wird in der *Missionsplanung* nach vorgegebenen Gütekriterien erstellt. *Mission Monitoring*, ein Modul von *Situation Assessment* (Abschnitt 6.2) ordnet dem Fahrzeug eine Position in der Karte zu. Weiß das autonome Fahrzeug zu Beginn der Missionsplanung nicht, wo es sich befindet, so muß es zunächst seine Eigenposition feststellen. Mittels einer Karte und mittels GPS (Global Positioning System, globales Positionierungssystem) kann die Relativposition bezüglich einer statischen Umgebung mit begrenzter Genauigkeit festgestellt werden (Hock 1994; Müller 1996; Gregor 1998). Eine genauere Zuordnung ist mit Hilfe von Landmarken möglich, die in der Karte verzeichnet sind und vom System in der realen Welt erkannt werden. Können Pläne nicht ausgeführt werden, so wird die *Missionsplanung* erneut beauftragt, geeignete Alternativen zu erstellen.

Untersuchungen der Verkehrspsychologie zeigen, daß menschliche Fahrer in für sie unbekanntem Situationen oft zu spät, gar nicht oder falsch reagieren. An diesem Punkt setzen Fahrertrainings an, die Gefahrensituationen üben, bis für diese Situationen regelbasiertes Verhalten zur Verfügung steht. Bei der Entwicklung eines technischen autonomen Systems wird man daher versuchen, möglichst alle Situationen vorausszusehen und entsprechende Handlungsstrategien auf der regelbasierten Ebene zur Verfügung zu stellen. Dennoch sollte ein autonomes System langfristig in der Lage sein, in Situationen, in denen keine geeigneten Handlungsregeln vorliegen, optimal im Sinne vorgegebener Gütefunktionen zu agieren und damit wissensbasiertes Verhalten zu generieren.

¹⁸Persönliche Kommunikation mit R. Onken, UniBwM, November 1997.

Kapitel 4

Modelle zur Generierung von Verhalten

Geeignete Modelle sind neben der funktionalen Systemarchitektur entscheidend für die Strukturierung komplexer Systeme. Für die Automatisierung von Fahrfunktionen im Kraftfahrzeug sind wie auch bei anderen komplexen Fragestellungen verschiedene Arten von Modellen geeignet:

‘No single model exists for all pattern recognition problems and no single technique is applicable to all problems. Rather what we have in pattern recognition is a bag of tools and a bag of problems.’¹

Im gleichen Sinne antwortet Minsky auf die Frage, welche Art von Repräsentation die beste sei: ‘To solve really hard problems we’ll have to use several different representations.’²

In den Modellen ist das ‘Wissen’ des autonomen Fahrzeugs über die Welt repräsentiert.³ Dabei ist nicht entscheidend, ob Wissen ‘wahr’ ist, sondern ob die Modellvorstellungen in der realen Welt erfolgreich eingesetzt werden können.⁴ Die Strukturierung der Modelle in dieser Arbeit wird nach drei verschiedenen Konzepten beschrieben: der Hierarchie der Beschreibungsebenen (Abschnitt 4.1), der objektorientierten Wissensrepräsentation (Abschnitt 4.2) und der Repräsentation physikalischer Objekte (Abschnitt 4.3).

¹Kanal (1972) *Interactive pattern analysis and classification systems - A survey and commentary*. Proc. IEEE 60 (10), Seite 1200 - 1215 zitiert nach Kanal (1993, S. 245).

²Minsky (1991) *Logical versus analogical or symbolic versus connectionist or neat versus scruffy*, AI Magazine 12 (2), Seite 34 - 51 zitiert nach Kanal (1993, S. 246).

³‘[mittelhochdeutsch: wizzen, eigtl. ‘gesehen haben’], der Inbegriff von ... Kenntnis; dabei auch das Innwerden einer spezif. Gewißheit ...’ (Brockhaus 1994).

⁴Gegen Reimer (1991, S. 6), der zwischen Wissen und Überzeugungen unterscheidet: ‘Als das Wissen eines Wissensträgers definieren wir die Menge aller von ihm als wahr angenommenen Aussagen über die repräsentierte Welt, die tatsächlich wahr sind... Die Überzeugungen eines Wissensträgers sind alle Aussagen, von denen er glaubt, sie seien wahr.’

Der Begriff des ‘Objekts’ hat in verschiedenen im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffenen Ansätzen zwei unterschiedliche Bedeutungen. Dickmanns verwendet den Begriff ‘Objekt’ bei der Formulierung des 4D-Ansatzes synonym mit ‘physikalischem Objekt’. Auch ‘objektorientiert’ wird in diesem Sinne als Orientierung an physikalischen Objekten verstanden (z.B. Dickmanns et al. 1994). Bei physikalischen Objekten wird zwischen Subjekten und Objekten unterschieden, wobei Subjekte sich dadurch auszeichnen, daß sie ihre Steuergößen entsprechend ihren Zielen selbst vorgeben können (Dickmanns 1989).

Auf dem Gebiet der Programmentwicklung hat sich für ‘Objekt’ eine allgemeinere Definition herausgebildet:

‘An entity with a well-defined boundary and identity that encapsulates state and behavior. State is represented by attributes and relationships, behavior is represented by operations, methods, and state machines. An object is an instance of a class.’ (UML 1999, S. B-12)⁵

In dieser Arbeit wird der Begriff ‘Objekt’ abhängig vom Kontext im Sinne beider Bedeutungen verwandt und wenn nötig genauer präzisiert. Nach einem Überblick über die Hierarchie der Beschreibungsebenen folgt eine kurze Einführung in Konzepte der objektorientierten Programmierung, soweit sie in dieser Arbeit eingesetzt wurden. Ausführlich diskutiert wird die Selbstrepräsentation des autonomen Fahrzeugs, einer wichtigen Voraussetzung für situationsgerechtes Handeln, die in technischen Systemen meist nur schwach ausgebaut ist.

4.1 Hierarchie der Beschreibungsebenen

Die vorgestellte Systemarchitektur weist eine Hierarchie von Beschreibungsebenen auf, die sich dadurch auszeichnen, daß jeweils unterschiedliche Methoden zur Repräsentation und Verarbeitung von Wissen eingesetzt werden (Abschnitte 3.2.1 und 3.3). Besonders deutlich unterscheiden sich in dieser Hinsicht die beiden unteren regelungstechnisch geprägten Ebenen von den oberen, auf denen Methoden aus der Informatik eingesetzt werden.

4.1.1 Dynamische Modelle auf der 4D-Ebene

Von autonomen Straßenfahrzeugen werden schnelle Reaktionen in einer dynamischen Welt erwartet. Dazu benötigen sie effiziente Methoden zur Repräsentation dynamischer Systeme. Die Regelungstechnik bietet entsprechende Verfahren, in deren Mittelpunkt Modelle dynamischer Systeme stehen.

⁵Die Bedeutung von ‘Zustand’ (‘state’) und ‘Verhalten’ (‘behavior’) ist in dieser Definition wesentlich allgemeiner als in der Regelungstechnik, der Robotik und in dieser Arbeit.

Ein dynamisches System läßt sich in der nichtlinearen Form

$$\dot{x}(t) = f\{x(t), u(t), z(t), p_p\} \quad (4.1)$$

angeben mit den Zustandsgrößen $x(t)$, den Steuergrößen $u(t)$, den Störgrößen $z(t)$ und den Parametern p_p . Die Zustandsgrößen können im allgemeinen nicht direkt gemessen werden, sondern nur ihre Auswirkung auf die Meß- oder Ausgangsgrößen $y(t)$:

$$y(t) = g\{x(t), p_m\}. \quad (4.2)$$

Für viele Anwendungen lassen sich die Modelle in einem oder mehreren Arbeitspunkten x_N lokal linearisieren und in der allgemeinen Zustandsraumdarstellung angeben:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x \in \mathcal{R}^n, \quad (4.3)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (4.4)$$

wobei x, y hier lokale Variable um x_N, y_N sind. Durch Diskretisierung erhält man das diskrete, lineare System

$$x_{k+1} = \Phi \cdot x_k + H \cdot u_k, \quad (4.5)$$

$$y_k = C \cdot x_k. \quad (4.6)$$

Das diskrete Modell ist immer dann erforderlich, wenn der Einfluß der zeitlichen Abtastung auf das System berücksichtigt werden soll. Vorteilhaft sind diskrete Modelle auch bei linearen Systemen mit Totzeit, die im Diskreten als einfach erweiterte lineare Systeme formuliert werden können (Abschnitt 5.3.1).

Läßt sich ein physikalisches System als kontinuierliches oder diskretes, lineares System darstellen, so existieren eine Vielzahl von Methoden zur Regelung, Beobachtung oder Schätzung von Zustandsgrößen.⁶ Der 4D-Ansatz zum maschinellen Sehen integriert die perspektivischen Abbildungen in die Schätzverfahren und erlaubt damit deren Einsatz im dynamischen, maschinellen Sehen (Abschnitt 1.2, Dickmanns 1997b). Die Folgen möglicher Handlungen können auf der 4D-Ebene mit Hilfe der vorhandenen Modelle voraussimuliert werden.

Zur Modellbildung stehen Methoden und Werkzeuge zur Systemidentifikation zur Verfügung, mit denen sich in vielen Fällen mit vertretbarem Aufwand ein für die Anwendung hinreichend genaues, lineares, zeitinvariantes Modell erstellen läßt.⁷ Für die Dynamik des Kraftfahrzeugs existieren bereits eine Vielzahl von Modellen unterschiedlicher Auflösung.⁸ In dieser Arbeit werden lineare Modelle für die Quer- und Längsdynamik eingesetzt (Abschnitt 5.3.1 und 5.4).

⁶Aus der Vielzahl der Veröffentlichungen sei hier eine persönliche Auswahl genannt: Kalman (1960), Luenberger (1971), Maybeck (1979), Kailath (1980), Ackermann (1988), Åstrom & Wittenmark (1990), Unbehauen (1993), Föllinger (1994).

⁷Wieder sei eine sehr persönliche Literaturliste angegeben: Ljung (1987), Isermann (1988a), Isermann (1988b).

⁸Übersichten finden sich in Mitschke (1990), Zomotor (1991), Popp & Schiehlen (1993), Kortüm & Lugner (1994), Rill (1994), Mitschke (1995), Mitschke (1997), Ammon (1997).

4.1.2 Implizites Modellwissen auf der hardware-spezifischen Ebene

Für viele physikalische Systeme lassen sich lineare Modelle nur mit viel Aufwand oder - bei starken Nichtlinearitäten - überhaupt nicht erstellen. In diesen Fällen wird die Strecke häufig durch schnelle unterlagerte Regelkreise auf der hardware-spezifischen Ebene linearisiert. Vielfach genügen dazu Standard-PID-Regler, einfache nichtlineare Regler oder Kombinationen daraus.⁹ Wegen der Unterschiedlichkeit der auftretenden Phänomene lassen sich allgemeingültige Aussagen über die Wissensrepräsentation auf der hardware-spezifischen Ebene nur schwer angeben. Bei den Ansätzen auf dieser Ebene herrscht die Tendenz vor, die Regelstrecke nicht explizit zu modellieren. Auch bei dem in dieser Arbeit diskutierten Beispiel eines Regelkreises auf der hardware-spezifischen Ebene, dem in Abschnitt 7.1.4 vorgestellten Druckregler, ist Wissen über die Strecke nur implizit enthalten. Explizit repräsentiert werden dagegen die Stell- und Meßbereiche von Aktuatoren und Sensoren, Skalierungsfaktoren und das erwartete Sensorrauschen.

4.1.3 Repräsentationsformen auf der regelbasierten Ebene

Im Straßenverkehr werden die Verkehrsteilnehmer mit einer Vielzahl von Situationen konfrontiert, in denen sie sich regelkonform verhalten müssen. Die Strukturierung der Situationen und die Organisation der benötigten Verhaltensweisen erfolgt auf der regelbasierten Ebene. Dazu werden geeignete Repräsentationsformen zur Strukturierung komplexer Systeme benötigt.

Während die Generierung von Fähigkeiten im 4D-Ansatz unter regelungstechnischen Aspekten auf der 4D-Ebene betrachtet wird, existiert parallel dazu eine integrale Repräsentation von Fähigkeiten auf der regelbasierten Ebene (Dickmanns 1995a; Maurer & Dickmanns 1997a). Zapp (1988), Brüdigam (1994) und Müller (1996) beschreiben Verhaltensmodi, die für die Quer- und Längsführung im Versuchsfahrzeug VaMoRs (Abschnitt 7.1) realisiert wurden. Im Flurförderfahrzeug 'Athene' repräsentiert Hock (1994) Fähigkeiten für Wahrnehmung und Fortbewegung explizit.

Mit der Mission wird für ein Luftkissenfahrzeug (Wünsche 1988), ein Flurförderfahrzeug (Hock 1994), in der Simulation für Helikopter (Werner 1997) und für Straßenfahrzeuge (Gregor 1998) eine weitere integrale Repräsentation eingeführt.

Die Verknüpfung von Verhaltensweisen erfolgt im Straßenfahrzeug zunächst durch einen Automaten zur Auswahl von Verhaltensmodi auf der Autobahn (Abschnitt 6.1.3, Kujawski 1995) oder zur Ablaufsteuerung beim Abbiegen (Müller 1996). Ruckdeschel (1991) und Hock (1994) setzen im Flurförderfahrzeug erfolgreich Petrinetze zur Fahrzeugführung ein.

⁹Geeignete Ansätze finden sich in Einführungen in die Regelungstechnik (z.B. Schmidt 1989; Föllinger 1994; Unbehauen 1994).

Solange nur Situationen von geringer Komplexität betrachtet werden, sind einfache mathematische Modelle wie die der Automaten auf der regelbasierten Ebene ausreichend. Dies ist auch der Fall, wenn sich grundlegende Wahrnehmungs- und Verhaltensfähigkeiten noch in der Entwicklung befinden. Teilweise kann dabei ganz auf die explizite Verknüpfung von Verhaltensmodi verzichtet werden (z.B. Brüdigam 1994). Größere Erfahrung mit regelbasierten Systemen wurde am ISF mit Fahrerassistenzsystemen gewonnen, die in der Simulation entwickelt werden. Bei diesen Arbeiten wird die Realisierung von Wahrnehmungs- und Verhaltensfähigkeiten nicht betrachtet. Dafür liegt ein Schwerpunkt der Arbeit auf der Strukturierung komplexer Systeme. Im Fahrsimulator setzte Kopf (1993) gekoppelte Automaten und Entscheidungsbäume ein; Ruckdeschel (1997) modellierte menschliches Verhalten mit Petrinetzen.

Mit zunehmenden Wahrnehmungsfähigkeiten in autonomen Systemen steigen auch dort die Anforderungen an die Strukturierung auf der regelbasierten Ebene. Durch den neuen Freiheitsgrad, den Grad der Automatisierung, und Anforderungen im Missionskontext entsteht zusätzlicher Strukturierungsbedarf.

In dieser Arbeit werden Zustandskarten erfolgreich eingesetzt, die eine Erweiterung der Automaten darstellen. Ein wesentliches Konzept der Zustandskarten ist die hierarchische Zerlegung von Systemen, die bei Petrinetzen Schwierigkeiten bereitet: ‘One of their [petri nets; MM] drawbacks, however, is the unavailability of a satisfactory hierarchical decomposition.’ (Harel 1987, S. 268)¹⁰

Automaten

Ein verbreitetes mathematisches Modell eines Systems mit diskreten Ein- und Ausgängen ist der endliche Automat:

‘Ein endlicher Automat (EA) besteht aus einer endlichen Menge von Zuständen und einer Menge von Transitionen, die auf einem Eingabesymbol aus einem Alphabet Σ arbeiten und einen Zustand in einen anderen überführen. Für jedes Eingabe-Symbol existiert genau ein Zustandsübergang - möglicherweise zurück in den gleichen Zustand. Ein Zustand, der gewöhnlich mit q_0 bezeichnet wird, ist der Anfangszustand, in dem der Automat startet. Einige Zustände sind ausgezeichnet als akzeptierende bzw. Endzustände.’ (Hopcroft & Ullman 1990, S. 16)

Man beachte bei dieser Definition, daß der Begriff ‘Symbol’ eine andere Bedeutung hat als in der Definition nach Rasmussen (Abschnitt 3.1, Rasmussen 1983).¹¹ Bei einem Automaten kann mit einem Zustand eine Aktion verbunden werden. Man spricht

¹⁰Diese Erfahrung bestätigt auch Ruckdeschel (1997, S. 93 - 118), der nach einer Sichtung der vorhandenen Dekompositionskonzepte für Petrinetze eine eigene Lösung entwirft.

¹¹‘Ein ‘Symbol’ ist eine abstrakte Einheit, die wir nicht formal definieren wollen... Buchstaben und Ziffern sind Beispiele für häufig genutzte Symbole. Eine Zeichenkette (oder ein Wort) ist eine endliche Folge von Symbolen’ (Hopcroft & Ullman 1990, S. 1).

dann von einem Moore-Automaten.¹² Als grafische Darstellung von Automaten haben sich Zustands-Übergangsdiagramme, auch Zustandsdiagramme genannt, etabliert. Automaten stellen eine Modellierungsmöglichkeit dar, mit der einfache, diskrete Systeme intuitiv beschrieben werden können. Zur Beschreibung komplexer Systeme sind sie wegen der exponentiell anwachsenden Zahl von Zuständen ungeeignet.¹³

Zustandskarten

Zum Einsatz in komplexen Systemen erweitert Harel (1987) Automaten um die Konzepte der Orthogonalität und des Überzustands. Diese grundlegenden Konzepte werden anhand zweier realisierter Beispiele im System kurz erläutert. Abbildung 4.1 zeigt die Zustandskarte zur Auswahl des Grades der Automatisierung (GdA, Abschnitt 1.1.2) in Längs- und Querführung. Zustände werden als Rechtecke mit abgerundeten Ecken dargestellt, Zustandsübergänge als gerichtete Kanten. Die Abbildung enthält je einen Automaten für den GdA von Längs- und Querführung. Die Tatsache, daß der GdA in Längs- und Querführung unabhängig voneinander gewählt werden kann, wird durch die gestrichelte Trennlinie ausgedrückt: Die beiden dargestellten Automaten sind orthogonal. Der Automat für den GdA in der Längsführung enthält die Zustände 'Messen', 'Identifikation der Längsführung', 'adaptiver Tempomat', 'hybrider, adaptiver Tempomat' und 'autonome Längsführung', der für die Querführung die Zustände 'Messen', 'Identifikation der Querführung', 'automatisches Spurhalten', 'automatische Querführung' und 'autonome Querführung'. In beiden Automaten sind die Zustände 'Messen' die default-Zustände, die eingenommen werden, wenn nichts anderes spezifiziert wurde. Dies wird durch die kurze gerichtete Kante ausgedrückt, die von dem schwarzen Kreis in den default-Zustand führt.

Das zweite wichtige Konzept der Zustandskarten ist die Hierarchie von Automaten, die dadurch aufgebaut wird, daß ein Zustand einen weiteren Automaten enthalten kann und dadurch zum Überzustand ('superstate', Harel 1987) wird. Abbildung 4.2 zeigt einen Ausschnitt der Hierarchie der Automaten, die sich in Abbildung 4.1 noch im Zustand 'Identifikation der Längsführung' verbirgt. Der Überzustand 'Identifikation der Längsführung' enthält je einen Automaten zur Identifikation von Bremse und Drosselklappe. Beide Automaten werden unabhängig voneinander angesteuert (gestrichelte Trennlinie). Der Automat zur Identifikation der Bremse enthält zwei Zustände: 'Messen' und 'maschinelle Sollwertvorgabe Bremse'. Aufgrund der Hierarchie der Fahrzeugführung besteht der Verzögerungskreis aus mehreren überlagerten Reglern (Abschnitt 5.1.2). Im Zustand 'maschinelle Sollwertvorgabe Bremse' kann der Bremskraftverstärker direkt über das Stellventil angeregt werden (Zustand 'Sollwert: Ventilstrom'). Soll der geregelte Bremskreis identifiziert werden, wird ein Druck als Sollwert vorgegeben (Zustand 'Sollwert: Druck'). Im Zustand 'Sollwert: Verzögerung' wird der

¹²Eine formale Definition ist z.B. in Hopcroft & Ullman (1990, S. 44ff) angegeben.

¹³'... it is also generally agreed that a complex system cannot be beneficially described in this naive fashion, because of the unmanageable, exponentially growing multitude of states, all of which have to be arranged in a 'flat' unstratified fashion...' (Harel 1987, S. 232).

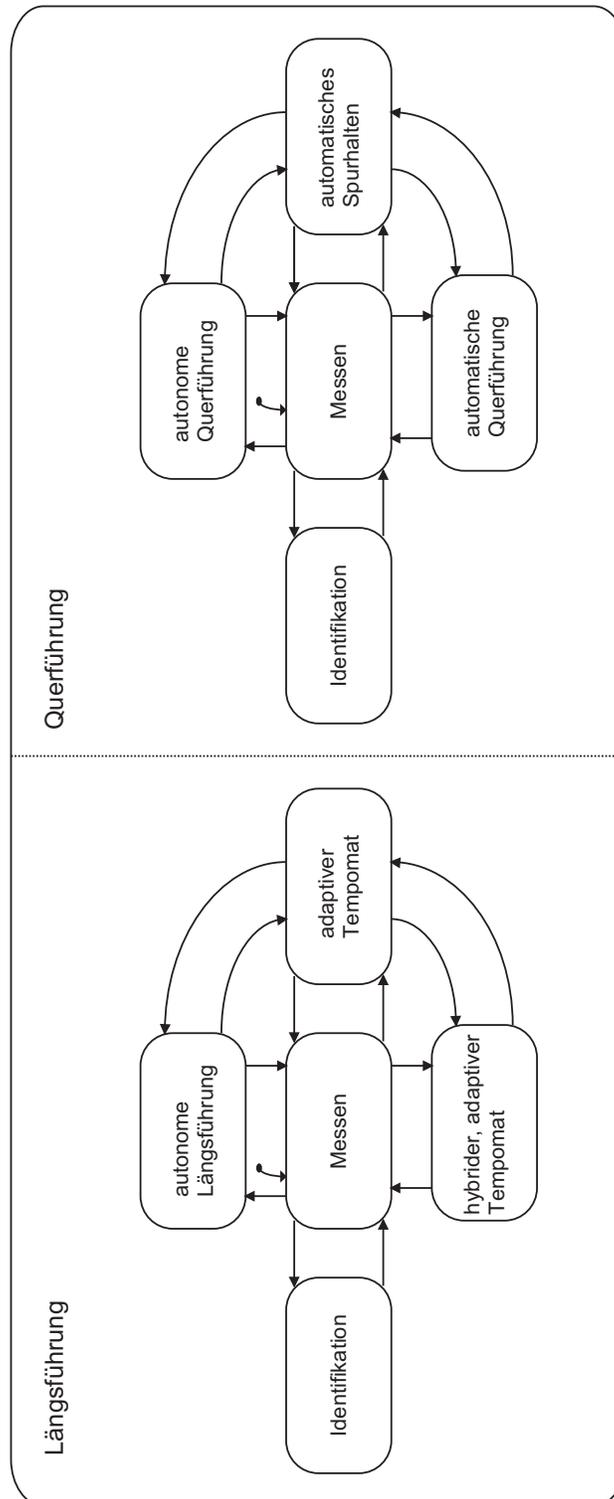


Abbildung 4.1: Zustandskarte mit parallelen Automaten für den Grad der Automatisierung in Längs- und Querführung

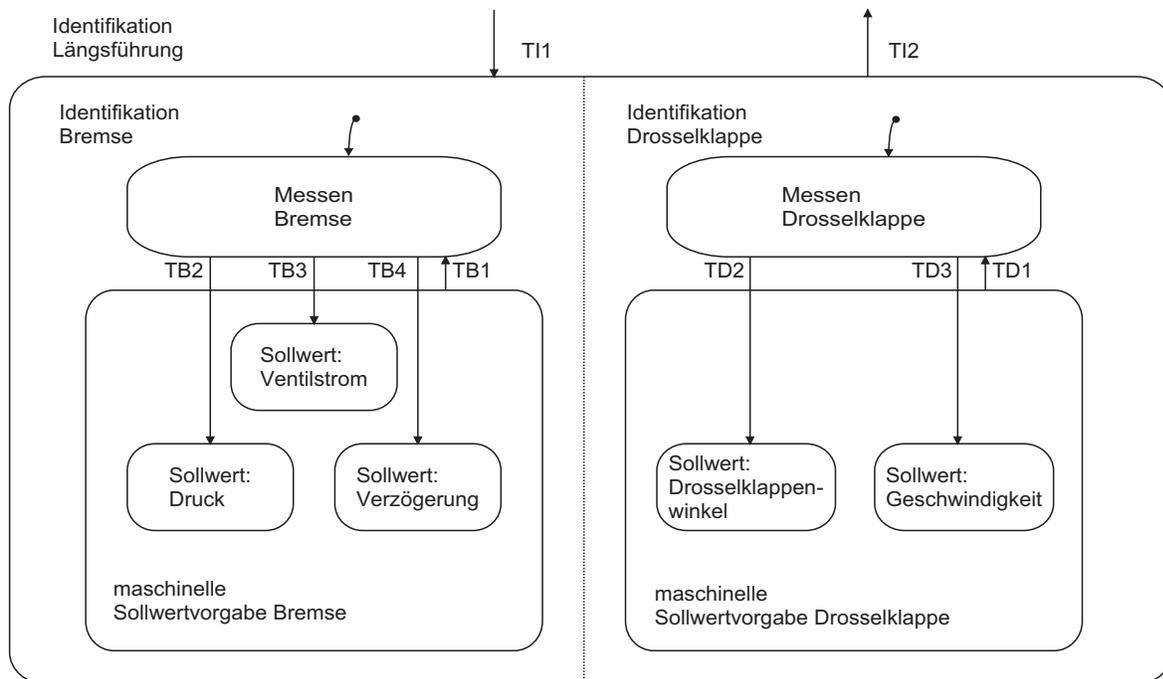


Abbildung 4.2: Hierarchie innerhalb des Zustands ‘Identifikation der Längsführung’, (Ausschnitt)

überlagerte Verzögerungsregler identifiziert. Unter jedem der drei Zustände verbergen sich weitere Automaten, die den Ablauf während der Identifikation steuern, hier aber nicht weiter erläutert werden sollen. Schon an diesem kleinen Beispiel wird deutlich, wie gut die Zustandskarten zur Strukturierung komplexer Systeme geeignet sind. Am Beispiel des Überzustands ‘adaptiver Tempomat’ (Abbildung 4.1) wird in Abschnitt 6.2.4 die Arbeitsweise der *Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung* diskutiert.

4.1.4 Symbole als integrale Repräsentation physikalischer Phänomene

Die Aufgabe, ‘Symbole’ in der inneren Welt eines Roboters mit physikalischen Phänomenen zu verbinden, wird oft als ‘symbol grounding’, in Lösungsansätzen aus dem Bereich der klassischen ‘künstlichen Intelligenz’ auch als ‘symbol grounding problem’ bezeichnet:

‘A chronic criticism of traditional artificial intelligence research is that it suffers from the symbol grounding problem, that is, the symbols with which the system reasons often have no physical correlation with reality; they are not grounded by perceptual or motor acts.’ (Arkin 1998, S. 27)

In der entwickelten Systemarchitektur (Abschnitt 3.3) wird diese Aufgabe elegant gelöst: Physikalische Objekte und Prozesse in der Umwelt werden durch Modelle auf der 4D-Ebene intern repräsentiert, denen Symbole auf der regelbasierten Ebene zugeordnet werden. Die Modelle auf der 4D-Ebene werden von den Wahrnehmungsprozessen ständig an die Veränderungen in der Außenwelt angepaßt.

Neue symbolische Zustände werden dann eingenommen, wenn sich die Umgebung diskontinuierlich ändert:

‘In summary, the model of the agent should be based on its dynamics and its environment measured via both contact and noncontact sensing. This coupling of agent and environment can be expressed mathematically using Lagrange formulation. If the agent, the environment, or their mutual relationship changes in a discontinuous way, then we have a new symbol and / or new state.’ (Bajcsy 1995, S. 312)

4.1.5 Verknüpfung von regelbasierter und 4D-Ebene

Die mathematischen Modelle auf der regelbasierten und auf der 4D-Ebene sind von unterschiedlicher Struktur. Systeme, die Modelle beider Ebenen enthalten, werden auch als ‘hybride Systeme’ oder ‘hybride Steuerungssysteme’ bezeichnet:

‘Hybrid control systems contain two distinct types of systems, continuous state and discrete-state, that interact with each other.’ (Antsaklis & Passino 1993, S. 366)

Seit Beginn der neunziger Jahre werden verschiedene Ansätze entwickelt, um die Eigenschaften hybrider Systeme zu analysieren.¹⁴ Es ist vorherrschende Meinung, daß die Eigenschaften komplexerer hybrider Systeme derzeit nicht geschlossen mathematisch analysiert werden können, sondern in einer geeigneten Simulationsumgebung analysiert und getestet werden sollten (z.B. Godbole et al. 1995; Özgüner et al. 1997b; Deshpande et al. 1997). In dieser Arbeit wurde das hybride System in der Rechnersimulation und in den Versuchsfahrzeugen erfolgreich getestet (Kapitel 8).

4.2 Objektorientierte Modellierung

Ein objektorientierter Ansatz in der Programmentwicklung ist durch die Aspekte Identität, Klassifikation, Polymorphismus und Vererbung gekennzeichnet (z.B. Rumbaugh et al. 1993; Stroustrup 1994; Oestereich 1997).

¹⁴Einen guten Überblick dazu geben die Veröffentlichungen auf den Workshops ‘Hybrid Systems’ Grossman et al. (1993), Antsaklis et al. (1995), Alur et al. (1996), Antsaklis et al. (1997), Maler (1997).

‘Identität heißt, daß Daten in diskreten, unterscheidbaren Entitäten, sogenannten Objekten, zusammengefaßt werden... Klassifikation meint, daß Objekte mit der gleichen Datenstruktur (Attribute) und dem gleichen Verhalten (Operationen) zu einer Klasse gruppiert werden... Polymorphismus meint, daß sich die gleiche Operation in unterschiedlichen Klassen unterschiedlich verhalten kann... Vererbung bezeichnet die gemeinsame Verwendung von Attributen und Operationen durch verschiedene Klassen auf der Basis einer hierarchischen Relation. Eine Klasse kann sehr allgemein definiert sein und dann in immer detaillierteren Unterklassen verfeinert werden. Jede Unterklasse übernimmt oder erbt alle Eigenschaften ihrer Oberklasse und fügt ihre eigenen, individuellen Eigenschaften hinzu...’ (Rumbaugh et al. 1993, S. 1-4).

Verschiedene objektorientierte Entwurfsmethoden wurden in der ‘vereinheitlichten Modellierungssprache’ (‘Unified modeling language’, UML) zusammengefaßt.¹⁵ Eine Klasse ist in UML eine Beschreibung für eine Menge von Objekten mit ähnlicher Struktur, Verhalten und Beziehungen.¹⁶ Klassendiagramme zeigen die statische Struktur eines Modells. Dazu gehören die Klassen, ihre internen Strukturen und deren Beziehungen (UML 1999, S. 3-33f). Im Rahmen dieser Arbeit werden Beziehungen durch Assoziation, Aggregation, Komposition oder Vererbung beschrieben. Eine Assoziation beschreibt eine Verbindung zwischen Klassen, die es diesen erlaubt, miteinander zu kommunizieren. Abbildung 4.3 (linkes Bild) zeigt ein vereinfachtes realisiertes Beispiel, in dem zwei spezielle Formen der Assoziation, die Aggregation und die Komposition, und eine einfache Vererbung auftreten. Die Klasse ‘Zustandsregler’ enthält neben den Funktionen für die Regelung auch eine Klasse, in der die ‘Spezifikation’ für den Regler enthalten ist (Komposition, gefüllte Raute) und eine Referenz auf eine Klasse, die aktuelle ‘Gütemaße’ für den Zustandsregler enthält (Aggregation, leere Raute). Von der allgemeinen Klasse Zustandsregler ist eine spezialisierte Klasse ‘Querregler’ abgeleitet, die die Eigenschaften des Zustandsreglers erbt und darüber hinaus neue hinzufügt.¹⁷

Neben der einfachen Vererbung wird auch die Mehrfachvererbung mit abstrakten Basisklassen eingesetzt. Von einer abstrakten Klasse werden keine Objekte erzeugt. Sie ist nur sinnvoll, wenn Klassen von ihr abgeleitet werden, die ihre Eigenschaften erben. Bei der mehrfachen Vererbung erbt die abgeleitete Klasse die Eigenschaften von mehreren Basisklassen. Die Klasse ‘Autonome Mobilität’ in Abbildung 4.3 (rechtes Bild) erbt die Eigenschaften der abstrakten Basisklassen ‘Situationserfassung’, ‘Verhaltensentscheidung’ und ‘Fahrzeugführung’.¹⁸ Damit sind die Eigenschaften dieser Basisklassen in

¹⁵Die Sprachdefinition für UML ist in UML (1999) veröffentlicht. Didaktisch aufbereitete Einführungen finden sich in Oestereich (1997) und Douglass (1998).

¹⁶‘class: A description of a set of objects that share the same attributes, operations, methods, relationships, and semantics. A class may use a set of interfaces to specify collections of operations it provides to its environment’ (UML 1999, S. B-4).

¹⁷Eine funktionale Darstellung der Gütemaße und der Querregelung findet sich in Abschnitt 5.2 und Abschnitt 5.3.

¹⁸Gegenüber der Implementierung ist die Abbildung 4.3 vereinfacht dargestellt. Eine detailliertere Darstellung findet sich in Abschnitt 7.2.3 (Abbildung 7.20).

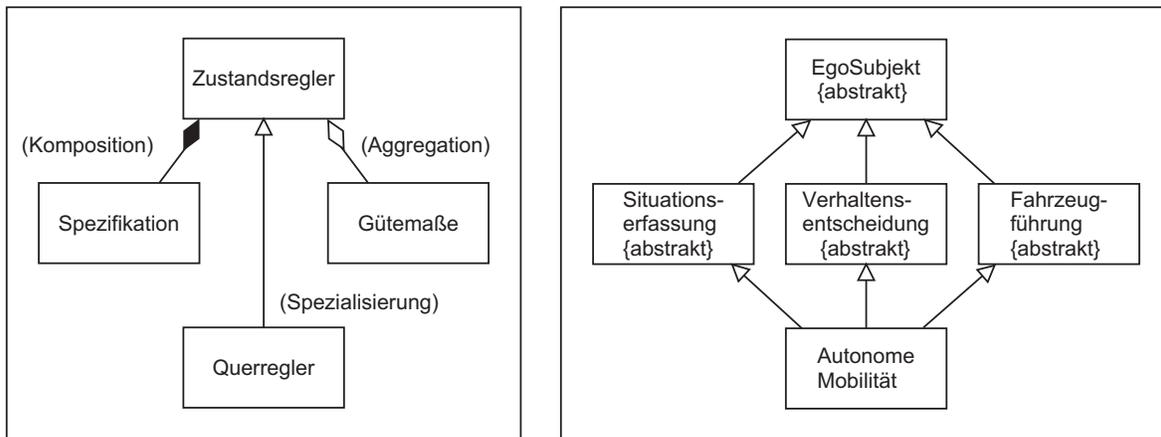


Abbildung 4.3: Klassendiagramme: Die Klasse ‘Querregler’ als Spezialisierung der Klasse ‘Zustandsregler’. Mehrfachvererbung mit abstrakten Basisklassen. Beide Beispiele vereinfacht gegenüber der Implementierung.

Objekten von der Klasse ‘Autonome Mobilität’ enthalten, ohne daß Objekte von den Basisklassen erzeugt wurden. Da die Basisklassen wiederum von der abstrakten Klasse ‘EgoSubjekt’ abgeleitet wurden, erbt auch ‘Autonome Mobilität’ die Eigenschaften von ‘EgoSubjekt’. Die Methoden der ‘Situationserfassung’, ‘Verhaltensentscheidung’ und der ‘Fahrzeugführung’ (Abschnitt 3.3) arbeiten in dieser Form der Implementierung mit einer gemeinsamen konsistenten internen Repräsentation des eigenen Fahrzeugs in ‘EgoSubjekt’ (Abschnitt 4.3.2). Die Mehrfachvererbung mit abstrakten Basisklassen wird dabei als ‘ein möglicher Mechanismus für die Implementation von Informations-Sharing’ (Stroustrup 1994) eingesetzt.

Neben den Klassendiagrammen wurden in UML verschiedene Verhaltensdiagramme definiert, die die Interaktion von Objekten veranschaulichen. In dieser Arbeit werden das Sequenzdiagramm und das Zustandsdiagramm eingesetzt. Das Sequenzdiagramm zeigt eine Folge von Nachrichten, ‘die eine ausgewählte Menge von Objekten in einer zeitlich begrenzten Situation austauscht, wobei der zeitliche Ablauf betont wird’ (Oestereich 1997, S. 223).¹⁹ Die Zustandskarten nach Harel wurden als Zustandsdiagramme in UML aufgenommen.²⁰

¹⁹Ein Beispiel zum Sequenzdiagramm wird in Abschnitt 6.2 in Abbildung 6.2 dargestellt.

²⁰Gegenüber der Darstellung in der ersten Veröffentlichung (Harel 1987) wurden sie um einige Darstellungsmöglichkeiten ergänzt, von denen in dieser Arbeit nur der Querstrich in einem Zustandsymbol als Trennung zwischen dem Namen des Zustands und dem Namen der mit dem Zustand verbundenen Aktion verwendet wird (Abbildungen 6.5 - 6.10).

4.3 Repräsentation physikalischer Objekte

4.3.1 Straßen und Landmarken

Als statische Objekte in der Umwelt werden Straßen und Landmarken im System repräsentiert. Objekte, deren absolute Lage in der Welt von Bedeutung ist, werden ortsfest modelliert. Ist die Relativlage der Objekte zum Eigenfahrzeug entscheidend, wird eine Modellierung relativ zu diesem bevorzugt. Auf der 4D-Ebene wird die vom Eigenfahrzeug befahrene Straße durch die horizontale und vertikale Krümmung (Dickmanns & Mysliwetz 1992), die geschätzte Fahrspurbreite und die Anzahl der Nachbarspuren (Behringer 1996) repräsentiert. Auf der regelbasierten Ebene werden integrale Maße als Attribute für Spuren ermittelt. Diese können Aussagen zur Beschaffenheit der Oberfläche oder zum Verkehrsaufkommen auf einer Spur repräsentieren, wie die mittlere Verkehrsdichte und die Durchschnittsgeschwindigkeit (Nilubol 1998).

Als Landmarken wurden bisher künstliche Landmarken (Hock 1994) und Querstraßen (Müller 1996) wahrgenommen. Geplant ist auch die Repräsentation und Erkennung von Gebäuden als Landmarken (Gregor 1998). Für die *Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung* (Abschnitt 6.2.4) werden die Landmarken je nach Bedeutung explizit oder implizit repräsentiert. Eine explizite Modellierung von Landmarken ist dann notwendig, wenn die genaue Lage der Landmarke relativ zum Eigenfahrzeug und die Geometrie der Landmarke von Bedeutung sind, wie dies beim Abbiegen der Fall ist (Müller 1996; Siedersberger & Maurer 1998). Werden die Landmarken zur Verbesserung der Positionsschätzung bei der Landmarkennavigation eingesetzt (Hock 1994; Müller 1996; Gregor 1998), genügt implizites Wissen über die Landmarken im Gütemaß zur Positionsschätzung. Ein Beispiel dazu wird in Abschnitt 8.2.4 beim Anhalten nach Missionsplan demonstriert.

4.3.2 Selbstrepräsentation für situationsgerechtes Verhalten

Für verantwortungsvolles Handeln ist es unabdingbar, daß sich das autonome Fahrzeug selbst kennt. Es ist unangenehm, wenn Mitmenschen ihre eigenen Fähigkeiten falsch einschätzen. Es kann höchst gefährlich werden, wenn ein Agent die Grenzen seiner Möglichkeiten ignoriert. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Schaltzentrale dieses Agenten auf Kohlenstoff oder auf Silikon basiert. Auch von semi-autonomen Fahrzeugen wird man verantwortungsvolles Handeln fordern: Handeln, das die eigenen Fähigkeiten integral berücksichtigt.

Das Klassendiagramm in Abbildung 4.4 zeigt die unterschiedlichen Bestandteile der zentralen Selbstrepräsentation im ‘EgoSubjekt’ für die Generierung von situationsgerechtem Verhalten. Um die Darstellung übersichtlich zu halten, sind weder die Abhängigkeiten zwischen den Klassen noch die Elemente der einzelnen Klassen eingezeichnet. Einige Klassen von ‘EgoSubjekt’ sind ihrerseits wieder Kompositionen oder Aggregationen, die weitere Klassen oder Referenzen auf Klassen enthalten. Zusätzlich zur

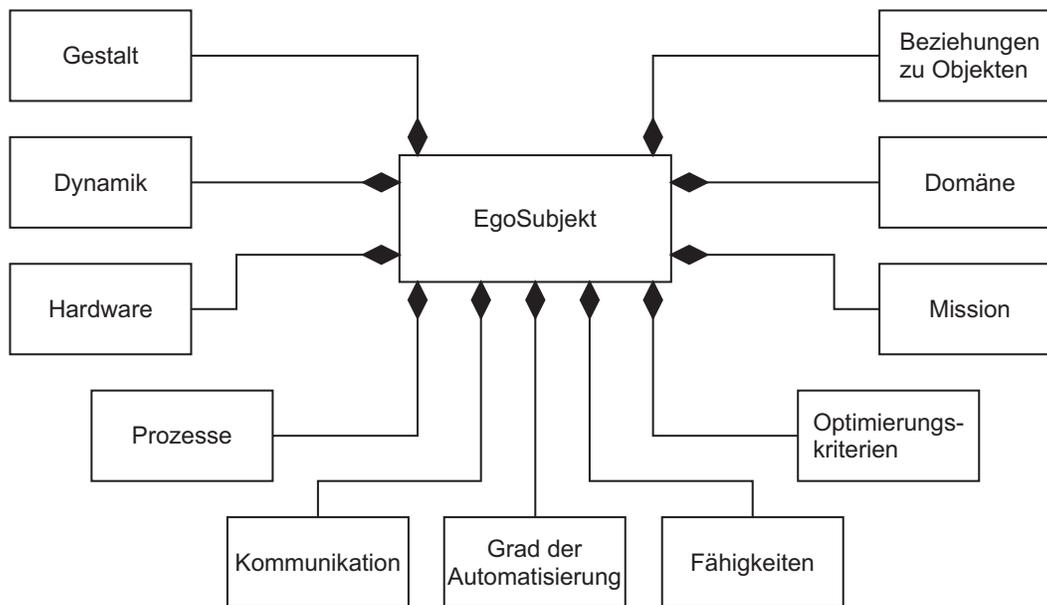


Abbildung 4.4: Klassendiagramm: Ego-Subjekt

zentralen Repräsentation ist in den Modulen zur Verhaltensgenerierung verteilt Spezialwissen repräsentiert.

Der Handelnde muß seine **Gestalt** in allen drei Dimensionen kennen, um die Integrität des eigenen Körpers zu bewahren. Dazu wird dieser intern wie in Abbildung 4.5 dargestellt repräsentiert. Im Fahrzeug sind die eigenen Außenmaße in allen drei Dimensionen, die Bodenfreiheit und die Lage der Achsen bekannt. Unterschieden wird zwischen der maximalen Breite der Karosserie und der Breite unter Berücksichtigung der Spiegel. Die Räder werden mit Durchmesser und Radbreite modelliert. Objekte des eigenen Körpers, deren Relativlage zum Schwerpunktkoordinatensystem veränderlich ist oder geschätzt werden soll und auch für Wahrnehmungsprozesse im verteilten System von Interesse ist, werden als eigene Objekte im Szenenbaum modelliert (vgl. Abbildung 4.6). Die Modelle des eigenen Körpers werden bei der Berechnung von Zeitmaßen (z.B. Time-To-Line-Crossing, Abschnitt 5.3.2) und Abstandsmaßen (z.B. zu anderen Fahrzeugen, Abschnitt 6.2.4), aber auch beim Manövrieren im engen Gelände (Müller 1996, S. 60) eingesetzt.²¹

²¹Man beachte, daß neben der Modellierung des eigenen Körpers für die Verhaltensgenerierung auch ein Modell für die visuelle Szeneninterpretation benötigt wird. Um die helle, reflektierende Fläche im Bild als Motorhaube zu interpretieren, muß diese als solche repräsentiert sein. Die vorderen Holme im Fahrzeug (A-Holme) können im Bild bei geschwenkter Kamera als vertikale Strukturen sichtbar werden und müssen als Bestandteil des Eigenfahrzeugs und nicht als Hindernisse interpretiert werden. Ansätze für Modelle des eigenen Körpers zur visuellen Wahrnehmung finden sich bei Dickmanns (1997a).

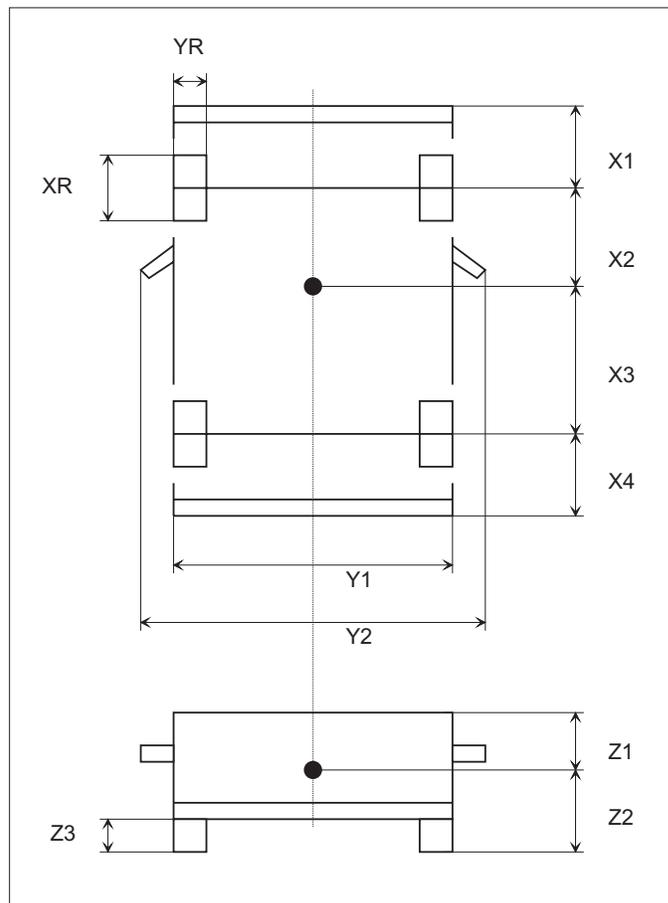


Abbildung 4.5: Gestalt des eigenen Körpers; X1: Abstand Stoßfänger - Vorderachse, X2: Abstand Vorderachse - Schwerpunkt, X3: Abstand Schwerpunkt - Hinterachse, X4: Abstand Hinterachse - Stoßfänger, Y1: Breite des Fahrzeugs an der Karosserie, Y2: Breite des Fahrzeugs an den Spiegeln, XR: Durchmesser des Rades, YR: Breite des Rades, Z1: Abstand Dach - Schwerpunkt, Z2: Abstand Schwerpunkt - Fahrbahn, Z3: Abstand Fahrbahn - Karosserie

Neben der Gestalt wird die **Dynamik** des eigenen Fahrzeugs in Form von dynamischen Modellen repräsentiert (Abschnitt 4.1.1). Derzeit werden bei der Verhaltensgenerierung Modelle unterschiedlicher Auflösung für die Quer- und Längsdynamik eingesetzt. Sie dienen zur Voraussimulation von Situationen (Abschnitt 6.2.3) und zur Berechnung der Reglerkoeffizienten bei Polvorgabe (Abschnitt 5.3).

Als Bestandteile der **Hardware** werden die Rechner, die Sensoren und die Aktuatoren des eigenen Fahrzeugs intern modelliert. Sensoren werden durch Konvertierungsparameter, Offsets, Varianzen und Statusmeldungen charakterisiert; bei den Aktuatoren kommen Aktivitäten, Stellgrößen und Fehlermeldungen der unterlagerten Aktuatoransteuerungen hinzu. Rechner werden derzeit alleine durch ihren Status repräsentiert; Angaben über die Auslastung wären hilfreich, sind aber derzeit nicht integriert.

Explizit repräsentiert werden die **Prozesse** für die Wahrnehmung und die Regelung. Bei der *Überwachung der Leistungsfähigkeit* und der *Situationsanalyse für die Fortbewegung* (Abschnitte 6.2.2 und 6.2.3) wird der Status der Prozesse, der Zustand der Sensoren und der Erkennungsbereich von Wahrnehmungsprozessen berücksichtigt. Der Erkennungsbereich beeinflusst zusätzlich die Generierung von Verhalten. Der Zustand der **Kommunikation** der Prozesse ist für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems von gleichrangiger Bedeutung und wird ebenfalls repräsentiert. Neben dem Status wird überprüft, ob die erwarteten Objekte in der *Dynamischen Objektdatenbasis* (Rieder 2000) vorhanden sind und deren Attribute zyklisch erneuert werden.²²

Der **Grad der Automatisierung** (GdA), der als Kernkonzept des Systems zur flexiblen Automatisierung bereits in Abschnitt 1.1.2 erläutert wurde, wird ebenfalls zentral repräsentiert. Dabei wird zwischen dem GdA, den das System aktuell anbieten könnte, dem GdA, den der Nutzer gewählt hat und der Schnittmenge daraus, dem aktuellen GdA, unterschieden.

Instanzen aller bisher diskutierten Klassen der Repräsentation des Eigenfahrzeugs werden bei einer weiteren integralen Repräsentation, den **Fähigkeiten**, berücksichtigt. Im autonomen Fahrzeug werden Fähigkeiten zur Wahrnehmung, Entscheidung, Planung und Aktion benötigt. Allen Fähigkeiten gemeinsam ist, daß sie aktiviert und deaktiviert werden müssen, was je nach Ressourcenbedarf damit verbunden ist, neue Prozesse zu starten oder alte zu beenden. Fähigkeiten für die Aktion werden auch als Verhaltensfähigkeiten oder Verhaltensweisen bezeichnet (Abschnitt 5.1.2). Die Qualität bei der Ausführung von Fähigkeiten wird durch Gütemaße beschrieben, wie sie für die Verhaltensweisen in Abschnitt 5.2 und teilweise für die Wahrnehmung in den entsprechenden Arbeiten vorgeschlagen wurden (Behringer 1996; Thomanek 1996; Dickmanns 1997a; Rieder 2000). Im System werden sowohl die aktiven Fähigkeiten als auch die

²²Im Rahmen einer Diplomarbeit hat Nilubol (1998) gezeigt, wie Wissen über die Prozesse zur Hinderniserkennung ('obstacle detection and tracking', ODT, Thomanek 1996) repräsentiert werden kann. Hier wurden der Vorausschaubereich der Kameras und daraus resultierende tote Winkel modelliert. Die Plausibilität des Vorausschaubereiches der Objekterkennung kann durch Beobachten über die Zeit überprüft werden: Eine Auswertung der Zustandsgrößen von ODT über der Zeit zeigt den Bereich an, in dem Fahrzeuge tatsächlich erkannt wurden.

aktuell zur Verfügung stehenden repräsentiert. Die damit entstehende integrale Repräsentationsebene ist eine geeignete Austauschenebene für Entscheidungsinstanzen auf den oberen Systemebenen, auf der technische Details gekapselt bleiben und nicht den Blick für das Gesamtsystem verstellen sollen. Für die Entscheidung, ob ein Spurwechsel automatisch durchgeführt werden kann, muß auf der oberen Ebene nicht bekannt sein, welche Wahrnehmungsprozesse im System aktiv sind. Wichtig ist, daß die Fähigkeiten, Fahrspuren und Fremdfahrzeuge zu erkennen und diese einander zuzuordnen, mit hinreichender Güte im System vorhanden sind.

Im teilautomatischen Betrieb bieten die Fähigkeiten eine gute Schnittstelle zum menschlichen Fahrer. Auch der Mensch kann so zunehmend von technischen Details entlastet werden und sich auf die Fähigkeiten des Systems konzentrieren. Bei zunehmender Automatisierung im Automobilbereich wird es immer wichtiger, Fähigkeiten und deren Grenzen zu kommunizieren und auf Systemstatusmeldungen zu verzichten, die für den Laien unverständlich bleiben werden.

Aus dem Wissen über die aktuelle **Mission** leitet der Handelnde die Aufgaben ab, die zur Erfüllung der Mission führen. Die Bedeutung von anderen Objekten und Subjekten hängt stark von der Mission ab: So kann ein Objekt für einen Agenten in einer Transportmission ein Hindernis, für einen Agenten in einer Kampfmission das zu erreichende Ziel darstellen. In der zentralen Repräsentation des Eigenfahrzeugs werden das aktuelle Missionselement und die folgenden Missionselemente ebenso repräsentiert wie die geschätzte Position im Missionselement, die Unsicherheit der Schätzung und die maximal zulässige Unsicherheit.

Eine Mission soll nach vorgegebenen **Optimierungskriterien** erfüllt werden. Vom autonomen Fahrzeug kann zeit-, energie- oder komfortoptimales Verhalten oder eine Kombination daraus gefordert werden. Ein wichtiges Optimierungskriterium wird oft übersehen, vom Menschen aber ständig eingesetzt: die Optimierung hinsichtlich der eigenen Fähigkeiten. Ein menschlicher Autofahrer, der eine Innenstadt nicht kennt und keinen kompetenten Assistenten zur Seite hat, wird versuchen, diese zu umgehen, auch wenn der Weg durch die Stadt für den Ortskundigen kürzer, schneller und komfortabler sein mag. Er optimiert die Routenauswahl bezüglich seiner eigenen Fähigkeiten. Hock (1994) setzt dieses Kriterium bereits bei der Routenplanung ein. In dieser Arbeit wird es auch bei der Verhaltensauswahl und -ausführung berücksichtigt (z.B. Abschnitt 6.2.3).

Als Hintergrundwissen benötigt das eigene Fahrzeug Wissen über die aktuelle **Domäne**. In der Wahrnehmung leitet sich aus dem Domänenwissen ab, welche Objekte in der Domäne vorhanden sein können und erkannt werden müssen. Abhängig vom Domänenwissen wird nur ein Teil der zur Verfügung stehenden Verhaltensweisen zur Aktivierung freigegeben. Rückwärtseinparken oder Linksabbiegen sind auf der Autobahn im normalen Verkehr keine zulässigen Verhaltensweisen. Durch die Einschränkung der gültigen Verhaltensweisen können die Folgen von Fehleinschätzungen von Situationen in vielen Fällen gemildert werden. In jeder Domäne werden die gültigen Verhaltensregeln repräsentiert. Die Menge der zu beachtenden Regeln reduziert sich in vielen Szenarien deutlich.

Relativlagebeziehungen zu anderen physikalischen Objekten, aber auch deren Bedeutung für das eigene Fahrzeug auf der regelbasierten Ebene werden als **Beziehungen zu Objekten** dargestellt. Die räumlich-zeitliche Anordnung von physikalischen Objekten aus Sicht eines Betrachters, die bei Ansätzen zur maschinellen Wahrnehmung auch als ‘Szene’ bezeichnet wird (z.B. Nagel 1996; Enkelmann 1997; Dickmanns 1997a), wird auf der 4D-Ebene mit Hilfe eines Szenenbaums modelliert. Physikalische Objekte werden als Knoten repräsentiert, die Relativlagebeziehungen zwischen zwei Objekten, die durch eine homogene Transformation beschrieben werden kann, als Kanten zwischen zwei Knoten.

In Abbildung 4.6 ist ein Ausschnitt des Szenenbaums dargestellt, der im Eigenfahrzeug an zentraler Stelle in der *Dynamischen Objektdatenbasis* (Abschnitt 7.2.3, Rieder 2000) aufgebaut wird. Die Wurzel des Szenenbaums liegt im Schwerpunkt des autonomen Fahrzeugs: das Fahrzeug hat eine ego-zentrierte Sicht der Welt. Mit dem Wurzelknoten verbunden sind physikalische Objekte der Außenwelt, Fahrwege, Landmarken oder Fremdfahrzeuge und Objekte der Innenwelt wie Sensoren und Aktuatoren. Je nach Bedarf können einzelne Objekte detaillierter dargestellt werden. Die Bezugskoordinationssysteme für die einzelnen Objekte sind bei Siedersberger (1999b) zusammengefaßt. Zusätzlich zu den Relativlagebeziehungen auf der 4D-Ebene wird die Bedeutung von Fremdfahrzeugen für das eigene Fahrzeug auf der regelbasierten Ebene repräsentiert.

Neben der zentralen Selbstrepräsentation im ‘EgoSubjekt’ wird spezialisiertes Wissen für die Generierung von Verhalten in den Modulen ‘Situationserfassung’, ‘Verhaltensentscheidung’ und ‘Fahrzeugführung’ repräsentiert. Die ‘Verhaltensentscheidung’ enthält Zustandskarten für die Quer- und Längsführung (Abschnitte 4.1.3 und 6.2.4), die ‘Fahrzeugführung’ Regler und Vorsteuerungen für die Generierung von Verhalten (Kapitel 5).

Berücksichtigt man die unterschiedlichen Systemebenen, so läßt sich die Repräsentation des ‘Selbst’ wie in Abbildung 4.7 darstellen. Auf der hardware-spezifischen Ebene werden Hardware, Prozesse und die Kommunikation der Prozesse repräsentiert. Die 4D-Ebene enthält Modelle für die Gestalt und Dynamik, die Relativlagebeziehungen im Szenenbaum und die Regler und Vorsteuerungen. Auf der regelbasierten Ebene wird das Fahrzeug durch den Grad der Automatisierung, die Automaten, die Fähigkeiten und die Bedeutung von Objekten in der Umwelt für das Fahrzeug charakterisiert. Auf der obersten Ebene sind die Mission, die Domäne und die Optimierungskriterien repräsentiert.

4.3.3 Fremdfahrzeuge

Bei der Modellierung von Fremdfahrzeugen wird angenommen, daß diese - abgesehen von den hardware-spezifischen Eigenschaften - wie das Eigenfahrzeug modelliert werden können. Die ‘Selbstrepräsentation’ wird damit nicht nur für die Repräsentation des autonomen oder teilautonomen Fahrzeugs eingesetzt, sondern im hybriden Verkehr, in dem menschlich und maschinell geführte Fahrzeuge vorkommen, auch als Modell zur

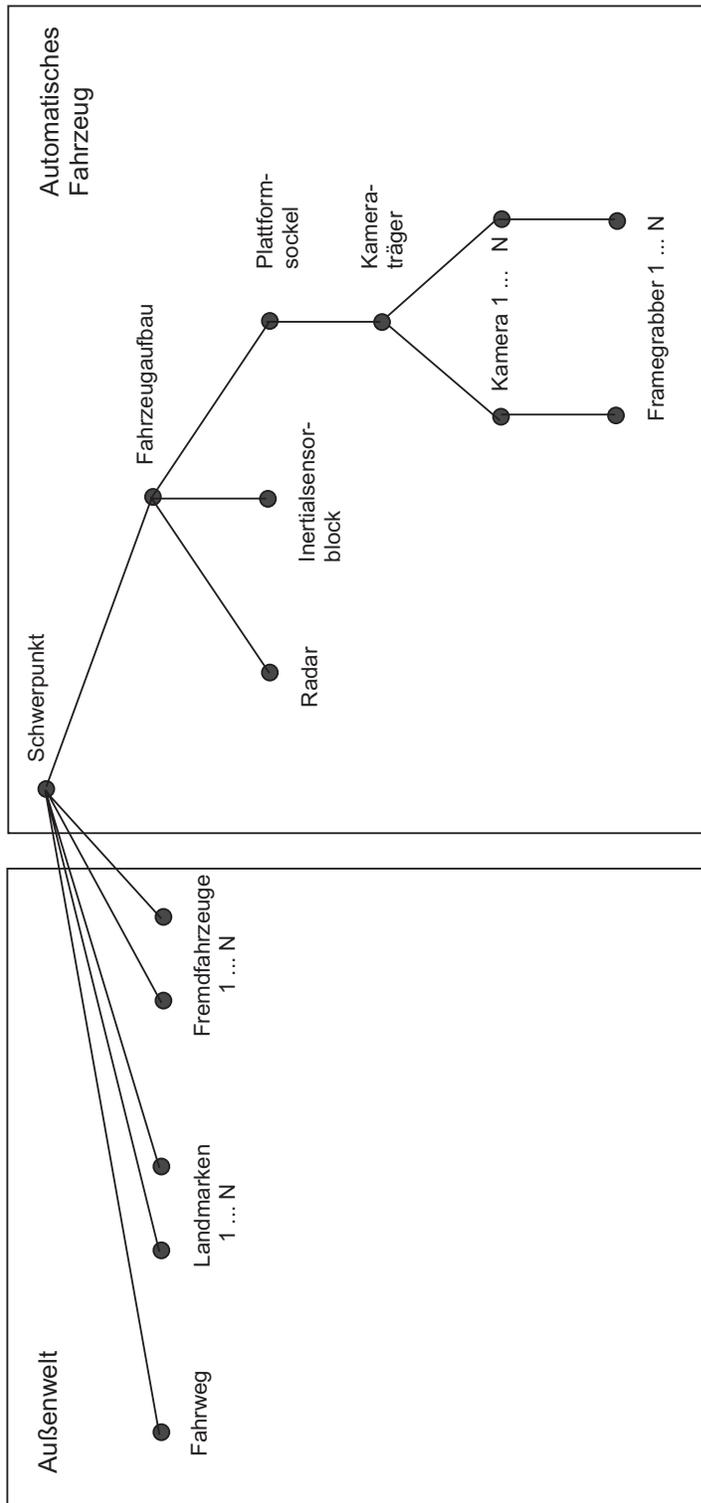


Abbildung 4.6: Ausschnitt aus dem Szenenbaum

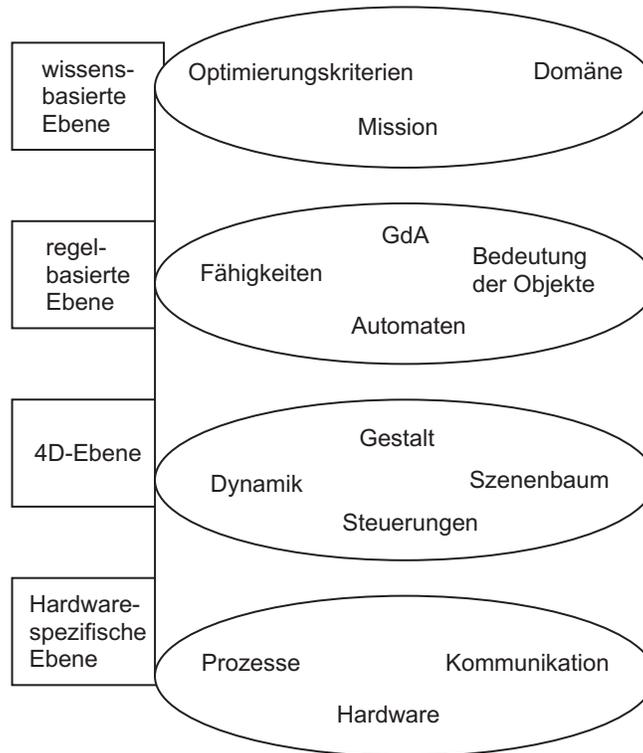


Abbildung 4.7: Selbstrepräsentation in Mehrebenenendarstellung; GdA: Grad der Automatisierung

Beschreibung von Fahrzeugen mit menschlichen Fahrern.²³ Mit den derzeit verfügbaren visuellen Fähigkeiten kann ein einfaches Modell für die Form des Fremdfahrzeuges instantiiert werden. Aus der Relativlage zu anderen Fahrzeugen können Hypothesen über die Bedeutung von anderen Fahrzeugen für ein Fremdfahrzeug und die aktiven Verhaltensweisen im Fremdfahrzeug abgeleitet werden. Attribute, die durch Beobachten über die Zeit gewonnen werden, stellen erste Anhaltspunkte dar, welche Optimierungskriterien gerade aktiv sind (Nilubol 1998). Mit zunehmenden Wahrnehmungsfähigkeiten gewinnt die komplexe Repräsentation von Fremdfahrzeugen bei der Integration einzelner Wahrnehmungen an Bedeutung. Erhalten automatische Fahrzeuge die Möglichkeit zur Kommunikation, so können sie sich gegenseitig detailliertere Informationen senden und bei ihren Verhaltensentscheidungen mitberücksichtigen. Eine geeignete Repräsentation, Fremdfahrzeuge wie das 'Selbst' zu repräsentieren, ist dazu schon vorhanden.

4.3.4 Fahrermodell

Im teilautomatischen Fahrbetrieb kann zusätzlich die Anforderung bestehen, die Fähigkeiten des Fahrers im Umgang mit der Automatisierung von Fahrfunktionen zu repräsentieren. Fahrer werden dadurch charakterisiert, wie vertraut sie mit der automatischen Fahrzeugführung sind. Automatische Fahrfunktionen mit Funktionslücken können nur angeboten werden, wenn der Fahrer in der Lage ist, diese wahrzunehmen und die Defizite des Systems zu kompensieren.²⁴ Aufwendigere Fahrermodelle, die auch die Adaption an individuelle Fahrereigenschaften erlauben, wurden am ISF in der Forschungsgruppe von Onken untersucht (Kopf 1993; Feraric 1996; Schreiner 1999; Grashey & Onken 1997).

²³Wegen der gleichen Modellierung von Mensch und Maschine entfällt der GdA als Freiheitsgrad bei Fremdfahrzeugen.

²⁴Eine detailliertere Diskussion des implementierten Ansatzes findet sich bei Nilubol (1998).

Kapitel 5

Fahrzeugführung

Die Fahrzeugführung im autonomen System generiert Verhaltensweisen für die Fortbewegung. Diese komplexe Aufgabe wird in Abschnitt 5.1 nach verschiedenen Kriterien in Teilaufgaben gegliedert, für die systematische, möglichst einfache Lösungsansätze existieren. Für die flexible Automatisierung wurden flexible Strukturen zur Generierung von Verhalten geschaffen. Integraler Bestandteil der Verhaltensweisen sind Gütemaße, die zur quantitativen Bewertung der aktuellen Leistungsfähigkeit von Regelkreisen (Abschnitt 5.2) verwendet werden. Die in den ersten Abschnitten entwickelten Ansätze werden in den Abschnitten 5.3 und 5.4 am Beispiel der Quer- und Längsführung näher erläutert.

In dieser Arbeit wird die Fahrzeugführung möglichst unabhängig von den Eigenschaften eines bestimmten Fahrzeugtyps ausgelegt. Die fahrzeugunabhängigen Merkmale der Fahrzeugführung werden in diesem Kapitel vorgestellt. Der Nachweis der Unabhängigkeit wurde dadurch erbracht, daß die fahrzeugunabhängigen Programmteile in zwei grundverschiedenen Fahrzeugtypen, einem leichten Lastkraftwagen (Baujahr: 1983) und einem Personenkraftwagen der Oberklasse (Baujahr: 1992), eingesetzt wurden. Unvermeidliche Anpassungen, die auf der hardware-spezifischen Ebene vorgenommen wurden, werden in Abschnitt 7.1.4 vorgestellt.

5.1 Struktur der Fahrzeugführung

Im Kraftfahrzeug sind die Längs- und die Querdynamik in vielen Arbeitsbereichen nur schwach gekoppelt (Abschnitt 5.1.1). Die Auslegung von Längs- und Querregelung kann daher getrennt erfolgen. Sowohl Längs- als auch Querregelung sind im Sinne der in Kapitel 3 vorgestellten Mehrebenenhierarchie hierarchisch aufgebaut. Die Besonderheiten der Kreisschließung auf der hardware-spezifischen und auf der 4D-Ebene werden in Abschnitt 5.1.2 diskutiert.

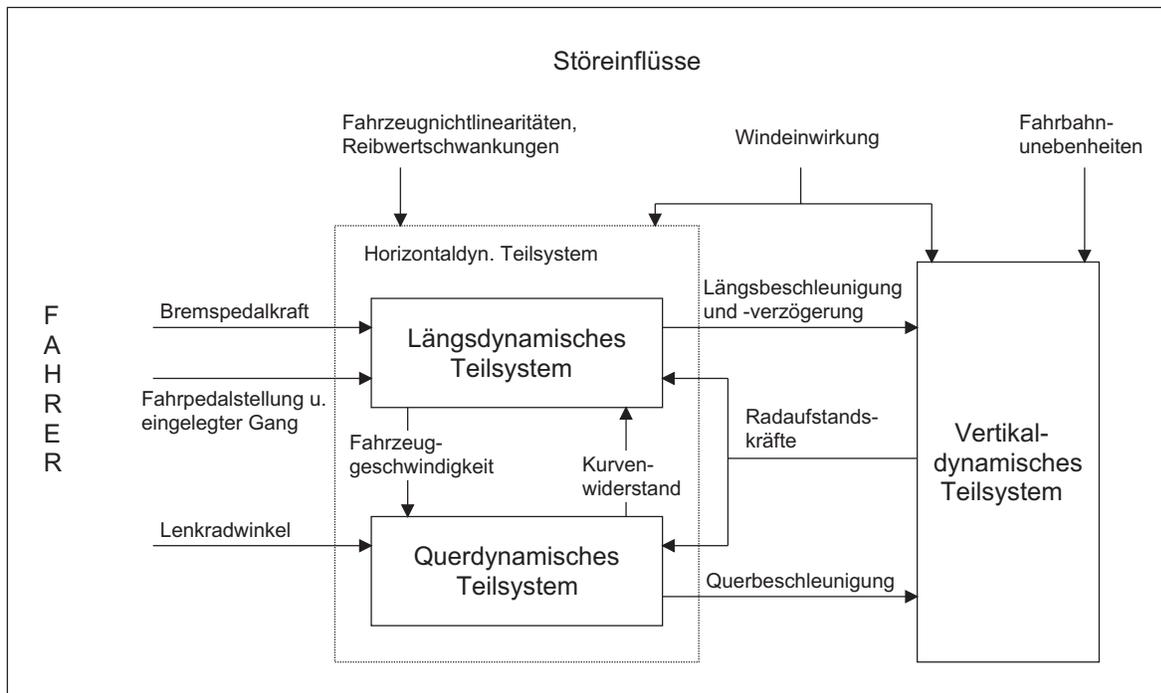


Abbildung 5.1: Blockstruktur des Kraftfahrzeugs als dynamisches System (nach Roppenecker 1994)

5.1.1 Teilsysteme der Regelstrecke ‘Kraftfahrzeug’

Für viele Untersuchungen in der Kraftfahrzeugtechnik kann die Regelstrecke ‘Kraftfahrzeug’ in drei Teilsysteme aufgeteilt werden: die Längsdynamik, die Querdynamik und die Vertikaldynamik. Die drei Teilstrecken sind miteinander verkoppelt; die wichtigsten Verkopplungen sind in Abbildung 5.1 gezeigt (Roppenecker 1994).

In ausgewählten, typischen Fahrsituationen sind die dynamischen Kopplungen nur teilweise wirksam; teilweise können die Koppelgrößen durch konstante Werte ersetzt werden. Der querdynamische Bewegungszustand ändert sich im allgemeinen wesentlich schneller als die Fahrzeuggeschwindigkeit. Daher kann die Fahrzeuggeschwindigkeit bei der Querdynamikuntersuchung als konstanter oder langsam zeitveränderlicher Parameter angesehen werden (siehe z.B. Roppenecker 1994).

In dieser Arbeit wird die Kopplung zwischen Quer- und Längsregelung wie folgt berücksichtigt: In der Zustandsbeschreibung der Querdynamik des Fahrzeugs wird die Fahrzeuggeschwindigkeit in Längsrichtung als Parameter modelliert. Das ist so lange gerechtfertigt, wie sich die Geschwindigkeit in Längsrichtung im Vergleich zur Geschwindigkeit in Querrichtung nur langsam ändert. Die maximale Geschwindigkeit in Längsrichtung wird durch die bei Bahnkrümmung auftretenden Querbeschleunigungen begrenzt, die einen fahrerabhängigen Grenzwert nicht überschreiten dürfen.

5.1.2 Hierarchische Fahrzeugführung

In der funktionalen Systemarchitektur für sehende autonome Fahrzeuge auf der Autobahn (Abschnitt 3.3, Abbildung 3.5) wird die Aufgabe der Fahrzeugführung dem Modul *Vehicle Control* (*Fahrzeugführung*) zugewiesen. Der hierarchische Aufbau des Moduls *Vehicle Control* (VC) ist in Abbildung 5.2 beschrieben. Die Abbildung zeigt einen Lösungsansatz für die Längsführung bei der einfachen Aufgabe ‘Fahren in der Spur’, der im Versuchsfahrzeug VaMP (Abschnitt 7.1.1) bis 1998 eingesetzt wurde (Maurer & Dickmanns 1997a). Die Aktivitäten von VC sind auf der hardware-spezifischen Ebene und der 4D-Ebene angesiedelt. Regler, die in der Darstellung nach Abbildung 5.2 übereinander angeordnet sind, arbeiten als Kaskadenregler.

In den folgenden Abschnitten werden die Merkmale von Kreisschließungen auf der hardware-spezifischen und auf der 4D-Ebene beschrieben. Auf der regelbasierten Ebene werden spezielle Konfigurationen von Regelkreisen als Verhaltensmodi betrachtet. Ermöglicht man eine Änderung der Konfigurationen zur Laufzeit, hat man eine Grundlage für das Erzeugen strukturell neuer Verhaltensmodi geschaffen.

Hochfrequente Regelkreise auf der hardware-spezifischen Ebene

Auf der hardware-spezifischen Ebene werden hochfrequente, schnelle Regelkreise realisiert. Abbildung 5.3 zeigt einen Ausschnitt aus der funktionalen Systemarchitektur (Abbildung 3.5), auf dem die Kreisschließung auf der hardware-spezifischen Ebene deutlich wird. Meßgrößen werden von konventionellen oder Inertialsensoren erfaßt und gefiltert. Die Regeldifferenz mit von höheren Ebenen vorgegebenen Führungsgrößen ist Eingangssignal eines Reglers, der Stellgrößen für die Aktuatoren errechnet. Am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik der UniBwM wird nicht, wie bei anderen Ansätzen (z.B. Pomerleau 1995), direkt auf Merkmalsgruppen im Bild geregelt, sondern nur auf die Zustandsgrößen erkannter physikalischer Objekte auf der 4D-Ebene.

Die Regelstrecken auf der hardware-spezifischen Ebene sind zumeist stark nichtlinear, so daß sie keine lokale Linearisierung erlauben. Dies liegt zum einen daran, daß die physikalischen Phänomene oft stark nichtlinear sind wie etwa das System ‘Reifen-Fahrbahn’, zum anderen wird im Automobil aus Kostengründen oft auf preisgünstige Stellglieder zurückgegriffen. Für diese Strecken lassen sich physikalische Modelle nur mit sehr viel Aufwand erstellen. Oft variieren die Modellparameter stark abhängig von Umweltbedingungen (System ‘Reifen-Fahrbahn’, ‘Bremsdruck im Bremskraftverstärker’).

Zur Regelung werden daher nichtlineare Regler oder Regler mit umschaltbaren Parametersätzen eingesetzt. Da sich durch die Verringerung der Abtastzeit auch die Zeit verringert, in der interne wie externe Störgrößen unkorrigiert auf die Regelstrecke einwirken, wählt man auf der hardware-spezifischen Ebene Zykluszeiten, die eine oder mehrere Größenordnungen kleiner sind als die Zeitkonstanten der zu regelnden Strecke. Bei Automobilanwendungen liegen die realisierten Zykluszeiten derzeit zwischen 1ms und 5ms.

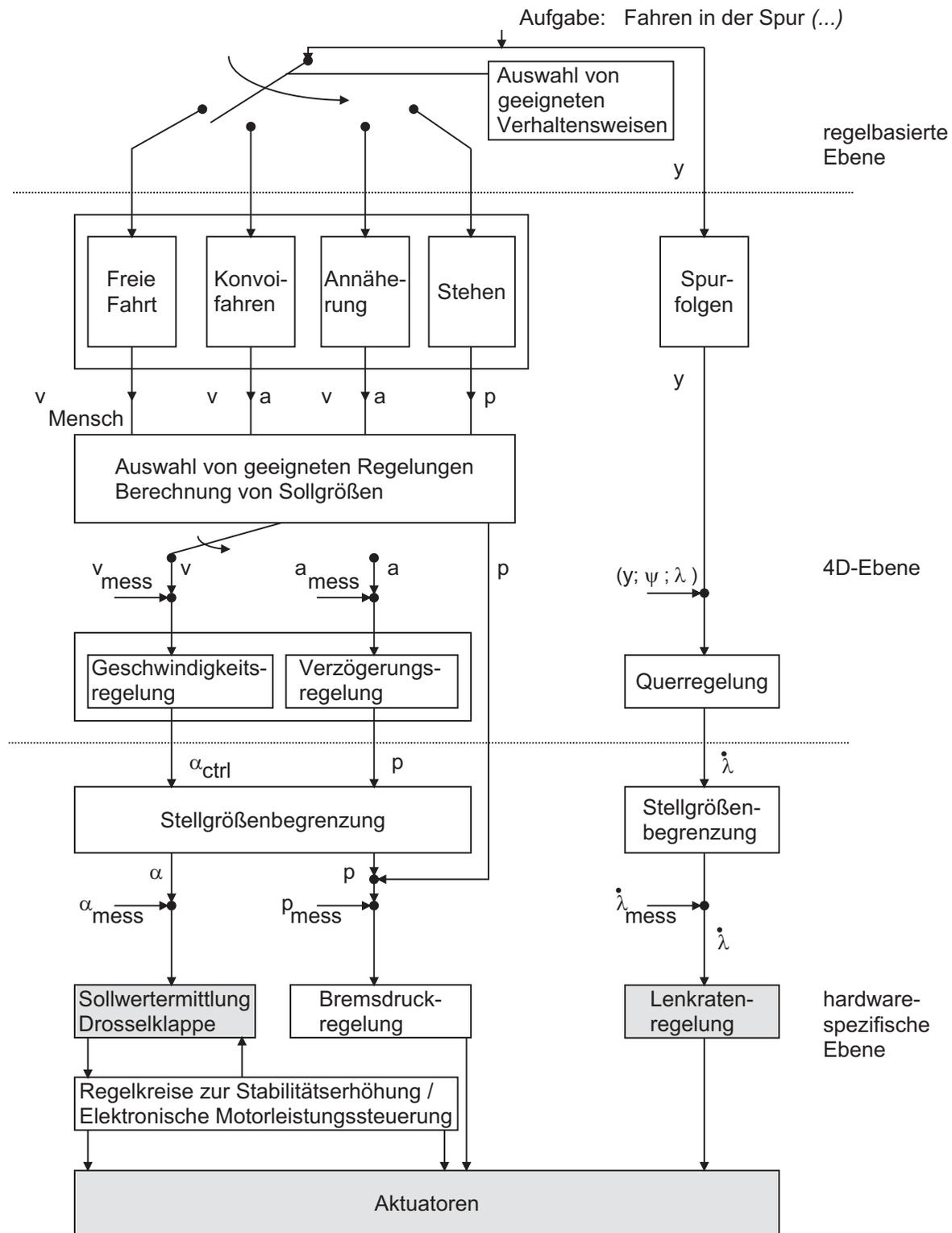


Abbildung 5.2: Hierarchischer Aufbau der Fahrzeugführung. Beispielkonfiguration für die Aufgabe 'Fahren in der Spur' auf der Autobahn; die grau unterlegten Aufgaben wurden von Daimler-Benz, die anderen im Rahmen dieser Arbeit gelöst. a : Verzögerung, v : Geschwindigkeit, p : Druck im Bremskraftverstärker, α : Drosselklappenwinkel, y : Ablage von der Fahrbahnmitte, ψ : Gierwinkel, λ : Lenkwinkel

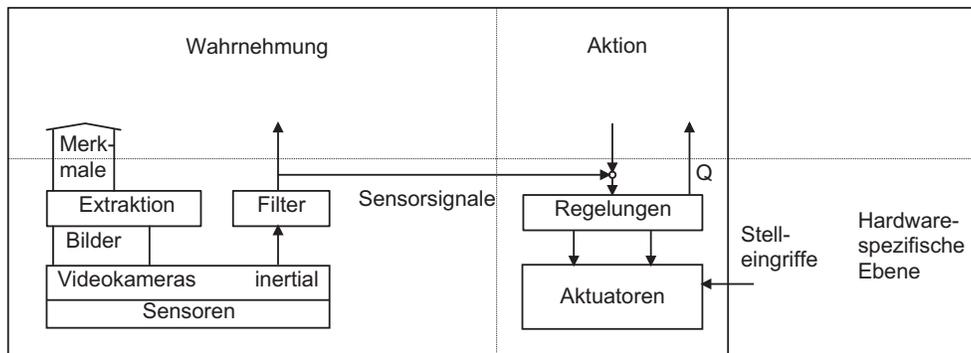


Abbildung 5.3: Regelkreise auf der hardware-spezifischen Ebene; Q : Qualitätsmaß.

Viele Regelkreise auf der hardware-spezifischen Ebene werden im Kraftfahrzeug bereits in Serie gefertigt: Dazu gehören zum einen Regelkreise zur Erhöhung der Fahrzeugstabilität wie etwa das Antiblockiersystem (ABS) oder die Antriebsschlupfregelung (ASR), zum anderen Steuerungen für elektronische Stellglieder wie etwa die elektronische Motorleistungssteuerung (EGas, Bosch 1995). Nicht übersehen sollte man, daß auf dieser Ebene die Kontrolle für bestimmte Stelleingriffe bereits ganz der Maschine übertragen wurden (Choke (Luftklappe im Vergaser), Automatikgetriebe).

Auf der hardware-spezifischen Ebene sollen die fahrzeugspezifischen Eigenheiten soweit nivelliert werden, daß sie auf den übergeordneten Ebenen nur noch in Form von Parametern und nicht mehr strukturell berücksichtigt werden müssen.

Realisierung von Verhaltensmodi auf der 4D-Ebene

Der 4D-Ansatz entstand durch die Einführung rekursiver Schätzverfahren in die Bildverarbeitung und ist daher ein von Grund auf regelungstechnischer Ansatz, der für die Kreisschließung besonders geeignet ist. Abbildung 5.4 zeigt die Kreisschließung auf der 4D-Ebene, die der Kreisschließung auf der hardware-spezifischen Ebene überlagert wird: Aufgrund von geschätzten Zuständen wird das Fahrzeug auf einer Solltrajektorie geführt.

Das Schema für modellbasierte Steuerungen und Regelungen auf der 4D-Ebene ist in Abbildung 5.5 skizziert; es schließt eine Vorsteuerungskomponente, einen Generator für Solltrajektorien, einen Regler und einen Zustandsschätzer ein. Die Vorsteuerungskomponente wird eingesetzt, um stereotypes Verhalten wie etwa den Spurwechsel zu realisieren. Bei Bedarf können mehrere Vorsteuerungskomponenten überlagert werden. In quasistationären Zuständen kann auf die Vorsteuerung verzichtet werden. Die Generierung von Solltrajektorien ist dagegen obligatorisch, auch wenn sie bei manchen Aufgaben nicht offensichtlich ist: Beim 'Spurhalten' ist die Solltrajektorie durch die Skelettlinie in der Fahrbahnmitte vorgegeben.

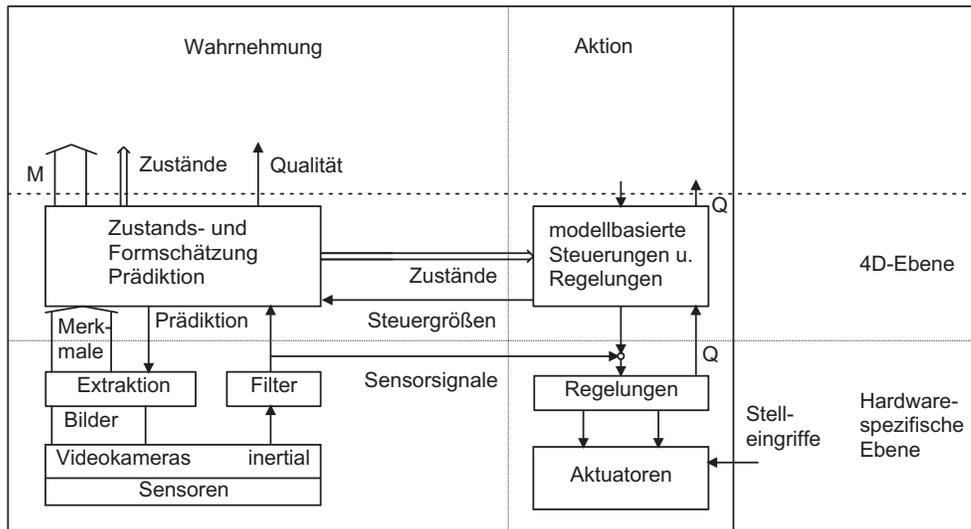


Abbildung 5.4: Überlagerung der Regelkreise auf der hardware-spezifischen und auf der 4D-Ebene; Q : Qualitätsmaß; M : Merkmale

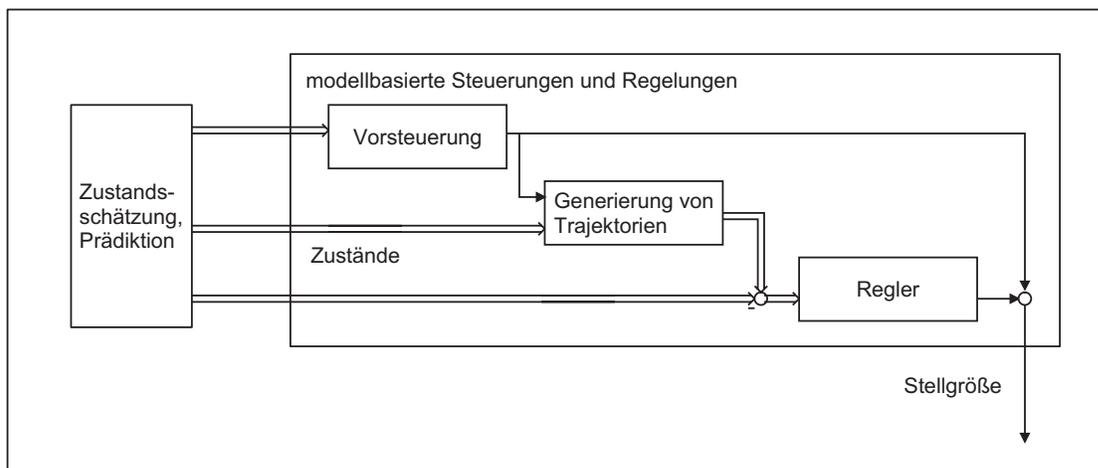


Abbildung 5.5: Schema für modellbasierte Steuerungen und Regelungen auf der 4D-Ebene

Eine Trajektorie ist nur hinsichtlich eines Bezugsobjektes definiert. Dies ist vor allem beim Umschalten zwischen verschiedenen Regelschemata zu berücksichtigen, da sich dabei die Bezugsobjekte ändern können. Obligatorisch im Regelschema ist der Regler, der das Fahrzeug auch bei nicht modellierten Störungen auf der Trajektorie hält. Zur Ausregelung von längerandauernden Störeinflüssen und stationären Fehlern können Zustandsregler um einen Integralanteil, eine Störgrößenaufschaltung oder bei strukturell bekannten Störungen einen Störbeobachter erweitert werden (z.B. Föllinger 1994). Auf der 4D-Ebene wurde eine einheitliche Zykluszeit von 40 ms realisiert, die Zeit, in der nach der PAL-Norm genau ein Bild eingelesen werden kann. Mit anderen Fernschnormen oder digitalen Kameras sind auch schnellere Zykluszeiten denkbar.

In Abschnitt 5.3 wird das Regelschema zur automatischen Querführung auf der Autobahn eingesetzt. Mit dem Schema lassen sich elementare Verhaltensmodi elegant und robust realisieren. Ein ‘Verhaltensmodus’ (oder auch ‘Verhaltensweise’ genannt) ist damit die integrale Darstellung regelungstechnischer Realisierungen (im Sinne von Dickmanns 1995a).

Formalisierung von Verhaltensweisen auf der regelbasierten Ebene

Ordnet man genau eine Verhaltensweise dem Zustand eines Automaten zu, so erhält man einen einfachen Mechanismus zur Auswahl von Verhaltensweisen: Sind die Übergangsbedingungen in einen Zustand erfüllt, so wird dieser angenommen und die zugeordnete Verhaltensweise realisiert.

Die Ankopplung der regelbasierten Ebene an die 4D-Ebene wird in Abbildung 5.6 illustriert: Die Abbildung zeigt einen einfachen Automaten für die Längsführung auf der Autobahn, der von 1996 bis 1998 im Versuchsfahrzeug VaMP eingesetzt wurde (Maurer & Dickmanns 1997a). Den Zuständen des Automaten zur Längsführung ‘Abstand halten’, ‘Annähern’, ‘Frei Fahren’ und ‘Stehen’ sind die Steuerungsaktivitäten ‘Abstandsregler’, ‘Vorsteuerung zur Annäherung’, ‘Regelung für konstante Geschwindigkeit’ und ‘Steuerung für konstanten Druck’ zugeordnet. Das sogenannte ‘symbol grounding’-Problem ist hier einfach und elegant gelöst (vgl. Abschnitt 4.1.4).

Die Automaten werden bewußt einfach gehalten. Die Komplexität des Problems wird durch die getrennte Betrachtung von Quer- und Längsführung reduziert. Für jede Aufgabe wird mindestens ein eigener Automat für die Quer- und Längsführung realisiert. Abhängig von der Domäne, den aktuellen Umweltbedingungen oder der eigenen Leistungsfähigkeit kann ein anderer Automat besser geeignet sein. Hierarchisch angeordnete Automaten, sogenannte Zustandskarten (‘statecharts’, Harel 1987, Abschnitt 4.1.3) bieten eine Methodik an, um auch große, komplexe Systeme zu strukturieren. Der Einsatz von Zustandskarten wird am Beispiel der Längsführung in Abschnitt 6.2.4 erläutert.

Die auf der 4D-Ebene und der regelbasierten Ebene realisierten Lösungen sind strukturell fahrzeugunabhängig und werden nur durch Parameter an das jeweilige Fahrzeug angepaßt.

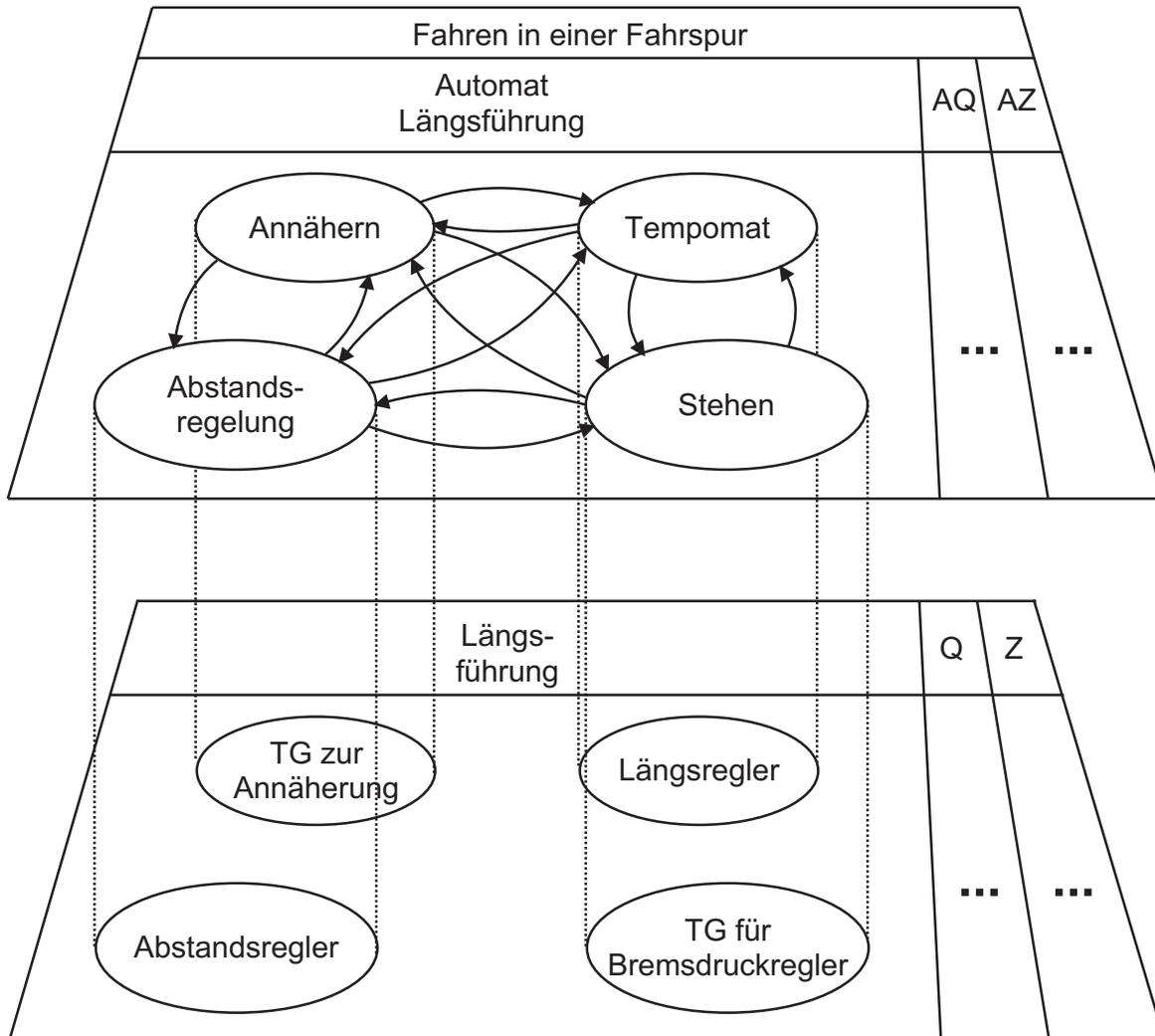


Abbildung 5.6: Ankopplung der 4D-Ebene an die regelbasierte Ebene am Beispiel der Aufgabe 'Fahren in der Fahrspur'. AQ: Automat für die Querführung, AZ: Automaten für zusätzliche Aktuatoren (Blickrichtungssteuerung, Blinker, ...), TG: Trajektoriengenerierung, Q: Querführung, Z: Zusätzliche Aktuatoren

5.1.3 Flexible Struktur zur Generierung von Verhalten

Zwei weitere Konzepte wurden realisiert, um eine möglichst flexible Struktur zur Generierung von Verhalten zu erhalten. So wird erst zur Laufzeit ein Regler aus einer Menge von Reglern ausgewählt. Eine feste Kopplung von Reglern an bestimmte Verhaltensweisen ist möglich, aber nicht notwendig. So kann beispielsweise abhängig von den gerade gemessenen Totzeiten ein passender Querregler ausgewählt werden.

Auch die Hierarchie der Regler ist zur Laufzeit frei konfigurierbar. Abb 5.2 zeigt eine mögliche Form der Hierarchie, die in früheren Systemen fest verdrahtet war (Abschnitte 7.2.1 und 7.2.2). Die daraus resultierenden Einschränkungen wurden im jüngsten Fahrzeugführungssystem (Abschnitt 7.2.3) aufgehoben.

Die flexible Struktur entstand zunächst zur Identifikation von einzelnen Strecken im System, die möglichst komfortabel angeregt werden sollten (Abschnitt 4.1.3). Diese Anregung zur Systemidentifikation kann entweder von einem externen Nutzer oder vom System selbst gesteuert werden. Die Reglerkonfiguration kann abhängig von den Umweltbedingungen, der Domäne und den Zielen ausgewählt werden. Langfristig könnte die flexible Struktur zum systematischen Vergleich und zur Optimierung verschiedener Konfigurationen eingesetzt werden. Alternative Handlungsstrategien bei Ausfall von Sensoren könnten erprobt werden.

5.2 Überwachung der Regelkreise zur Laufzeit

In einer sicherheitskritischen Anwendung wie dem automatischen Fahren auf öffentlichen Straßen sollten die automatisierten Fahrfunktionen ständig überprüft werden. Als Maße für die Güte eines Regelkreises werden verschiedene Kriterien ausgewertet. Der Wertebereich, in dem die Qualitätsmaße für einen Regelkreis liegen dürfen, soll anwendungsspezifisch abgeleitet werden. In diesem Abschnitt werden zunächst Anforderungen an Regelkreise zusammengefaßt und einige mögliche Gütemaße vorgestellt. In den Abschnitten 5.3 und 5.4 wird am Beispiel der Quer- und Längsführung gezeigt, wie die Anforderungen aus der Aufgabenstellung und dem Vergleich mit einem geübten, aufmerksamen menschlichen Fahrer abgeleitet werden können. Fahrfunktionen werden nur so lange automatisch ausgeführt, wie die Qualitätsmaße den Anforderungen entsprechen.

5.2.1 Anforderungen an Regelkreise

In der Regelungstechnik werden an einen Regelkreis verschiedene Anforderungen gestellt, die erfüllt werden müssen. Der Regelkreis muß zunächst **stabil** sein. Die Forderung klingt trivial, wird aber in der betrachteten Anwendung immer dann verletzt, wenn ein Fahrzeug unbeabsichtigt die Fahrbahn verläßt. Probleme bereiten menschlichen Fahrern dabei Parameter, die stark schwanken können, wie etwa der Haftkoeffizient zwischen Reifen und Fahrbahn oder nicht modellierte Störungen wie Seitenwind.

Werden die Totzeiten im geschlossenen Kreis zu groß, werden manuell und automatisch geführte Fahrzeuge instabil. Beim Fahrer wird die erhöhte Totzeit häufig durch Müdigkeit oder Drogen hervorgerufen, in technischen Realisierungen kann sie dann auftreten, wenn Echtzeitbedingungen verletzt werden. Eines der in dieser Arbeit eingesetzten Systeme basiert auf WindowsNT, das als Betriebssystem Echtzeitverhalten nicht unterstützt (Abschnitt 7.2.3). In diesem System wird auf die Totzeiten besonders zu achten sein.

Die **stationäre Genauigkeit** muß den Anforderungen genügen: In einem Zeitfenster soll eine bestimmte (z.B. quadratische) Regelabweichung nicht überschritten werden. Diese Forderung läßt sich gut mit den in diesem Abschnitt formulierten integralen Maßen quantifizieren. Der Regelkreis muß **genügend gedämpft** sein, aber **hinreichend schnell** einschwingen. Dazu wird das Einschwingverhalten der Regelkreise mittels der anschließend formulierten Gütemaße untersucht.

Vorgegebene **Maximalwerte für die Stellgrößen und für die auftretenden Beschleunigungen** dürfen im System nicht überschritten werden. Die Stellgrößen werden direkt entsprechend begrenzt, die Beschleunigungen werden ständig mit den vorgegebenen Maximalwerten verglichen und wenn möglich durch aktiven Eingriff verringert.

Aus Komfortgründen können zu den genannten Anforderungen weitere hinzukommen: Regler sollen Störungen 'ruhig' ausregeln. Um diese verbale Beschreibung zu quantifizieren, wird ein zusätzliches Integralmaß eingeführt.

Nicht erfaßt wurden bisher Phänomene, die beim Umschalten zwischen verschiedenen Regelkreisen auftreten. Bei Reglern, die nur zeitweise eingeschaltet werden, interessieren die durchschnittliche und die minimale Aktivierungszeit. Wird eine Statistik über die Aktivierungszeiten geführt, können Probleme beim Schalten der Automaten entdeckt werden.

5.2.2 Einschwingverhalten eines Regelkreises

Bei sprungförmiger Anregung kann das Zeitverhalten des (linearisierten) Regelkreises durch folgende Begriffe charakterisiert werden (vgl. z.B. Unbehauen 1994, S. 224f):

- maximale Überschwingweite: Betrag der Regelabweichung nach dem erstmaligen Erreichen des Sollwertes,
- Anregelzeit: Zeitpunkt, zu dem der Sollwert erstmalig erreicht wird,
- Ausregelzeit: Zeitpunkt, zu dem der Betrag der Regelabweichung kleiner ist als eine vorgegebene Schranke.

Für die maximale Überschwingweite und die Ausregelzeit gibt es häufig klare Vorgaben: Ein Verzögerungsregler sollte innerhalb einer vorgegebenen Zeit eingeschwungen sein; die Abstandsregelung zu einem Vorderfahrzeug darf nur innerhalb vorgegebener Grenzen überschwingen.

5.2.3 Integralkriterien

Integrale Gütekriterien sind unempfindlich gegen mittelwertfreies Rauschen und einfach zu handhaben. Für jeden Regelkreis werden folgende Integralkriterien zur Laufzeit berechnet und entsprechend der Aufgabenstellung ausgewertet.

Die Integrale über den Betrag der Regelabweichung $e(k)$ in einem Zeitfenster $T = N \cdot k$

$$I_{EB}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |e(k-i)| \quad (5.1)$$

und über das Quadrat der Regelabweichung $e(k)$, das große Regelabweichungen stärker gewichtet

$$I_{EQ}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} e(k-i)^2, \quad (5.2)$$

sind Maße dafür, ob die Regelabweichungen über ein Zeitfenster hinreichend klein sind.

Das Integral über das Quadrat der Stellgröße $u(k)$ in einem Zeitfenster T ist ein Maß für den Stellaufwand:

$$I_{SB}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u(k-i)^2. \quad (5.3)$$

Um zu entscheiden, ob der Regler 'ruhig' genug arbeitet - eine Forderung, die zum Beispiel beim Geschwindigkeitsregler erhoben wird - werden Integrale über den Absolutbetrag und das Quadrat der Differenz aufeinander folgender Stellgrößen berechnet:

$$I_{SQ}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (u(k-i) - u(k-i-1))^2. \quad (5.4)$$

Die Berechnung und Auswertung der Integrale über die Regelabweichungen ist nur im eingeschwungenen Zustand sinnvoll, wenn die Ausregelzeit erreicht wurde. Die Integrale über die Stellgröße beim Einschwingen sind mit denen im eingeschwungenen Zustand im allgemeinen nicht vergleichbar. Es kann jedoch sinnvoll sein, für beide Phasen Schranken für die Integralwerte zu definieren.

Zu Beginn der Auswertung werden die Zeitfolgen mit Nullen vorbesetzt. Dadurch wirken sich einzelne große Abweichungen - etwa zum Zeitpunkt der Ausregelzeit - nicht ohne Mittelung auf den Integralwert aus. Eine symmetrische Ergänzung der Zeitfolge, wie sie etwa bei Faltungen im Bildbereich vorgenommen wird (z.B. Maurer 1993, S. 104f), wäre mit einer Verletzung der Echtzeitbedingungen verbunden und bringt damit

bei der Berechnung von Gütemaßen keine Vorteile. Wie die Größe des Zeitfensters T im Verhältnis zu den Zeitkonstanten der unregelten und der geregelten Strecke stehen sollte, wird experimentell festgelegt.

Bei Zustandsreglern sind die Skalare in den vorangegangenen Gleichungen entsprechend durch Vektoren zu ersetzen. In Systemen höherer Ordnung wird man den Rechenaufwand dadurch beschränken, daß man sich auf die Auswertung besonders kritischer oder aussagekräftiger Stellgrößen und Zustandsgrößen beschränkt.

5.3 Fahrzeugunabhängige Auslegung der automatischen Querführung

Als Beispiel für die Regelung auf der 4D-Ebene wird die automatische Querführung diskutiert. Diese Anwendung ist dafür besonders geeignet, da es für symmetrische Spurwechselkommandos analytische Lösungen gibt. Neu gegenüber den Arbeiten von Zapp (1988) und Brüdigam (1994) sind die systematische Formulierung des Ansatzes und Details bei der Auslegung von Regelung und Vorsteuerungen. Dazu gehört die Berücksichtigung des Integralanteils bei der Polfestlegung, der Verzicht auf eine symbolische Lösung, der es auch ermöglicht, kompliziertere Modelle zu verwenden, und die Möglichkeiten zur Selbstdiagnose.

Die automatische Querführung ist eine sicherheitskritische Anwendung, bei der dem Fahrer nur wenig Zeit bleibt, Fehler des Systems zu korrigieren. Im zivilen Bereich wird die Automatisierung daher skeptisch gesehen. Ein möglicher Ausweg wäre es, im Rahmen der flexiblen Automatisierung die Querführung nur dann maschinell auszuführen, wenn dies sicher möglich ist. Dazu muß die Güte der Querführung mit einer vorgegebenen Spezifikation verglichen werden. Im Fehlerfall ist in einen sicheren Zustand zu schalten. Ist der sichere Zustand die manuelle Fahrt, so ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle im allgemeinen und der Degradationsmechanismus im speziellen so zu gestalten, daß der Fahrer nicht überfordert wird. Einen alternativen Weg, das Risiko bei der automatischen Querführung zu begrenzen, schlagen Franke et al. (1994) und Donges & Naab (1996) vor: Bei einem Assistenzsystem zum Spurhalten und zum Spurwechsel wird das maschinell stellbare Lenkmoment so begrenzt, daß der Fahrer durch hochfrequente automatische Korrekturen unterstützt wird, aber weiterhin lenken muß.

5.3.1 Automatische Querführung auf der 4D-Ebene

Die Kreisschließung auf der 4D-Ebene, die in Abschnitt 5.1.2 prinzipiell erläutert wurde, wird in diesem Abschnitt anhand der automatischen Querführung auf der Autobahn demonstriert. Auf der Autobahn müssen für die Querführung die Verhaltensmodi 'Spurhalten' und 'Spurwechsel' generiert werden.

Das Regelement enthält dazu, wie in Abbildung 5.5 gezeigt, einen Zustandsschätzer, einen Generator für Trajektorien, einen Zustandsregler und optional eine Vorsteuerkomponente.

Dynamisches Modell der automatischen Querführung

Grundlage in allen Komponenten des Regelementes ist die Kenntnis des dynamischen Modells, das je nach Anwendungsbereich als Modell 3. Ordnung

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{v}{a} & 0 & 0 \\ \frac{v}{2} - \frac{m \cdot v^3}{2 * c_{\alpha} \cdot a} & v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\lambda} + \begin{bmatrix} 0 \\ -v \\ 0 \end{bmatrix} c_0. \quad (5.5)$$

oder als Modell 5. Ordnung

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\psi}_{abs} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\psi}_{rel} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v}{T_{\psi} \cdot a} & (-\frac{1}{T_{\psi}}) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2 \cdot T_{\beta}} & -1 & (-\frac{1}{T_{\beta}}) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v & v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \psi_{abs} \\ \beta \\ \psi_{rel} \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\lambda} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -v \\ 0 \end{bmatrix} c_0. \quad (5.6)$$

mit $T_{\beta} = \frac{m \cdot v}{2 \cdot c_{\alpha}}$ und $T_{\psi} = \frac{2 \cdot v \cdot I_z}{c_{\alpha} \cdot a^2}$ angegeben wird (s. Brüdigam 1994).¹ Im Element $a_{31} = \frac{v}{2} - \frac{m \cdot v^3}{2 * c_{\alpha} \cdot a}$ der kontinuierlichen Systemmatrix des Modells 3. Ordnung (Gleichung 5.5) erkennt man, daß bei der Geschwindigkeit

$$v_{krit} = \sqrt{\frac{c_{\alpha} \cdot a}{m}} \quad (5.7)$$

ein Vorzeichenwechsel auftritt. Bei Geschwindigkeiten $v > v_{krit}$ ist das Modell 3. Ordnung zur Prädiktion der Zustandsgrößen daher nicht geeignet (vgl. Schädlich 1998).

Im realen System treten zusätzlich Totzeiten auf, die in einem diskreten, linearen System leicht zu modellieren sind. Durch Diskretisierung der Gleichung 5.6 erhält man für gerade Strecken das diskrete, lineare System

$$x_{k+1} = \Phi_k \cdot x_k + h \cdot u_k. \quad (5.8)$$

¹Dabei ist λ der Fahrzeuglenkwinkel, ψ der Gierwinkel, β der Schwimmwinkel, y die Ablage von der Fahrspurmitte, v die Geschwindigkeit, a der Achsabstand, m die Fahrzeugmasse, I_z das Trägheitsmoment um die Hochachse und c_{α} der Reifenseitenkraftbeiwert. Die Koordinatensysteme orientieren sich an der Luftfahrtnorm LN9300 und sind bei Siedersberger (1999b) ausführlich beschrieben.

Sollen m Totzeiten betrachtet werden, so erweitert man den Zustandsvektor um m vergangene Werte des Steuervektors und erhält

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ u_{k-(m-1)} \\ \vdots \\ u_k \end{bmatrix} = \Phi_k^m \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-m} \\ \vdots \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_k. \quad (5.9)$$

Die diskrete Systemmatrix Φ_k^m berechnet sich rekursiv aus der Systemmatrix Φ_k^1 für eine Totzeit

$$\Phi_k^1 = \begin{bmatrix} \Phi_k & h \\ 0 \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

und aus der Systemmatrix Φ_k^{m-1} für $m-1$ Totzeiten zu

$$\Phi_k^m = \begin{bmatrix} & 0 \\ \Phi_k^{m-1} & \vdots \\ & 1 \\ 0 \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$

Werden in einem Regelkreis Inertialsensoren und Rechnersehen zur Erfassung des Zustands eingesetzt, so treten bei der Kreisschließung wegen der unterschiedlichen Komplexität der Wahrnehmung unterschiedliche Totzeiten auf. Diese können ebenfalls direkt bei der Kreisschließung berücksichtigt werden.

Zunächst wird angenommen, daß die Zustände in Kreis 1 unverzögert, die Zustände in Kreis 2 erst nach m Zyklen zur Verfügung stehen. Der Verstärkungsvektor r und der Eingangsvektor h werden für unterschiedliche Totzeiten aufgespalten in die Verstärkungsvektoren

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r_2 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

und die Eingangsvektoren

$$h = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ h_2 \end{bmatrix} = h_{e1} + h_{e2}. \quad (5.13)$$

Für den Fall von 0 Totzeiten in Kreis 1 und m Totzeiten in Kreis 2 läßt sich die Zustandsgleichung analog zu Gleichung 5.9 angeben:

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ u_{k-(m-1)} \\ \vdots \\ u_k \end{bmatrix} = \Phi_k^{0m} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-m} \\ \vdots \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{e1} \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_k. \quad (5.14)$$

Für m Totzeiten berechnet sich die diskrete Systemmatrix Φ_k^{0m} rekursiv aus der Systemmatrix für eine Totzeit

$$\Phi_k^{01} = \begin{bmatrix} \Phi_k & h_{e2} \\ 0 \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

und aus der Systemmatrix $\Phi_k^{0(m-1)}$ für $m - 1$ Totzeiten

$$\Phi_k^{0m} = \begin{bmatrix} & 0 \\ \Phi_k^{0(m-1)} & \vdots \\ & 1 \\ 0 \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.16)$$

Treten in Kreis 1 n Totzeiten, in Kreis 2 m Totzeiten auf mit $m > n$, so erhält man die diskrete Systemgleichung zunächst ohne Berücksichtigung der n Totzeiten:

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ u_{k-(m-1)} \\ \vdots \\ u_k \end{bmatrix} = \Phi_k^{0m} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-m} \\ \vdots \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_k. \quad (5.17)$$

Durch Ersetzen der Elemente 1 bis q der $(1 + q + m - n)$ ten Spalte der diskreten Systemmatrix Φ_k^{0m} nach Gleichung 5.16 durch den Eingangsvektor h_{e1} erhält man die Zustandsgleichung für n Totzeiten in Kreis 1 und m Totzeiten in Kreis 2 mit $m > n$, wobei q die Ordnung des Systems ohne Totzeiten ist.

Als Beispiel sei die diskrete Systemgleichung für $m = 3$ und $n = 2$ angegeben:

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ u_{k-2} \\ u_{k-1} \\ u_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_k & h_{e2} & h_{e1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-3} \\ u_{k-2} \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_k. \quad (5.18)$$

Eine detaillierte Herleitung ist in Maurer & Siedersberger (2000) angegeben.² Auf eine symbolische Berechnung der diskreten Zustandsgleichung wird in dieser Arbeit bewußt verzichtet, da diese unübersichtlich und fehleranfällig ist (s. Brüdigam 1994, S. 132).

²Von einer ähnlichen Form, die Ackermann (1988) (S. 437) angibt, unterscheidet sich diese Darstellung durch die rekursive Formulierung. Damit ist der Ansatz für beliebige Totzeiten einfach zu implementieren.

Regelement zur Querführung

Die Eigenlage relativ zur Fahrbahn, die horizontale und die vertikale Krümmung werden im Modul *Road Detection and Tracking* geschätzt (Abbildung 3.6, Behringer 1996). Die Schätzung des Eigenzustands erfolgt relativ zur Fahrbahnmitte. Soll das Fahrzeug beim ‘Spurfahren’ in der Fahrbahnmitte fahren, so ist in diesem Sonderfall die Solltrajektorie bereits gegeben.

Der Regelkreis wird mit einem Zustandsregler basierend auf dem Modell dritter oder fünfter Ordnung mit Polvorgabe geschlossen (Zapp 1988 und Brüdigam 1994). Totzeiten können mit den Gleichungen 5.9 und 5.17 bereits im dynamischen Modell berücksichtigt werden.

Die Pole werden für das kontinuierliche System vorgegeben und dann in Pole des diskreten Systems umgerechnet. Die dreifache Polstelle des offenen Kreises bei Null wird geschwindigkeitsabhängig in die linke Halbebene verschoben; Pole, die abklingenden Eigenbewegungen entsprechen, werden nicht verschoben.

Bisher wurde davon ausgegangen, daß auf die Zustandsregelung zwar eine Anfangsstörung wirkt, aber keine länger dauernde Störgröße. Bei der Querführung in der realen Welt treten eine Vielzahl von Störgrößen auf, etwa durch Modellierungsfehler, böigen Seitenwind, hängende Fahrbahn oder Schlaglöcher, die in ihrer Gesamtheit kaum systematisch zu beschreiben sind. Diese sollen durch die Einführung eines integralen Anteils ausgeregelt werden. Anders als bei Brüdigam (1994) (S. 64), der ebenfalls einen Integralanteil in die Regelstruktur einführt, wird der Integralanteil bei der Berechnung des Verstärkungsvektors berücksichtigt.

Zunächst wird Gleichung 5.8 für das System 5. Ordnung aufgestellt. Führt man die Abweichung e der Regelgröße y von der Führungsgröße w zur Integration zurück, so kann man die erweiterte, diskrete Zustandsraumdarstellung (z.B. nach Unbehauen 1995, S. 345ff) angeben zu

$$x_{I,k+1} = \Phi_{I,k} \cdot x_{I,k} + h_I \cdot u_k \quad (5.19)$$

mit

$$\Phi_{I,k} = \begin{bmatrix} \Phi_k & 0 \\ c & 1 \end{bmatrix},$$

$$h_I = \begin{bmatrix} h \\ 0 \end{bmatrix}$$

und

$$x_{I,k} = \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix}.$$

Die Gleichung für den erweiterten Regler lautet

$$u = -[K, -K_I] \cdot \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix}. \quad (5.20)$$

Sollen nun m Totzeiten berücksichtigt werden, so müssen in Gleichung 5.9 Φ_k , h und x_k durch $\Phi_{I,k}$, h_I und $x_{I,k}$ ersetzt werden.

Für den Verhaltensmodus ‘Spurfahren’ hat Brüdigam (1994) (S. 63) eine Vorsteuerung für Straßenkrümmungen berechnet, die für den Fall der stationären Kurvenfahrt mit der Krümmung c_0 die Sollgrößen für den Zustandsregler vorgibt:

$$w = \begin{bmatrix} \lambda_W \\ \dot{\psi}_W \\ \beta_W \\ \psi_W \\ y_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 \cdot a \\ c_0 \cdot v \\ c_0 \cdot (a - m \cdot v^2 / c_\alpha) / 2 \\ -c_0 \cdot (a - m \cdot v^2 / c_\alpha) / 2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5.21)$$

Eine Vorsteuerung für den ‘Spurwechsel’, die basierend auf einem Modell dritter Ordnung für den Einsatz in LKW entwickelt wurde (Brüdigam 1994, S. 82ff), wurde auch im PKW bei Geschwindigkeiten bis zu 140 km/h erfolgreich getestet. Spurwechsel bei höheren Geschwindigkeiten sind mit einem erweiterten Ansatz möglich, bei dem die Querdynamik mit einem Modell 5. Ordnung berücksichtigt wird. Durch die Variation der Steuerverläufe kann das Manöver ‘Spurwechsel’ hinsichtlich verschiedener Gütekriterien (maximal auftretende Querbeschleunigung, maximal auftretende Gierrate, Stellenergie) optimiert werden (Schädlich 1997; Schädlich 1998).

5.3.2 Überwachung der automatischen Querführung

Zur Überwachung der automatischen Querführung werden Gütemaße mit dem vorab spezifizierten Parameterbereich verglichen. Liegen die Gütemaße außerhalb des gültigen Parameterbereiches, schaltet die automatische Fahrzeugführung in einen vordefinierten sicheren Zustand. Als Gütemaße stehen zunächst die Maße zur Verfügung, die in Abschnitt 5.2 vorgestellt wurden. Diese Gütemaße werden als Bestandteil jedes Reglers (s. Kapitel 4) zur Laufzeit berechnet und je nach Aufgabenstellung ausgewertet.

Die Funktionsfähigkeit bei automatischem Spurhalten ist dann gewährleistet, wenn die Ablage von der Fahrspurmitte einen gewissen Schwellwert nicht überschreitet. Um robust gegen potentielle Fehler in einzelnen Meßwerten zu sein, wird das Integral über das Quadrat der Ablage $y(k)$ ausgewertet (vgl. Gleichung 5.2)

$$I_{EQ}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(k-i)^2. \quad (5.22)$$

Verglichen mit der Längsführung ist die Querführung im Kraftfahrzeug ein Regelkreis mit relativ kleinen Zeitkonstanten. Auftretende Totzeiten, verursacht durch Kommunikation und Rechenzeit, können den Regelkreis zur Querführung instabil werden lassen. In Maurer & Siedersberger (2000) wird anhand eines Zahlenbeispiels gezeigt, bei welchen bei der Auslegung nicht berücksichtigten Totzeiten Instabilität im Versuchsfahrzeug VaMP (Abschnitt 7.1.1) zu erwarten ist. In diesem Ansatz werden die Totzeiten im geschlossenen Kreis, die aufgrund des eingesetzten Betriebssystems nicht deterministisch sind, ständig gemessen.

Neben den regelungstechnischen Gütemaßen hat in der menschlichen Querführung ein Zeitmaß besondere Bedeutung: die Zeit, die zum Erreichen der Spurbegrenzung benötigt wird ('Time-To-Line-Crossing', TLC, siehe Godthelp 1984). Diese kann mit Hilfe einfacher Modelle für die Querdynamik explizit berechnet werden (Godthelp 1984, S. 27-28). In dieser Arbeit wird die TLC durch Voraussimulation bestimmt, was die Verwendung aufwendiger Modelle gestattet. Bei der Voraussimulation wird das totzeitbehaftete Modell für die Querdynamik (Abschnitt 5.3.1), eine Näherungslösung für den Einfluß der Klothoide mit der Krümmung $c = c_0 + c_1 \cdot l_c$ auf die Ablage (s. Dickmanns & Mysliwetz 1992, S. 200)

$$y \approx c_0 \cdot \frac{l_c^2}{2} + c_1 \cdot \frac{l_c^3}{6} \quad (5.23)$$

und die effektive Fahrzeugbreite b_{eff} in der Spur (Godthelp 1984, S. 28) unter Berücksichtigung des Gierwinkels ψ

$$b_{eff} = \frac{b}{2} * \cos(\psi) + l_V * \sin(\psi) \quad (5.24)$$

eingesetzt. Die benötigte Rechenzeit für die TLC kann durch die geeignete Wahl der Schrittweite bei der Voraussimulation und durch Einführung von Näherungen in Gleichung 5.24 beschränkt werden.

5.4 Fahrzeugunabhängige Auslegung der automatischen Längsführung

Möglichkeiten zur Automatisierung der Längsführung im Kraftfahrzeug werden laut Fenton (1970) seit Ende der fünfziger Jahre untersucht. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen hat es über vierzig Jahre gedauert, bis erste Systeme als 'adaptive Tempomaten' ('adaptive cruise control', ACC)³ in den Markt eingeführt werden konnten (ika 1999).

³Produktname bei Daimler-Chrysler: 'Distronic'.

In dieser Arbeit wird am Beispiel der automatischen Längsführung demonstriert, wie komplexe Systeme zur flexiblen Automatisierung strukturiert werden können. Im nachfolgenden Abschnitt werden zunächst die realisierten Regler und Sollgrößengeneratoren für die Längsführung kurz vorgestellt; in Abschnitt 6.2.4 wird aus Anlaß der Markteinführung eine mögliche Realisierungsform von ACC als Beispiel diskutiert. Dabei wird die Stärke der eingesetzten Zustandskarten deutlich.

5.4.1 Realisierung der Verhaltensweisen

Geschwindigkeitsregler

Der Geschwindigkeitsregler hat die Aufgabe, geeignete Stellwinkel für die Motordrosselklappe zu errechnen, um einen vorgegebenen Geschwindigkeitssollwert zu erreichen. Die Antriebsstrecke enthält mit dem Motor, dem Getriebe und dem System Reifen-Fahrbahn starke Nichtlinearitäten. Es ist daher industrielle Praxis, den Regler im Frequenzbereich ohne explizites Modellwissen auszulegen. Der Geschwindigkeitsregler ist als PI-Regler mit zwei Parametersätzen ausgelegt, die abhängig von der Größe der Regeldifferenz umgeschaltet werden, wobei eine Hysterese ein Oszillieren der Regler vermeidet (Abbildung 5.7; Vollmar 1994; Siedersberger 1996a).

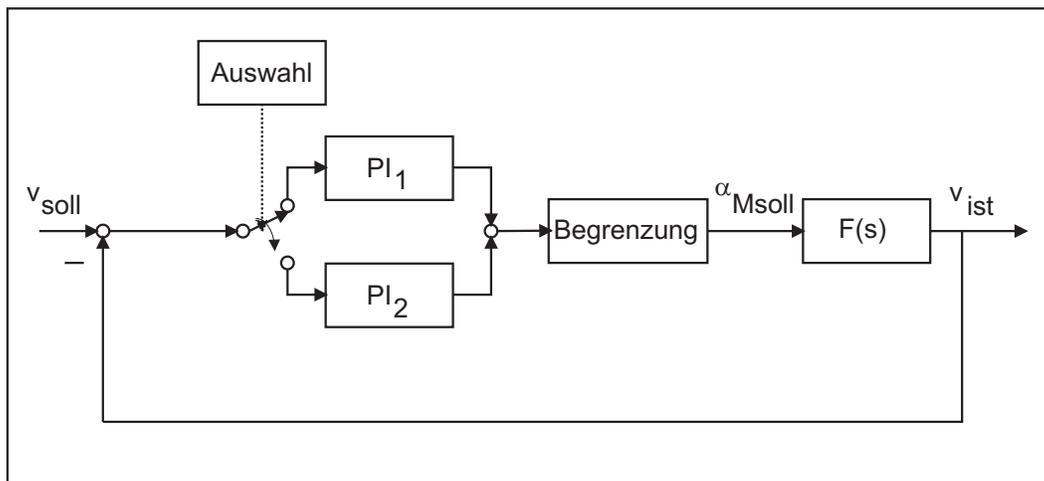


Abbildung 5.7: Blockschaltbild der Geschwindigkeitsregelung; α_{Msoll} : Sollwert der Drosselklappe; v_{soll} : Sollwert der Geschwindigkeit in x -Richtung (horizontiertes Koordinatensystem); v_{ist} : Istwert der Geschwindigkeit in x -Richtung; $F(s)$: Übertragungsfunktion der Antriebsstrecke

Der Geschwindigkeitsregler enthält zusätzlich eine nichtlineare Vorsteuerung, die die schnellere Überbrückung von größeren Geschwindigkeitsdifferenzen ermöglicht:

$$\alpha_{MV} = v_{soll} + \alpha_{Mkonst}, \quad (5.25)$$

wobei α_{MV} der zusätzliche Drosselklappenwinkel, v_{soll} die Sollgeschwindigkeit und α_{Mkonst} ein additiver konstanter Term zur Vorsteuerung ist. Dieses Vorsteuergesetz wird aktiviert, wenn gilt:

$$v_{soll} - v_{mess} > \frac{\alpha_{Mkonst} + v_{soll}}{k_p}. \quad (5.26)$$

Dabei steht v_{mess} für die gemessene Geschwindigkeit und k_p für eine Konstante. Durch diese Aktivierungsbedingung werden Sprünge in der Steuergröße bei Umschaltvorgängen zwischen der Vorsteuerung und dem Regelkreis vermieden.

Verzögerungsregler

Der Verzögerungsregler generiert aus der Regeldifferenz zwischen der Führungsgröße Verzögerung und der gemessenen Verzögerung einen Bremsdruck als Stellgröße. Ein Modell des offenen Kreises wurde mit Hilfe der experimentellen Systemidentifikation untersucht (Siedersberger 1996a). Die Strecke läßt sich mit einem ARMAX-Modell (Auto Regressive Moving Average eXtra input, Ljung 1987) beschreiben. Der Regler wurde als diskreter PI-Regler mit der Übertragungsfunktion

$$G_{Regler} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (5.27)$$

realisiert; die Koeffizienten wurden mittels Polvorgabe errechnet.⁴

Längsregler

Als Längsregler oder Tempomat⁵ wird eine Auswahlregelung entworfen, die zwischen dem Geschwindigkeitsregler, dem Verzögerungsregler und der Schubabschaltung (oder Motorbremse) umschaltet. Die Zustände des Reglers und die Übergangsbedingungen sind in Abbildung 5.8 abgebildet.

Generierung von Solltrajektorien

Bei der '(Tempomat)-Funktion hält das System eine vorgegebene Wunschgeschwindigkeit ein, soweit es die Systemgrenzen gestatten. Die Wunschgeschwindigkeit wird direkt vom Fahrer vorgegeben und vom System mit Hilfe des Längsreglers realisiert. Die Sollgrößengenerierung wird in diesem Spezialfall vom Fahrer ausgeführt.

⁴Herleitung, Realisierung und Ergebnisse sind ausführlich in Siedersberger (1996a) beschrieben.

⁵Man beachte, daß die entworfene Tempomatfunktion im Gegensatz zu vielen handelsüblichen Realisierungen auch einen Bremsengriff einschließt.

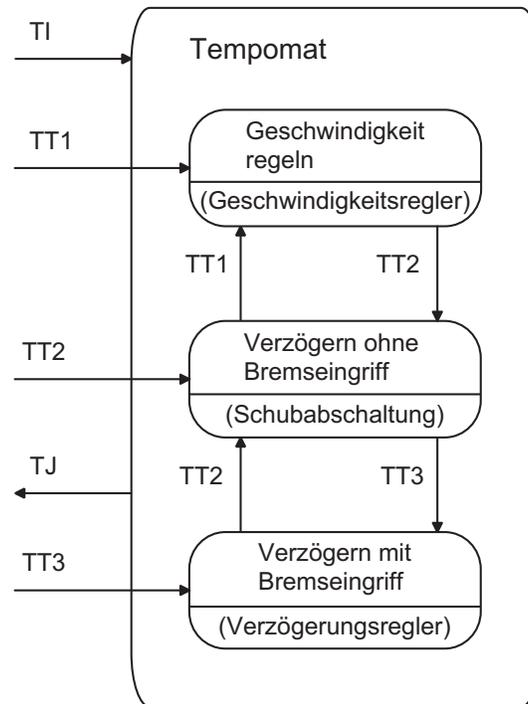


Abbildung 5.8: Zustandskarte Längsführung, Ausschnitt: Automat für den Tempomaten. Übergangsbedingungen TTN: TT1: $v_{cmd} \geq v$; TT2: $a_{cmd} < a_{Grenze}$; TT3: $\neg TT1 \wedge \neg TT2$. (a_{Grenze} wird nach Siedersberger 1996a (S. 78) festgelegt.)

Die Verhaltensweise ‘(Abstand vergrößern)’ hat die Aufgabe, den Abstand aktiv zu vergrößern, wenn Fahrzeuge, die nur geringfügig schneller fahren als das Eigenfahrzeug, vor diesem einscheren. Dazu wird ebenfalls der Längsregler und eine zusätzliche Sollgrößengenerierung eingesetzt, die die Objektgeschwindigkeit und den Abstand vom Objekt mitberücksichtigt.

Eine weitere elementare Verhaltensweise ist das ‘(Verzögern mit Bremseneingriff)’, das mit Hilfe des Verzögerungsreglers realisiert wird. Im adaptiven Tempomaten werden verschiedene Varianten eingesetzt, die sich durch die Art der Sollgrößengenerierung unterscheiden.

In der Verhaltensweise ‘(Annähern)’ wird die Sollverzögerung a_{Soll} als Funktion des Abstands d , der eigenen Geschwindigkeit v und der Objektgeschwindigkeit v_{Obj} berechnet:

$$a_{Soll} = (2 * v * v_{Obj} - v_{Obj}^2 - v^2) / (2 * d). \quad (5.28)$$

Soll das System ‘(Maximal verzögern)’, wird der maximale Druck vorgegeben, der abhängig von der aktuellen Leistungsfähigkeit des Systems automatisch gestellt werden

darf. Bei eingelegetem Gang wird die Verhaltensweise ‘(Stehen)’ durch einen konstanten Bremsdruck realisiert.

Bei der ‘(Abstandsregelung)’ wird die Sollgröße für den Längsregler von einem Abstandsregler berechnet, der in Brüdigam (1994) vorgestellt wurde. Der Abstandsregler ist als Zustandsregler mit den Zuständen Abstand und Differenzgeschwindigkeit zwischen dem vorausfahrenden und dem automatischen Fahrzeug ausgelegt. Die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs wird zusätzlich als Störgröße aufgeschaltet. Die Kreisschließung erfolgt mittels Polvorgabe. Die Herleitung und Realisierungsdetails sind in Brüdigam (1994) ausführlich dargestellt.

5.4.2 Anforderungen an die Längsregelung

Nach der Straßenverkehrszulassungsordnung muß bei Kraftfahrzeugen

„eine mittlere Verzögerung von mindestens $2.5m/s^2$ erreicht werden (...) Die vorgeschriebenen Bremsverzögerungen müssen auf ebener, trockener Straße mit gewöhnlichem Kraftaufwand bei voll belastetem Fahrzeug, erwärmten Bremstrommeln und auch bei Höchstgeschwindigkeit erreicht werden, ohne daß das Fahrzeug seine Spur verläßt (StVZO §41, zitiert nach Beck 1993, S. 227ff). “

Der gewünschte Bremsdruck sollte von der automatischen Fahrzeugführung in der Zeit aufgebaut werden, die ein geübter, aufmerksamer menschlicher Fahrer benötigt. Die Zeit vom Erkennen des Hindernisses bis zum Erreichen der gewünschten Sollverzögerung setzt sich zusammen aus der Reaktionszeit t_r , der Ansprechdauer t_a und der Schwelldauer t_s (vgl Burckardt 1991, zitiert nach Mitschke 1995):

$$t_r + t_a + t_s. \tag{5.29}$$

Die Reaktionszeit des Menschen t_r setzt sich im wesentlichen zusammen aus der Totzeit der menschlichen Informationsverarbeitung t_{mi} und der neuromuskulären Verzögerungszeit t_{nv} (Johannsen 1993, S. 212f):

$$t_r = t_{mi} + t_{nv}. \tag{5.30}$$

Die Totzeit der menschlichen Informationsverarbeitung t_{mi} , die die Erregungszeit der Sensoren, die Übertragungszeiten auf den Nervenbahnen und die zentralnervösen Verarbeitungszeiten umfaßt, liegt nach Johannsen (1993) (S. 212f) zwischen $0.1s$ und $0.2s$:

$$t_{mi} \in [0.1s, 0.2s]. \tag{5.31}$$

Tabelle 5.1: Werte für Reaktions-, Ansprech- und Schwelldauer bei Gefahrenbremsung (Burckardt 1991, zitiert nach Mitschke 1995)

	Werte		
	Wahrscheinlichste	2% sind schneller	98% sind schneller
Reaktionsdauer t_r in s (ohne Blickzuwendung)	0.64	0.36	0.78
Ansprechdauer t_a bei PKW in s	0.05	0.03	0.06
Schwelldauer t_s bei PKW in s	0.17	0.14	0.18

Die neuromuskuläre Verzögerungszeit t_{nv} schwankt nach der gleichen Quelle zwischen $0.1s$ und $0.6s$:

$$t_{nv} \in [0.1s, 0.6s]. \quad (5.32)$$

Damit liegt die menschliche Reaktionszeit zwischen $0.2s$ und $0.8s$:

$$t_r \in [0.2s, 0.8s]. \quad (5.33)$$

Burckhardt kommt (1991) zu ähnlichen Ergebnissen (Tabelle 5.1).

Die Ansprechzeit t_a , die zwischen dem Einsetzen der Betätigungskraft am Bremspedal und dem Einsetzen der Bremskraft verstreicht, liegt zwischen $0.03s$ und $0.06s$

$$t_a \in [0.03s, 0.06s], \quad (5.34)$$

die Schwellzeit t_s für den Aufbau des Soll-drucks im Bremskraftverstärker zwischen $0.14s$ und $0.18s$:

$$t_s \in [0.14s, 0.18s]. \quad (5.35)$$

Die Ausregelzeit des Bremsdruckreglers muß daher kleiner als die Summe aus neuromuskulärer Verzögerungszeit t_{nv} , Ansprechzeit t_a und Schwelldauer t_s sein:⁶

$$t_{\text{Druck}} = (t_{nv} + t_a + t_s) \in [0.27; 0.84]. \quad (5.36)$$

.

⁶Aus einer detaillierteren Diskussion der Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Situation bei Burckardt (1985) ergeben sich keine härteren Forderungen an die Ausregelzeit als die angegebene untere Grenze.

Kapitel 6

Situationsgerechte Verhaltensentscheidungen in sehenden Straßenfahrzeugen

Mit zunehmendem Grad der Automatisierung fällt die Maschine Entscheidungen, die heute noch vom Menschen getroffen werden. Die maschinellen Entscheidungen müssen der aktuellen Situation gerecht werden, um vom Menschen als adäquat anerkannt zu werden. Die Ansätze wurden für sehende Fahrzeuge entwickelt, die die für den Menschen geschaffene Infrastruktur wahrnehmen können. Integral berücksichtigt wurde dabei, daß selbst die leistungsfähigsten der aktuell verfügbaren Systeme zum maschinellen Sehen wegen der Komplexität der Aufgabe eine geringere Zuverlässigkeit haben als einfache Sensorsysteme (vgl. Abschnitt 1.1.1). Auf Lösungsansätze, die eine über den Stand der Technik hinausgehende Erfassung der Umwelt erfordern, wurde bewußt verzichtet, da deren Tragfähigkeit in der realen Welt nicht nachgewiesen werden kann.

6.1 Realisierte Lösungsansätze für sehende Straßenfahrzeuge

Die Übersicht über den Stand der Technik in Kapitel 2 hat gezeigt, daß es bis heute weltweit nur sehr wenige realisierte Ansätze für maschinelle Verhaltensentscheidungen in Straßenfahrzeugen gibt. Diese Tatsache liegt darin begründet, daß maschinelle Verhaltensentscheidungen erst dann notwendig werden und sinnvoll eingesetzt werden können, wenn grundlegende Verhaltensweisen realisiert wurden. Auch an der Universität der Bundeswehr wurde das erste Modul zur Verhaltensentscheidung erst Jahre nach der ersten automatisch quergeregelten Fahrt im Fahrzeug getestet. Dabei beschränkte man sich aus Sicherheitsgründen darauf, Empfehlungen für den Fahrer zu geben (Kujawski 1995).

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Ansätze für Verhaltensentscheidungen auf Autobahnen und Schnellstraßen von Daimler-Benz, der Carnegie Mellon University und der Fakultät für Informatik der Universität der Bundeswehr kurz vorgestellt und analysiert. Aufbauend auf der Analyse wird ein neuer Ansatz für zentrale, situationsabhängige Entscheidungen vorgestellt. Der Ansatz, der zunächst für automatische Fahrten auf der Autobahn entworfen wurde, wurde auch bei autonomen Missionen auf Straßen niederer Ordnung erfolgreich eingesetzt. Dabei gewinnt die *zentrale Entscheidungsinstanz* (Abschnitt 6.2) an Bedeutung.

6.1.1 Verhaltensgenerierung im Versuchsfahrzeug Vita II von Daimler-Benz

Reichardt (1996) stellt Ansätze zur Generierung von Verhaltensweisen auf Autobahnen im Versuchsfahrzeug Vita II vor (Abschnitt 2.3.3). Im Mittelpunkt des Konzepts steht das autonome Fahrzeug, das in der Lage ist, selbständig quer- und längsgeregelt zu fahren. Dem Menschen fällt dabei die Aufgabe der Missionsplanung und der Überwachung des autonomen Systems zu. Zur ‘Verhaltensgenerierung’ - von der Reichardt bewußt in Abgrenzung von Ansätzen zur ‘Verhaltensentscheidung’ spricht - wurden zwei verschiedene Ansätze untersucht.

Zunächst wurde versucht, Verhalten direkt durch die Verknüpfung von Risiko - dargestellt durch Potentialfelder - und risikovermindernder Handlung zu erzeugen. Die Aufgabe der Verhaltensgenerierung wurde damit auf das Problem einer ‘Minimumsuche in dem durch die Umgebung aufgebauten Gefahrengelände abgebildet’ (Reichardt 1996, S. 28). Dieses Verfahren erwies sich für automatische Straßenfahrzeuge als ungeeignet: Die direkte Verknüpfung von Gefahr und Reaktion führte zu komplizierter Modellierung. Die Dynamik des Fahrzeugs konnte nicht explizit modelliert, schematische Handlungen nicht integriert werden.

Als Ausweg wurde die sogenannte ‘Methode der konkurrierenden Verhaltensmuster’ entworfen: ‘Hier wird im Gegensatz zum ersten Ansatz zwischen Gefahr und Reaktion unterschieden... Fahrerreaktionen werden in diesem Ansatz als konkurrierende Verhaltensmuster modelliert, die über ein Inhibitionsnetzwerk miteinander verbunden sind’ (Reichardt 1996, S. 28f.). Drei Arten von Verhaltensmustern werden eingeführt: Notreaktionen, Basisverhaltensmuster und schematisierte Handlungen, die sich in Anlehnung an Brooks Subsumptionsarchitektur (Abschnitt 3.2.5, Brooks 1986) gegenseitig hemmen können. Der Potentialansatz wird ausschließlich in der Simulation in Notsituationen eingesetzt. Die sogenannten ‘Basisverhaltensmuster’ entsprechen im regelungstechnischen Sinn Führungsgrößengeneratoren für unterlagerte Regelkreise. Die ‘schematisierten Handlungen’ erlauben die Ablaufsteuerung von Verhaltensmustern mit mehreren Phasen.

Der Schwierigkeit, die reale Welt mit den derzeit verfügbaren Wahrnehmungssystemen zu erkennen, begegnet Reichardt damit, daß er eine sogenannte ‘Diskurswelt’ definiert, die gegenüber einem realen Autobahnszenario die Klassen von zulässigen Objekten und

deren Dynamik weiter einschränkt. Dem Modul *Situation Assessment* fällt bei Reichardt die Aufgabe zu, die Konsistenz von einzelnen Objekthypothesen und von Szenen zu überprüfen. Der Übergang vom fertigkeitbasierten zum regelbasierten Verhalten und damit der ‘Signifikationsprozeß’ (Eco 1985) entfällt bei der Situationsanalyse.

6.1.2 Ansätze zur Verhaltensentscheidung im Straßenverkehr an der Carnegie Mellon University

An der CMU wurden Ansätze zur Verhaltensentscheidung im Straßenverkehr unter dem Namen SAPIENT (‘situation awareness planner implementing effective navigation in traffic’) entwickelt (Sukthankar 1997) und in der Computersimulation getestet. Die Systeme haben die Aufgabe, die Verkehrssituation zu überwachen und geeignete Aktionen auszuwählen, die auf den unteren Ebenen ausgeführt werden sollen.

MonoSAPIENT ist ein regelbasierter Ansatz, bei dem die Entscheidungsfindung mit Hilfe eines großen Entscheidungsbaumes gefällt wird. Die monolithische Architektur erweist sich als ungeeignet, da sie nur schwer zu erweitern ist (Sukthankar 1997, S. 86 - 89). Unbekannte Situationen können mit den Regeln nur schlecht beherrscht werden.

Als Alternative entwickelt der Autor einen dezentralen Ansatz, PolySAPIENT, in dem unabhängige Experten, sogenannte ‘denkende Objekte’ (‘reasoning objects’), Handlungen für die aktuelle Situation empfehlen (Sukthankar 1997, S. 93ff.). Aus den Empfehlungen, die ausschließlich auf dem Spezialwissen der Experten basieren, ermittelt ein Schiedsrichter (‘arbiter’) die nächsten Aktionen für das Fahrzeug. Dem Verfahren liegt die Annahme zugrunde, daß jedes relevante Objekt in der Umgebung unabhängig betrachtet werden kann. Auch wenn bereits im stark eingeschränkten Simulationsszenario Situationen auftreten, in denen diese Annahme verletzt wird, hält Sukthankar an dieser Art der Zerlegung des Problems fest. Die ‘denkenden Objekte’ und ihre Verknüpfungen im ‘Schiedsrichtermodul’ sind stark abhängig von Parametern, die jedoch in Trainingsphasen in der Simulation mit einem speziellen Algorithmus gelernt werden können (Sukthankar 1997, S. 129 - 150). Wegen unzureichender Wahrnehmungsfähigkeiten in den Fahrzeugen der CMU konnte der Ansatz nicht auf seine Eignung für die Verhaltensentscheidung im Straßenverkehr getestet werden (Sukthankar 1997, S. 186).

6.1.3 Verhaltensentscheidungen für die Fahrzeuge der Universität der Bundeswehr

An der Fakultät für Informatik der Universität der Bundeswehr wurde ein Ansatz entwickelt, der die in dieser Arbeit vorgestellte Verhaltensentscheidung beeinflusst hat und der im folgenden kurz vorgestellt werden soll. Kujawski (1995) entwickelte ein Modul *Verhaltensentscheidung* für die Testfahrzeuge der Universität der Bundeswehr, das die Aufgabe hatte, die aktuelle Situation wahrzunehmen und zu interpretieren und darauf aufbauend Entscheidungen für das zukünftige Verhalten zu fällen (Kujawski 1995).

Kujawski definiert eine ideale Welt (ähnlich Reichardts ‘Diskurswelt’, Abschnitt 6.1.1, Reichardt 1996), in der er davon ausgeht, daß nur ausgewählte Klassen von physikalischen Objekten auf der Autobahn auftreten und alle vorhandenen Objekte dieser Klassen von den Wahrnehmungsmodulen störungsfrei erkannt werden. In den Versuchsfahrzeugen VaMoRs und VaMP (Abschnitt 7.1) initiierte das Modul Spurwechsel, bei denen der Mensch überprüfte, ob das aufgrund der Annahme der idealen Welt generierte Verhalten situationsgerecht war.

Die experimentellen Erfahrungen und die Analyse dieses Ansatzes waren für meine Arbeit folgenreich: Die mangelnde Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung hat die Akzeptanz des Moduls bei Benutzern verringert, da offensichtliche Fehlentscheidungen getroffen wurden: So wurden auch dann Spurwechselempfehlungen gegeben, wenn die benötigten Bildverarbeitungsprozesse gar nicht aktiviert oder nicht leistungsfähig genug waren.

Als Verfahren zur Auswahl des Spurwechsels setzte Kujawski einen großen Automaten mit 32 Zuständen ein (Kujawski 1993), der in störungsfreier Umgebung adäquate Empfehlungen aussprach. In der realen Welt konnten jedoch auftretende Inkonsistenzen bei der Wahrnehmung dazu führen, daß der Automat irrtümlich eingenommene Zustände selbständig nicht mehr verlassen konnte. Der monolithische Ansatz war ähnlich wie bei Sukthankar (1997) (Abschnitt 6.1.2) schwer zu erweitern.

In Kujawskis Ansatz zur Verhaltensentscheidung werden für alle wahrgenommenen Subjekte Trajektorien voraussimuliert. Der Simulationsaufwand läßt sich erheblich verringern, wenn nur Hypothesen über Objekte angefordert werden, die für das eigene Verhalten relevant sein könnten.

6.1.4 Kritik der Ansätze

Alle Ansätze trugen zur Entwicklung von Verhaltensentscheidungen in Straßenfahrzeugen bei. Kujawski war meines Wissens der erste, der maschinelle Verhaltensentscheidungen zum Spurwechsel in einem sehenden Fahrzeug demonstrieren konnte. Reichardt untersuchte die Verhaltensentscheidung mittels Potentialfeldern im Straßenfahrzeug. Sukthankar testete in der Simulation, ob die Komplexität des Problems der Verhaltensentscheidung nicht mit unabhängigen ‘denkenden Objekten’ verringert werden kann. Allen Ansätzen liegt dabei die gemeinsame Annahme zugrunde, daß alle relevanten Objekte in der realen Welt vom autonomen Fahrzeug für die Aufgabe hinreichend genau und konsistent wahrgenommen werden. Es herrscht zwar Einigkeit darüber, daß diese Annahme in sehenden Fahrzeugen derzeit auch mit den leistungsfähigsten Wahrnehmungssystemen nur unter günstigen Umständen erfüllt ist. Soweit überhaupt automatische Verhaltensentscheidungen demonstriert werden konnten, wurde die Aufgabe, die Leistungsfähigkeit des Systems zu überwachen, von einem menschlichen Bediener übernommen. Die Gründe für maschinelles Fehlverhalten werden bei allen Ansätzen in der eingeschränkten Wahrnehmung gesehen.

Diese Grundhaltung wird in der vorliegenden Arbeit hinterfragt. Hat nicht die maschinelle Verhaltensentscheidung die Aufgabe, mit den aktuell verfügbaren Fähigkeiten die für das System günstigsten Verhaltensentscheidungen zu treffen? Sind nicht Ansätze für ideale Diskurswelten für reale Welten ungeeignet? Auch der geübte menschliche Fahrer berücksichtigt seine Fähigkeiten und die seines Fahrzeuges beim Fahren. Liegen die Gründe für maschinelles Fehlverhalten in den vorgestellten Ansätzen vielleicht nicht nur in der eingeschränkten Wahrnehmung, sondern vor allem in der falschen Konzeption der Ansätze?

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz liefert Verhaltensentscheidungen für reale, physikalische Systeme, deren Eigenschaften integral berücksichtigt werden. Zunächst wird ein neuer Freiheitsgrad eingeführt, der Grad der Automatisierung (Abschnitt 1.1.2). Nur wenn die aktuelle Leistungsfähigkeit ausreichend ist, kann ein Grad der Automatisierung überhaupt aktiviert werden. Während der automatischen Fahrt wird die Leistungsfähigkeit ständig überprüft und bei Entscheidungen berücksichtigt. Inkonsistenzen in der Welt führen bei den Entscheidungsalgorithmen zwar zu temporärem Fehlverhalten, nicht aber zur Deaktivierung des Entscheidungsmoduls. Aufgrund der damit erreichten Zuverlässigkeit konnten Entscheidungen, die vorher dezentral in der Fahrzeugführung getroffen wurden, der *Verhaltensentscheidung* übertragen werden.

In allen Arbeiten wird das Problem der Komplexität bei der Verhaltensentscheidung diskutiert, das durch die kombinatorische Explosion (z.B. Dennett 1991, S. 5ff) der möglichen Zustände entsteht. Reichardt und Sukthankar stellen unterschiedliche Lösungsansätze vor. In dieser Arbeit werden verschiedene Konzepte eingeführt, um die Gesamtaufgabe auf überschaubare Teilaufgaben zurückzuführen. Die Automatisierung erfolgt abhängig von der Domäne und dem aktuellen Grad der Automatisierung. Längs- und Querführung, Blickrichtungs- und Aufmerksamkeitssteuerung werden unabhängig entworfen, wobei Randbedingungen berücksichtigt werden. Als Repräsentationsmedium haben sich Zustandskarten (Abschnitt 4.1.3, Harel 1987) in dieser Arbeit sehr bewährt.

6.2 Zentrale situationsabhängige Entscheidungen

In der funktionalen Systemarchitektur (Abschnitt 3.3, Abbildung 3.5) nehmen die Module *Situationserfassung* und *Verhaltensentscheidung* eine zentrale Stellung ein. Aufbauend auf den Zustandsgrößen, den Qualitätsmaßen und Hintergrundwissen werden im Aufgabenkontext relevante Aspekte der Situation analysiert. Die aktuelle Beschreibung der Situation dient als Entscheidungsgrundlage, auf der das Modul *Verhaltensentscheidung* die Aufgaben für die Fortbewegung, die Blickrichtungs- und Aufmerksamkeitssteuerung auswählt, die in den Ausführungsmodulen *Fahrzeugführung* und *Blickrichtungs- und Aufmerksamkeitssteuerung* abgearbeitet werden.

Bereits in Abschnitt 6.1 wurde deutlich, daß der Begriff ‘Situation’ und damit auch die Aufgabe der *Situationserfassung* in der Fachliteratur unterschiedlich definiert wird.

Laut Duden (1989) kommt das Wort ‘Situation’ aus dem Französischen ‘[frz. situation, zu situer = in die richtige Lage bringen < mlat. situare, zu lat. situs = Lage, Stellung]’. Als eine mögliche Bedeutung werden ‘Verhältnisse, Umstände, in denen sich jmd. [augenblicklich] befindet’ angegeben.

Reichardt (1996, S. 35) definiert den Begriff ‘Situation’ für seine ‘Diskurswelt ..., die eine Untermenge der realen Welt beinhaltet’ (Abschnitt 6.1.1, Reichardt 1996, S. 32), sinngemäß als Vereinigungsmenge von der die Straße beschreibenden Menge, von n Mengen, die je ein Hindernis repräsentieren, von m Mengen mit einem Verkehrszeichen, von einer den Fahrzeugzustand und einer den Benutzerwunsch beschreibenden Menge. Mock-Hecker (1994, S. 4) berücksichtigt zwar die Aktionen und Pläne der Handelnden, vernachlässigt aber die Umwelteinflüsse:

‘Eine Verkehrssituation ist dabei der zu einem bestimmten Zeitpunkt existierende Zustand des erfaßten Ausschnitts der Verkehrswelt, der in dem hier verfolgten Ansatz durch bestimmte physikalische Zustandsgrößen der involvierten Fahrzeuge, den zu diesem Zeitpunkt von den Fahrzeugen durchgeführten Aktionen und den erwarteten Plänen der Agenten beschrieben wird. Die aus dieser Definition resultierende Beschreibung einer Verkehrssituation schließt nicht nur den aktuellen Zustand der Verkehrswelt in einer bestimmten Verkehrssituation ein, sondern auch deren wahrscheinliche, weitere Entwicklung (Mock-Hecker 1994, S. 4).’

Wershofen & Graefe (1996, S. 3) definieren ‘Situation’

‘als die Gesamtheit der Umstände, die vom Roboter bei der Auswahl eines in dem jeweiligen Moment geeigneten Verhaltensmusters zu berücksichtigen sind.’

Faßt man das automatische Fahrzeug als ‘Roboter’ auf und ersetzt ‘Verhaltensmuster’ durch die in dieser Arbeit definierten ‘Verhaltensweisen’, dann entspricht diese Definition dem dieser Arbeit zugrunde liegenden Situationsbegriff. Sie beinhaltet implizit bereits einen weiteren Aspekt der Situationserfassung, der in dieser Arbeit explizit herausgearbeitet wird: Den Übergang ‘vom Signal zum Sinn’, wie Eco (1985) es ausdrückt, oder von der 4D-Ebene zur regelbasierten Ebene. Bei Eco (1985, S. 65) ist dieser ‘Signifikationsprozeß’ noch rein dem Menschen vorbehalten; in Systemen mit erhöhtem Grad der Automatisierung wird er zunehmend auch von der Maschine vorgenommen werden. In diesem Sinne analysiert die *Situationserfassung* für das technische Subjekt die Situation hinsichtlich der Umstände, die für die Ausführung der aktuellen Aufgabe in dem jeweiligen Moment relevant sind (vgl. Wershofen & Graefe 1996).

Abbildung 6.1 zeigt die Module für zentrale situationsabhängige Entscheidungen im Überblick. Für die Missionen, die die Testfahrzeuge der Universität der Bundeswehr derzeit bewältigen, erscheinen folgende Aspekte der Situation relevant und sind auf dem Hintergrund der Ziele des autonomen Fahrzeugs genauer zu analysieren:

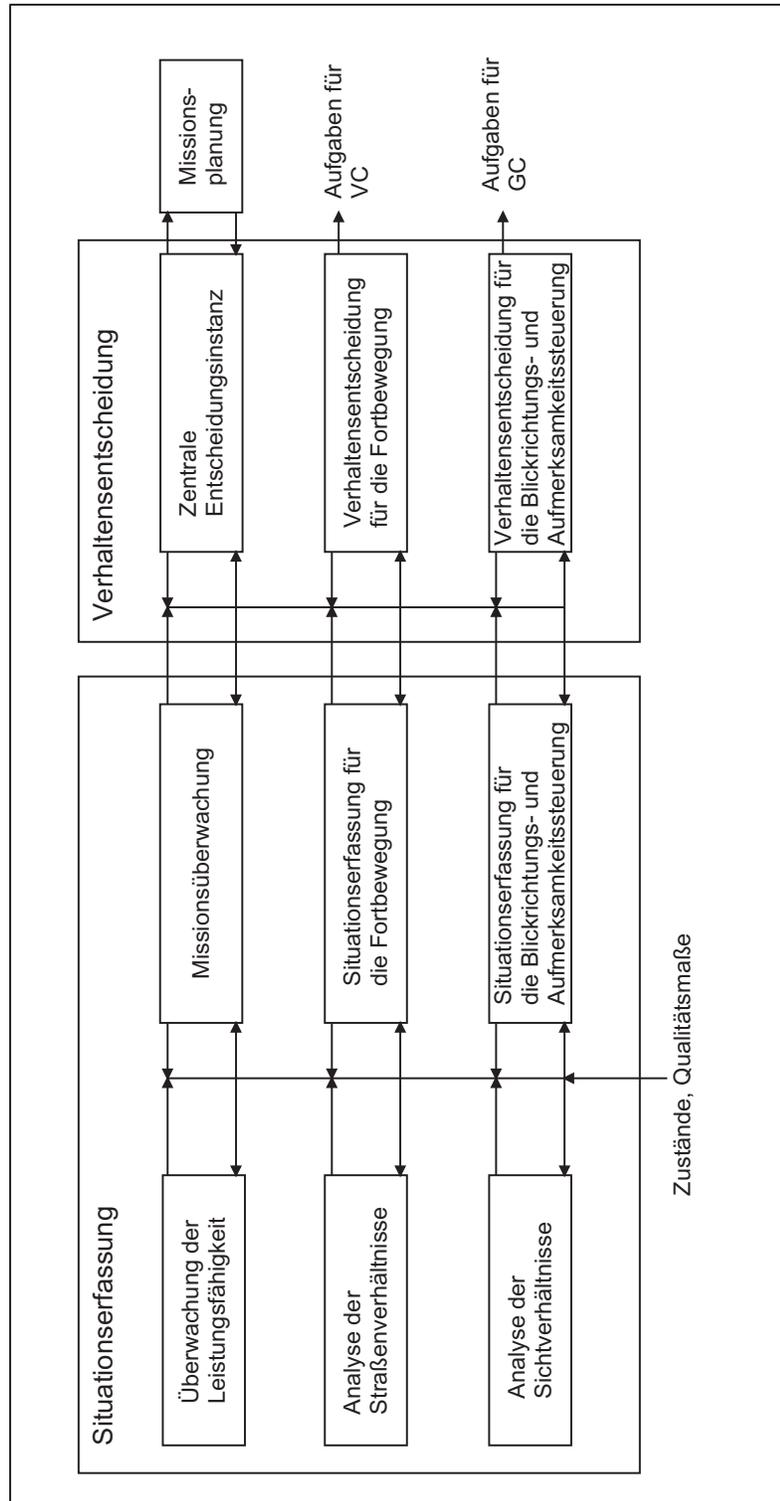


Abbildung 6.1: Zentrale Situationserfassung und Verhaltensentscheidung, VC: Vehicle Control, Fahrzeugführung, GC: Gaze Control, Blickrichtungssteuerung

- die aktuelle Leistungsfähigkeit des automatisch geführten Fahrzeugs,
- der aktuelle Straßenzustand,
- die aktuellen Sichtverhältnisse,
- der Stand im aktuellen Missionselement,
- die Bedeutung anderer Objekte für die Fortbewegung und
- die Bedeutung anderer Objekte für die Blickrichtungs- und Aufmerksamkeitssteuerung.

Für die Analyse eines Aspektes ist ein eigenes Modul innerhalb der *Situationserfassung* zuständig.

Bevor irgendeine Handlung eingeleitet werden kann, wird im Modul *Überwachung der Leistungsfähigkeit* (*Performance Monitoring*, PM) zunächst die aktuelle Leistungsfähigkeit des Systems überprüft. Für die Analyse der Situation hinsichtlich der Fortbewegung sind der Zustand des Untergrundes und die daraus resultierenden fahrdynamischen Verhältnisse von Bedeutung (*Analyse der Straßenverhältnisse*). Die Beleuchtungsbedingungen sind im Modul *Analyse der Sichtverhältnisse* zu analysieren. Das Modul *Missionsüberwachung* (*Mission Monitoring*, MM) bestimmt die aktuelle Stellung innerhalb des Missionsplans (Gregor 1998). Die Bedeutung anderer Objekte für die Fortbewegung wird im Modul *Situationserfassung für die Fortbewegung* (*Situation Assessment for Locomotion*, SAL) ermittelt, die Bedeutung anderer Objekte für die Blickrichtungs- und Aufmerksamkeitssteuerung im Modul *Situationserfassung für die Blickrichtungs- und Aufmerksamkeitssteuerung* (*Situation Assessment for Gaze and Attention*, SAGA, Pellkofer 1999).

Aufgrund des Wissens über die Situation initiiert die *Verhaltensentscheidung* geeignete Handlungen, um ihre Ziele zu erreichen. Die *Verhaltensentscheidung* kennt zwei verschiedene Entscheidungsebenen: Die *zentrale Entscheidungsinstanz* und spezialisierte Entscheidungsmodule. Die *zentrale Entscheidungsinstanz* (*Central Decision*, CD) ist die oberste Entscheidungsinstanz im autonomen System. Sie

- initiiert abhängig vom Grad der Automatisierung Wahrnehmungs- und Handlungsfähigkeiten,
- löst bei Bedarf Konflikte auf,
- gibt Gütekriterien vor,
- bewertet die ausgeführten Aktivitäten
- und beendet die, die nicht mehr nötig sind.

Die beiden spezialisierten Entscheidungsmodule *Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung* (*Behavior Decision for Locomotion*, BDL) und *Verhaltensentscheidung für die Blickrichtungs- und Aufmerksamkeitssteuerung* (*Behavior Decision for Gaze and Attention*, BDGA) wählen im Rahmen des vorgegebenen Grades der Automatisierung Verhaltensweisen aus, die von VC und GC ausgeführt werden. Zusammen bilden CD, BDL und BDGA eine organisatorische Hierarchie (Abschnitt 3.2.1, Mesarovic et al. 1970).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Architektur für die situationsgerechte Verhaltensentscheidung und die Module CD, PM, SAL und BDL entwickelt, die in den folgenden Abschnitten näher vorgestellt werden. Die Module MM, SAGA und BDGA sind bei Gregor (1998) und Pellkofer (1999) beschrieben; für die Module *Analyse der Straßenverhältnisse* und *Analyse der Sichtverhältnisse* existieren derzeit Ansätze (Brüdigam 1994; Dickmanns 1996; Werner 1997 und Fürst 1999), die noch nicht ins aktuelle System integriert wurden.

6.2.1 Zentrale Entscheidungsinstanz

Spezialisierte Entscheidungsinstanzen in komplexen Systemen verfolgen entsprechend ihren Aufgaben unterschiedliche Ziele, die zu Konflikten im System führen können. In der vorgestellten *Verhaltensentscheidung* können solche Konflikte zwischen der *Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung* und der *Verhaltensentscheidung für die Blickrichtungs- und Aufmerksamkeitssteuerung* auftreten. In dieser Arbeit werden die Entscheidungsinstanzen zur Auflösung der Konflikte in einer organisatorischen Hierarchie angeordnet, in der eine übergeordnete Entscheidungsinstanz, die hier vorgestellte *zentrale Entscheidungsinstanz*, die Aktivitäten der untergeordneten koordiniert (vgl. Abschnitt 3.2.1, Mesarovic et al. 1970).

Zur Koordination hat die *zentrale Entscheidungsinstanz* unterschiedliche Eingriffsmöglichkeiten ins System. Abhängig von den aktuellen Zielen - seien sie extern vorgegeben oder intern repräsentiert - aktiviert die *zentrale Entscheidungsinstanz* Prozesse, die Fähigkeiten für Wahrnehmung und Aktion zur Verfügung stellen. Die Generierung von Fähigkeiten kann durch die Vorgabe von Gütekriterien beeinflusst werden. Aktivitäten, die nicht länger benötigt werden, werden beendet. Den konkurrierenden Entscheidungsinstanzen werden Schnittstellen vorgegeben, über die sie sich gegenseitig Randbedingungen übermitteln können. Treten dennoch Konflikte auf, so müssen diese von der *zentralen Entscheidungsinstanz* aufgelöst werden.

Abbildung 6.2 verdeutlicht die Rolle der *zentralen Entscheidungsinstanz* als Initiatorin von Handlungen zu Beginn einer neuen Mission (vgl. Abschnitt 8.2.4). Der Nutzer wählt für Längs- und Querführung in diesem Fall den Grad der Automatisierung 'autonome Längsführung' mit 'automatischer Querführung'. Für diese Aufgaben werden spezialisierte Prozesse für die Landmarkenerkennung (Landmark Detection and Tracking, LDT, Abschnitt 3.3, Gregor 1998), für die Straßenerkennung (Road Detection and Tracking, RDT, Abschnitt 3.3, Behringer 1996) und die Missionsplanung (MP,

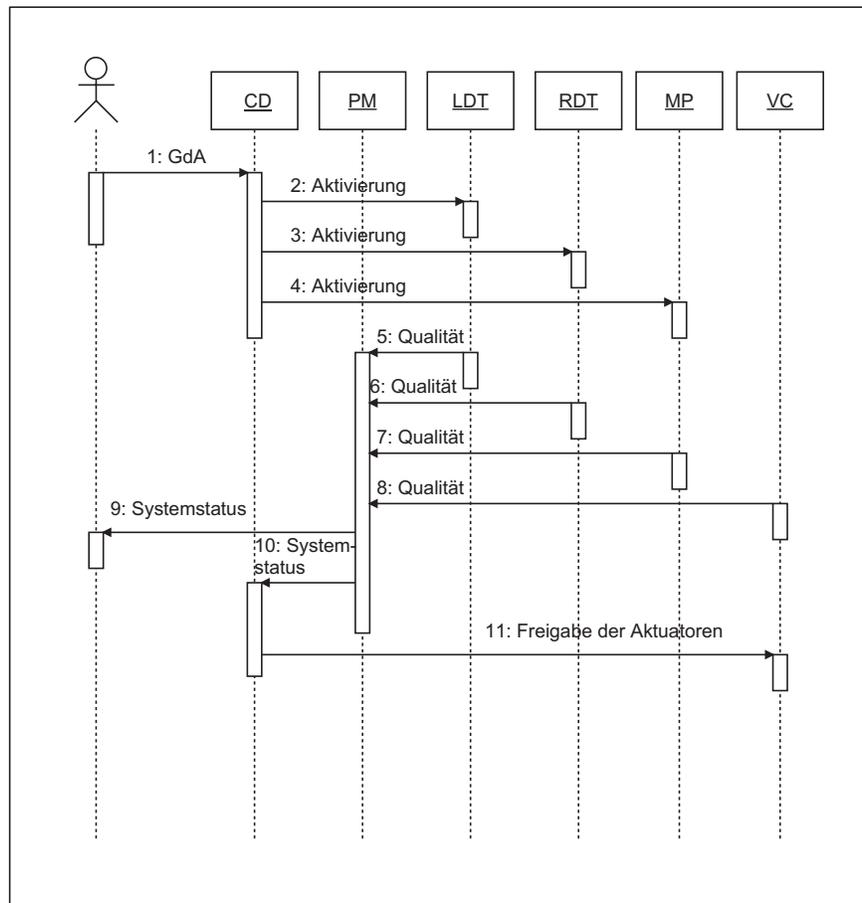


Abbildung 6.2: Aufgabe der zentralen Entscheidungsinstanz beim Start des Systems für eine autonome Mission auf dem Versuchsgelände (Sequenzdiagramm in UML); CD: Central Decision, Zentrale Entscheidungsinstanz, PM: Performance Monitoring, Überwachung der Leistungsfähigkeit, LDT: Landmark Detection and Tracking, Landmarkenerkennung, RDT: Road Detection and Tracking, Straßenerkennung, MP: Mission Planning, Missionsplanung, VC: Vehicle Control, Fahrzeugführung, GdA: Grad der Automatisierung

Abschnitt 3.3, Gregor 1998) aktiviert. Aus den Qualitätsmaßen aller Prozesse bildet die *Überwachung der Leistungsfähigkeit* den Systemstatus, der an die *zentrale Entscheidungsinstanz* und - in diesem Beispiel nur zur Information - an den Benutzer gemeldet wird. Ist der Systemstatus für den gewählten Grad der Automatisierung ausreichend, so gibt die *zentrale Entscheidungsinstanz* die Aktuatoren für die Fortbewegung frei.

Die Koordinationsmöglichkeiten der *zentralen Entscheidungsinstanz* werden in Abbildung 6.3 verdeutlicht. Viele Konflikte können verhindert werden, wenn sich die spezialisierten Verhaltensentscheidungen gegenseitig Randbedingungen mitteilen können. Für BDGA kann es wichtig sein, daß das Fahrzeug eine gewisse Geschwindigkeit nicht über-

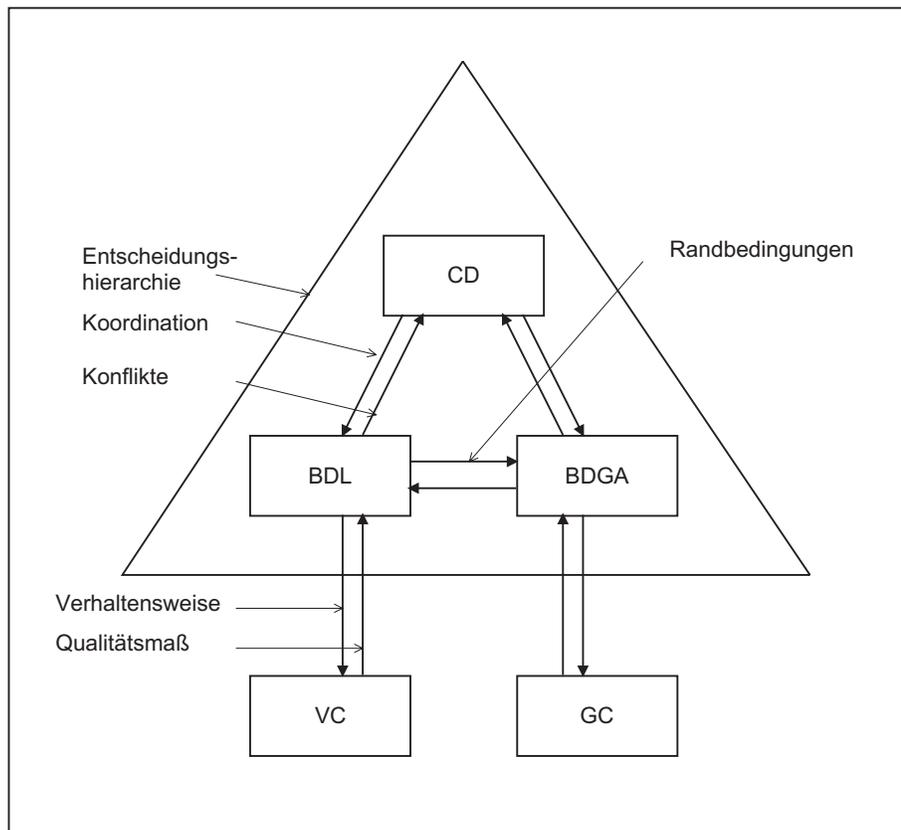


Abbildung 6.3: Organisatorische Hierarchie der Entscheidungsinstanzen; CD: Central Decision, Zentrale Entscheidungsinstanz, BDL: Behavior Decision for Locomotion, Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung, BDGA: Behavior Decision for Gaze and Attention, Verhaltensentscheidung für die Blickrichtungs- und Aufmerksamkeitssteuerung, VC: Vehicle Control, Fahrzeugführung, GC: Gaze Control, Blickrichtungssteuerung

schreitet, um ausreichend Zeit für Sakkaden auf seitlich stehende Objekte zu lassen. Zusätzlich kann es notwendig sein, daß das Fahrzeug auf einer bestimmten Spur fährt, damit relevante Objekte nicht verdeckt werden. BDL wird dagegen in Notsituationen auf eine Blickfixierung auf gefährliche Objekte dringen, auch wenn deshalb Objekte, die für die Einhaltung des Missionplans wichtig sind, nicht erkannt werden können. Treten dennoch Konflikte auf, so informieren BDGA und BDL die *zentrale Entscheidungsinstanz*, die im autonomen Fall diese Konflikte auflösen muß, sei es durch die Vergabe von Prioritäten an einen Spezialisten, sei es durch eine Alternativlösung. Im teilautomatischen Fall kann es sinnvoll sein, daß die *zentrale Entscheidungsinstanz* den Menschen in die Auflösung von Konflikten mit einbezieht.

6.2.2 Überwachung der Leistungsfähigkeit

Die Überwachung der eigenen Fähigkeiten stellt für automatische Fahrzeuge die Grundlage von situationsgerechtem Handeln dar. Fähigkeiten sollten nur automatisch zur Verfügung gestellt werden, wenn alle spezifizierten Anforderungen erfüllt sind. Daher werden die aktuellen Fähigkeiten und die zur Generierung notwendigen Teilsysteme im Modul *Überwachung der Leistungsfähigkeit* ständig überprüft.

Komplexe Fähigkeiten werden im System mit Hilfe von Hardware (Sensoren, Aktuatoren, Rechnern und Kommunikationsmedien) und darauf ablaufenden Prozessen generiert. Die Überwachung dieser Fähigkeiten ist hierarchisch organisiert: Soweit möglich erfolgt sie dezentral als Teil der Module in der funktionalen Systemarchitektur (Abschnitt 3.3, Abbildung 3.5). Die aktivierten Prozesse besitzen Diagnosemöglichkeiten, um ihren Status und ihre aktuelle Leistungsfähigkeit zu bestimmen. Daraus abgeleitete Qualitätsmaße werden an das Modul *Überwachung der Leistungsfähigkeit* übermittelt. Damit wird an zentraler Stelle im System Wissen über den aktuellen Systemzustand gesammelt. Im Sinne eines objekt-orientierten Entwurfs kann man das Modul *Überwachung der Leistungsfähigkeit* als ein ‘architektonisches Entwurfsmuster’ (‘architectural pattern’) eines ‘Sicherheitsverantwortlichen’ (‘safety executive’) auffassen, das für komplexe Systeme empfohlen wird (Douglass 1998). Die Diskussion einer Auswahl der überprüften Aspekte soll die Organisation der *Überwachung der Leistungsfähigkeit* verdeutlichen.

Besonders aufwendige Sicherheitskonzepte wurden für die elektronisch ansteuerbaren Aktuatoren Lenkung, Drosselklappe und Bremse entwickelt (Weiß 1993; Göbel 1994; Bosch 1995). Werden in einem dezentralen Überwachungsmodul für einen Aktuator Fehler detektiert, so nimmt der Aktuator einen sicheren Zustand ein. Das Modul PM wird durch eine Fehlermeldung vom Auftreten des Fehlers informiert.

Die Sensoren des Systems, die je nach Ausrüstungsstand Kameras, Radar, Inertial- und konventionelle Sensoren umfassen, senden im fehlerfreien Betrieb zyklisch Nachrichten an die ansteuernden Prozesse. Fehlen diese Nachrichten, so lösen die Prozesse ebenfalls Fehlermeldungen für PM aus. Die Prozesse im System melden zyklisch die Zustände

ihrer Automaten zur Ablaufsteuerung an PM. Bei erhöhten Anforderungen an die Zykluszeit, wie sie zum Beispiel in Prozessen zur Realisierung von Regelkreisen auftreten, wird diese gemessen und an PM übertragen.

Besondere Bedeutung kommt der Überwachung der Kommunikation im System zu. Bei der Diagnose nutzt PM Dienste des zentralen Kommunikationsmoduls, der *dynamischen Objektdatenbank* (DOB, Abschnitt 7.2.3, Rieder 1999). Die DOB überwacht, ob Prozesse, die sich für die Verwaltung von Objekten an der DOB angemeldet haben, innerhalb einer definierten Zeit neue Nachrichten schicken. Bleiben die Nachrichten aus, so entfernt die DOB die von diesen Prozessen verwalteten Objekte. Solange PM in der DOB die für den gegebenen Grad der Automatisierung notwendigen Objekte vorfindet, ist sichergestellt, daß die Kommunikation zu den verwalteten Prozessen funktioniert.

Synchronisierte Zeitstempel im System erlauben den Prozessen eine einfache Messung der Übertragungszeiten von Daten. Werden in der Spezifikation definierte Grenzwerte für die Übertragungszeiten überschritten, so werden die an PM übermittelten Qualitätsmaße entsprechend angepaßt.

Neben den dargestellten Einzelkomponenten wird auch die Qualität von Fähigkeiten überwacht, die im Zusammenwirken verschiedener Komponenten generiert werden. Qualitätsmaße stellen ein quantitatives Maß für die aktuelle Güte von Fähigkeiten dar. Qualitätsmaße, die in Erkennungsprozessen und in den Reglern berechnet werden, werden zentral mit der Spezifikation verglichen. Die Überwachung der Regelkreise zur Laufzeit, die bereits in Kapitel 5.2 vorgestellt wurde, erlaubt die Erkennung von Abweichungen von der Spezifikation, nachdem diese aufgetreten sind. Mit den realisierten Verfahren können zum Beispiel die Einschwingzeiten beim Verzögerungsregler, die Totzeiten bei der Querregelung oder das Quadrat der Abweichungen der Ablage von der Sollablage überwacht werden.

6.2.3 Situationserfassung für die Fortbewegung

Das Modul *Situationserfassung für die Fortbewegung* (SAL) hat die Aufgabe, die Bedeutung von Objekten für die Fortbewegung zu ermitteln. Soweit möglich werden, wie schon bei der Fahrzeugführung, Quer- und Längsführung unabhängig betrachtet (vgl. Abschnitt 5.1.1): Für Quer- und Längsführung werden jeweils die Objekte gesucht, die für die weiteren Handlungen relevant sind. Aus den relevanten Objekten wird dann ein Bezugsobjekt ermittelt, das bei der Realisierung der Verhaltensweise benötigt wird (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Die eingesetzten Methoden hängen bei der *Situationserfassung für die Fortbewegung* in hohem Maße vom gewählten Grad der Automatisierung ab. Bei einfachen Aufgaben wie einer Tempomatfunktion oder automatischem Spurhalten leistet SAL keinen Beitrag. Beim 'hybriden, adaptiven Tempomaten' werden bereits verschiedene Klassen physikalischer Objekte in Beziehung zueinander interpretiert. Situationserfassungen für die Fortbewegung für vollautonome Fahrten auf der Autobahn werden solange Forschungsthema bleiben, bis die maschinellen Wahrnehmungs- und Interpretationsfähigkeiten ei-

ne dem aufmerksamen Menschen vergleichbare Leistungsfähigkeit erreicht haben. In dieser Arbeit wurden Situationen hinsichtlich der Fortbewegung soweit analysiert, wie dies mit den Fähigkeiten zur Wahrnehmung im Versuchsfahrzeug im Entstehungszeitraum dieser Arbeit möglich war.

Die Leistungsfähigkeit der Wahrnehmung wird auch im Modul SAL integral berücksichtigt. Abhängig von den Wahrnehmungsmöglichkeiten werden die für den Menschen geschaffene Infrastruktur - zum Beispiel Fahrspurmarkierungen - und die damit verbundenen Regelungen zur Ermittlung von relevanten Objekten verwendet.

Als Relevanzmaße dienen in dieser Arbeit Abstandsmaße, Zeitmaße und aus Zeitmaßen abgeleitete Größen. Der Ansatz ist in dieser Hinsicht durch den von Kopf (1993) motiviert, der in einem Fahrerassistenzsystem anhand von Zeitreserven die Bedeutung von Objekten für einen menschlichen Fahrer maschinell bestimmt (Kopf 1993, S. 48ff). Bei zunehmenden Wahrnehmungsfähigkeiten sollten die Zeitmaße durch Bedrohungsmaße ergänzt werden, die es dem automatischen Fahrzeug ermöglichen, die Folgen eines möglichen Zusammenstoßes abzuschätzen und bei der Auswahl der Handlungen zu berücksichtigen.¹

Neben den relevanten Objekten ermittelt SAL Attribute für wahrgenommene Objekte. Fremdfahrzeuge werden hinsichtlich ihres Abstandsverhaltens und ihrer Spurwechselzeit charakterisiert. Ein Fahrer, der nur einen 1.0s Abstand zum Vorderfahrzeug hält, wird als *aggressiv*, ein Fahrer, der 2.0s Abstand oder mehr zum Vorderfahrzeug hält, als eher *defensiv* bezeichnet. Ein aggressiver Fahrer stellt für das Eigenfahrzeug ein erhöhtes Sicherheitsrisiko dar, das entsprechend berücksichtigt wird (Nilubol 1998).²

Als weitere Grundlage für die Verhaltensentscheidung werden die Verkehrsdichte und die mittlere gefahrene Geschwindigkeit pro Spur ermittelt (Nilubol 1998). Langfristig sollten im Modul *Situationserfassung* auch die *Symbole* (in der Diktion von Rasmussen 1983, Abschnitt 3.1) bestimmt werden. Hier muß das Wissen kodiert sein, daß ein über die Straße rollender Ball im Missionselement *Stadtfahrt* bedeuten kann, daß Kinder dem Ball auf die Straße nachlaufen.

Besonders berücksichtigt werden bei der Situationserfassung 'Subjekte' - Objekte, die ihre Steuergrößen abhängig von Gütekriterien selbst beeinflussen können (Abschnitt 1.2, Dickmanns 1989). Sind interne Gütefunktionen und Steuergrößen nicht bekannt, so läßt sich das zukünftige Verhalten von Subjekten für einen externen Beobachter im allgemeinen schwerer vorhersagen als das von Objekten. Für diese Aufgabe, die selbst aufmerksame menschliche Fahrer immer wieder vor Probleme stellt, existieren in sehenden Fahrzeugen nur sehr einfache maschinelle Lösungen.

Zwei prinzipielle Lösungsansätze werden verfolgt, die sich dadurch unterscheiden, ob sie Infrastruktur berücksichtigen oder nicht: Im einfachsten Fall wird angenommen, daß

¹Auch Kopf weist auf die Grenzen von Zeitmaßen hin (Kopf 1993, S. 67f). Die Aufgabe, die Schwere einer Kollision abzuschätzen, stellt sich in seinem Szenario jedoch nicht.

²Die in den mit '(Nilubol 1998)' gekennzeichneten Abschnitten beschriebenen Details wurden im Rahmen einer von mir betreuten Diplomarbeit implementiert.

sich ein Fahrzeug mit der aktuellen Geschwindigkeit - oder, etwas aufwendiger, mit der aktuellen Beschleunigung - fortbewegt. Die Trajektorien werden ohne Berücksichtigung der Infrastruktur entsprechend extrapoliert. Diese Ansätze werden in den Arbeiten von Kujawski (1995) und Reichardt (1996) verfolgt. Sukthankar (1997, S. 73) nimmt für die Dauer der Extrapolationszeit an, daß die Fahrzeuge in ihrer aktuellen Spur mit der aktuellen Geschwindigkeit weiterfahren. Er geht zusätzlich davon aus, daß Fahrzeuge die Geschwindigkeit verringern, wenn sie sonst den Sicherheitsabstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen unterschreiten. Spurwechsel können bei seiner Extrapolation nicht berücksichtigt werden.

Abhängig vom Grad der Automatisierung werden im System der UniBwM beide Strategien verfolgt. Die einfache kinematische Extrapolation wird dann verwendet, wenn aufgrund der aktuellen Wahrnehmungsfähigkeiten im System keine Informationen über Fahrbahnmarkierungen zur Verfügung stehen. Die Auswahl der für die Längsführung relevanten Objekte ist in diesem Falle mit einer erhöhten Unsicherheit behaftet. Der vom System maximal stellbare Bremsdruck wird stärker begrenzt, um die Folgen inadäquaten Handelns aufgrund von Fehlzuordnungen zu verringern. Werden die Fahrbahnmarkierungen wahrgenommen, so kann auf der Autobahn ein im Rahmen dieser Arbeit entwickelter Ansatz eingesetzt werden, der Wissen auf der regelbasierten Ebene nutzt, um Zustandsgrößen auf der 4D-Ebene zu extrapolieren. Dem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, daß Fremdfahrzeuge intern wie das automatische Eigenfahrzeug Automaten enthalten, die eine Untermenge der logischen Zustände in Quer- und Längsführung einnehmen können. In der Querführung befindet sich der angenommene Automat eines Fahrzeugs entweder im Zustand 'Spurfahren' oder 'Spurwechsel', in der Längsführung kann er die Zustände 'Freie Fahrt', 'Konvoifahrt' oder 'Stehen' annehmen. Reicht der Wahrnehmungsbereich der Kameras nicht aus, um eine Zuordnung zu einem Zustand vorzunehmen, so wird dies ebenfalls explizit repräsentiert. Die Klassifizierung von Fahrzeugen nach logischen Zuständen erfolgt rekursiv beginnend mit dem in Fahrtrichtung am weitesten voraus wahrgenommenen und endet mit den am weitesten hinter dem Eigenfahrzeug fahrenden. Details und experimentelle Ergebnisse werden in Nilubol (1998) vorgestellt.

6.2.4 Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung

Die *Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung* hat die Aufgabe, aufbauend auf der *Situationserfassung* Verhaltensweisen auszuwählen und Führungsgrößen für sie zu generieren. Die Entscheidungen werden maßgeblich bestimmt durch Gütefunktionen. Wichtigste Gütefunktion, nach der der Erfolg der Mission bewertet wird, ist die Unversehrtheit des eigenen Systems und anderer Verkehrsteilnehmer. Daneben kann zeitoptimales, energieoptimales oder komfortoptimales Verhalten gefordert werden.

Bei der Entscheidung werden Zustandskarten eingesetzt, die besonders dazu geeignet sind, komplexe Aufgaben in einfache Teilaufgaben zu zerlegen (Abschnitt 4.1, Harel 1987). Auf der obersten Hierarchieebene entsprechen die Zustände der Automaten für die Quer- und die Längsführung Graden der Automatisierung. Die Arbeitsweise der

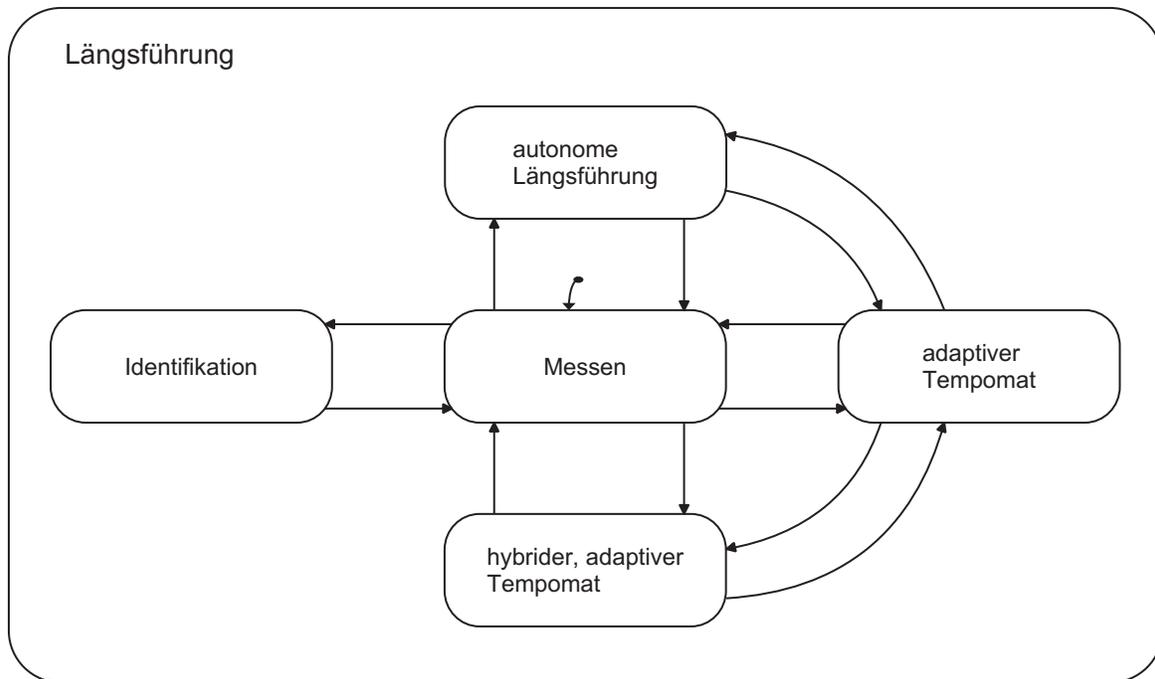


Abbildung 6.4: Zustandskarte Längsführung

Zustandskarten wird im folgenden anhand der Längsführung erläutert, für die bisher die komplexeren Zustandskarten entwickelt wurden.

Abbildung 6.4 illustriert den realisierten Automaten zur flexiblen Automatisierung der Längsführung. Der Automat enthält verschiedene Zustände, die einem bestimmten Grad der Automatisierung entsprechen: ‘Messen’, ‘Identifikation’, ‘autonome Längsführung’, ‘adaptiver Tempomat’ (ACC) und ‘hybrider, adaptiver Tempomat’ (HACC). Im Zustand ‘Messen’ erfolgt kein automatischer Eingriff in die Längsführung. Das Fahrzeugführungssystem beschränkt sich darauf, Sensordaten einzulesen und Daten aufzuzeichnen. Im Zustand ‘adaptiver Tempomat’ wird die Funktionalität des käuflich zu erwerbenden Systems zur Verfügung gestellt. Beim ‘hybriden, adaptiven Tempomaten’ erhöht sich die Robustheit des Gesamtsystems durch die Kombination von Rechnersehen und Radar. Daher kann der Grad der Automatisierung durch Erhöhung des maximal zulässigen Bremsdrucks weiter erhöht werden. Bei der ‘autonomen Längsführung’ fährt das Fahrzeug selbständig im Missionskontext; die Route und die Reisegeschwindigkeit werden abhängig von den aktuellen Zielen von der Missionsplanung errechnet. Die Zustände des abgebildeten Automaten werden entsprechend dem Benutzerwunsch und der aktuell verfügbaren Leistungsfähigkeit des Systems eingenommen. Die Zustände stellen ‘Überzustände’ (‘superstates’) in einer Zustandskarte dar. Am Beispiel eines ‘adaptiven Tempomaten’ wird die hierarchische Organisation der Automaten deutlich.

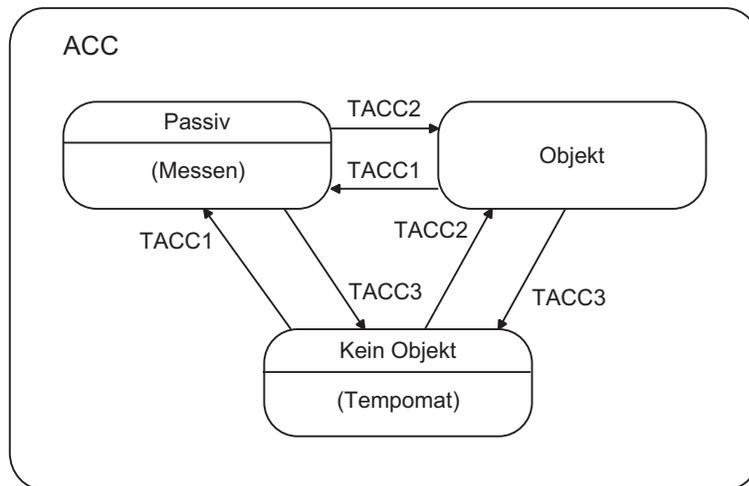


Abbildung 6.5: Zustandskarte Längsführung, Ausschnitt: Automat für ACC.

Übergangsbedingungen: $TACC1: v \notin [v_{min} - v_{Hysterese}; v_{max} + v_{Hysterese}]$;
 $TACC2: (v \in [v_{min}; v_{max}]) \wedge (\exists \text{Objekt})$; $TACC3: (v \in [v_{min}; v_{max}]) \wedge (\neg \exists \text{Objekt})$.

Zustandskarten am Beispiel von ‘ACC’

Der Überzustand ‘ACC’ verkörpert den in Abbildung 6.5 illustrierten Automaten mit den drei Zuständen ‘Passiv’, ‘Objekt’ (gemeldet) und ‘Kein Objekt’ (gemeldet). Der Zustand ‘Passiv’ wird angenommen, wenn die Geschwindigkeit des Eigenfahrzeugs v außerhalb des Geschwindigkeitsbereichs liegt:

$$v \notin [v_{min} - v_{Hysterese}; v_{max} + v_{Hysterese}]. \quad (6.1)$$

Unter den Zuständen werden in Klammern die im Zustand auszuführenden Aktionen notiert: Im Zustand ‘Kein Objekt’ wird die Verhaltensweise ‘(Tempomat)’ ausgeführt. Der Zustand ‘Objekt’ ist ein Überzustand, der den Automaten gleichen Namens mit den Zuständen ‘Schnelleres Objekt’ und ‘Langsameres Objekt’ enthält (Abbildung 6.6). Die Übergangsbedingungen ergeben sich unmittelbar aus den Zustandsbezeichnungen.

Im Zustand ‘Schnelleres Objekt’ (Abbildung 6.7) kann das Eigenfahrzeug ausreichend Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Objekt haben (‘Abstand ausreichend’) oder zu dicht hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug fahren. Im letzteren Fall wird der Abstand durch die Verhaltensweise ‘(Abstand vergrößern)’ erhöht.

Ist das gemeldete Fahrzeug langsamer als das Eigenfahrzeug, so ist zunächst zu unterscheiden, ob die Situation automatisch gemeistert werden kann oder ob das System aufgrund seiner beschränkten Eingriffsmöglichkeiten nur assistierend wirken kann (Zustände ‘Automatisches Fahren’ und ‘Fahrerassistenz’ in Abbildung 6.8).

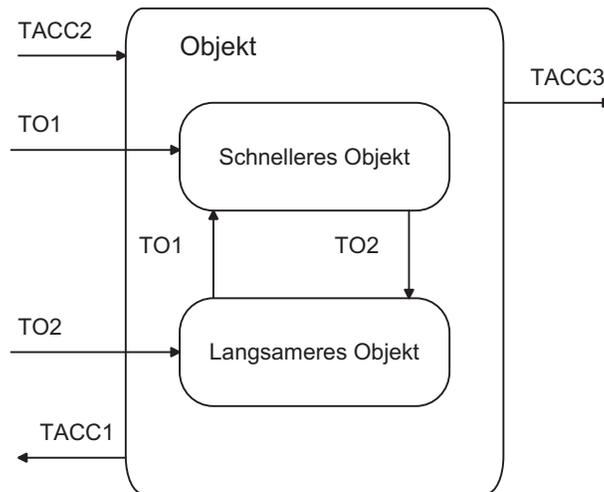


Abbildung 6.6: Zustandskarte Längsführung, Ausschnitt: Automat für Objekt. Übergangsbedingungen TON: $TO1: (v_{Objekt} > (v_{Mensch} + v_{Hysterese}) \wedge (v_{Objekt} > (v + v_{Hysterese})))$; $TO2: (v_{Objekt} < v_{Mensch}) \vee (v_{Objekt} < v)$; v_{Mensch} : vom Fahrer vorgegebene Wunschgeschwindigkeit.

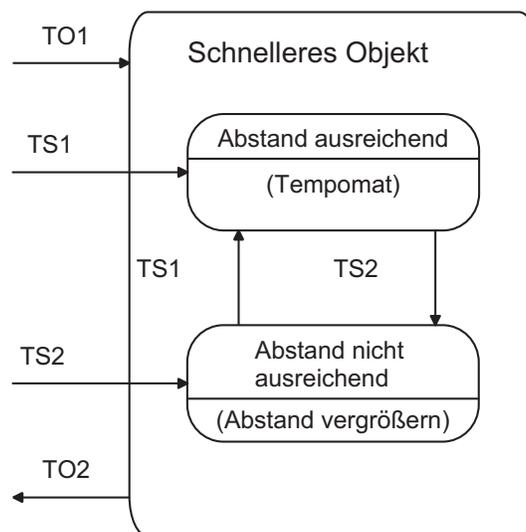


Abbildung 6.7: Zustandskarte Längsführung, Ausschnitt: Automat für schnelleres Objekt. Übergangsbedingungen TSN: $TS1: d \geq (d_{Regelung} + d_{Hysterese})$; $TS2: d < d_{Regelung}$.

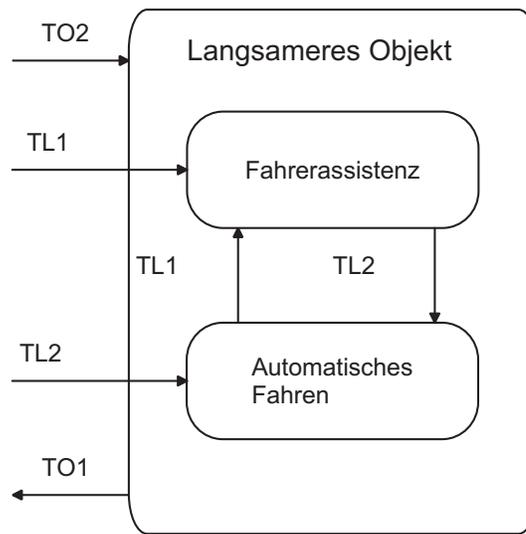


Abbildung 6.8: Zustandskarte Längsführung, Ausschnitt: Automat für langsames Objekt. Übergangsbedingungen TLN: TL1: $d < d_{min, Maschine}$; TL2: $d \geq (d_{min, Maschine} + d_{Hysterese})$.

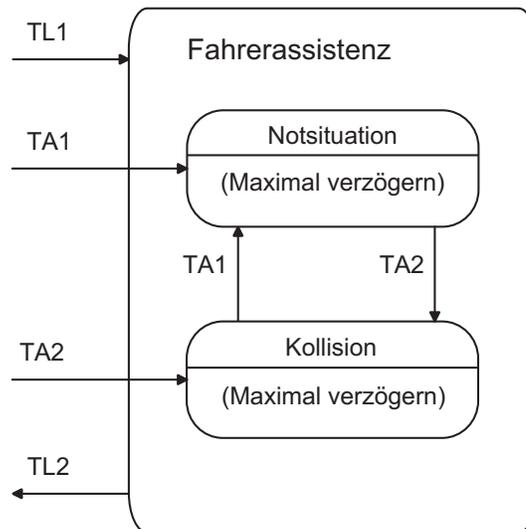


Abbildung 6.9: Zustandskarte Längsführung, Ausschnitt: Automat für Fahrerassistenz. Übergangsbedingungen TAN: TA1: $((d \geq d_{min, Mensch}) \vee (d < d_{min, Wahrnehmung})) \wedge \neg TA2$; TA2: $d < d_{min, Mensch}$.

Bei der ‘Fahrerassistenz’ wird zwischen einer ‘Notsituation’ und der ‘Kollision’ unterschieden (Abbildung 6.9). In der ‘Notsituation’ sollte der Fahrer aufgrund seiner im System repräsentierten Fähigkeiten noch in der Lage sein, das Fahrzeug abzubremesen. Als Übergangsbedingungen werden verschiedene Abstände berechnet. Der Abstand $d_{min,Mensch}$ ist der Abstand zu einem vorausfahrenden Objekt, den der Mensch mindestens benötigt, um das Fahrzeug mit der betragsmäßig maximal möglichen Verzögerung $a_{min,Mensch}$ vor diesem auf die Objektgeschwindigkeit abzubremesen

$$d_{min,Mensch} = (2 * v * v_{Obj} - v_{Obj}^2 - v^2) / (2 * a_{min,Mensch}) \text{ für } v > v_{Obj}. \quad (6.2)$$

Der Abstand $d_{min,Maschine}$ ist der entsprechende bei Verzögerung mit der maximalen maschinellen Verzögerung $a_{min,Maschine}$:

$$d_{min,Maschine} = (2 * v * v_{Obj} - v_{Obj}^2 - v^2) / (2 * a_{min,Maschine}) \text{ für } v > v_{Obj}. \quad (6.3)$$

Dabei darf $d_{min,Maschine}$ nicht kleiner als der minimale Wahrnehmungsabstand $d_{min,Wahrnehmung}$ werden, der vom Wahrnehmungsmodul angegeben wird. Im Zustand ‘Kollision’ mit $d < d_{min,Mensch}$ wird es zu einer Kollision kommen, wenn die der Entscheidung zugrunde liegenden Annahmen richtig sind. In beiden Zuständen wird derzeit assistierend zum menschlichen Eingriff konstant mit der maximalen maschinell erlaubten Verzögerung gebremst. Längerfristig könnte diese Information auch dazu verwendet werden, um Sicherheitssysteme im Fahrzeug wie Gurtstraffer und Airbags vorausschauend zu steuern oder Ausweichmanöver einzuleiten.

Bei der automatischen Fahrt hinter einem langsameren Objekt, bei der $d \geq d_{min,Maschine}$ gilt, wird zwischen den Zuständen ‘Abstandsregelung’, ‘verzögerte Annäherung’ und ‘unverzögerte Annäherung’ unterschieden, in denen die Verhaltensweisen ‘(Abstandsregelung)’, ‘(Annähern)’ oder ‘(Tempomat)’ aktiviert werden (Abbildung 6.10). Als Übergangsbedingungen dienen wieder zwei Abstandsmaße. Der Abstand $d_{StarteAnnähern}$ ist der Abstand, bei dem die Verhaltensweise ‘(Annähern)’ mit der Verzögerung $a_{Annähern,Maschine}$ aktiviert werden muß, um bei konstanter Objektgeschwindigkeit im Sollabstand $d_{Regelung}$ mit der gleichen Geschwindigkeit wie das vorausfahrende Objekt zu fahren:

$$d_{StarteAnnähern} = (2 * v * v_{Obj} - v_{Obj}^2 - v^2) / (2 * a_{Annähern,Maschine}) + d_{Regelung} \quad (6.4) \\ \text{für } v > v_{Obj}.$$

Dabei hängt $d_{Regelung}$ vom sogenannten Zeitabstand T_{Fahrer} ab, den ein Fahrer von einem vorausfahrenden Fahrzeug hält:

$$d_{Regelung} = T_{Fahrer} * v_{Obj}. \quad (6.5)$$

Die Verzögerung $a_{Annähern,Maschine}$ und damit auch der Abstand $d_{StarteAnnähern}$ ist eine Funktion der vorgegebenen Optimierungskriterien. Soll die Verhaltensweise zeitoptimal

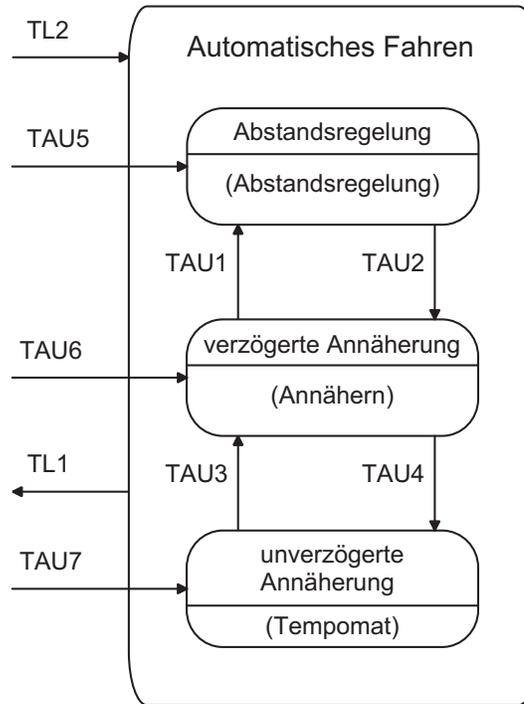


Abbildung 6.10: Zustandskarte Längsführung, Ausschnitt: Automat für automatisches Fahren. Übergangsbedingungen TAUN: TAU1: $(d < d_{Regelung}) \vee (v < v_{obj})$; TAU2: $(d > (d_{Regelung} + d_{Hysterese})) \wedge (v_{Obj} \leq (v + v_{Hysterese}))$; TAU3: $d \leq d_{StarteAnnähern}$; TAU4: $d > (d_{StarteAnnähern} + d_{Hysterese})$; TAU5: $(d < d_{Regelung}) \vee (v < v_{Obj})$; TAU6: $\neg TAU5 \wedge \neg TAU7$; TAU7: $d > d_{StarteAnnäherung}$.

ausgeführt werden, so wird der Zustand ‘verzögerte Annäherung’ später angenommen als bei komfortorientierter Fahrweise. Für $d_{Regelung}$ muß immer gelten

$$d_{Regelung} > d_{min,Wahrnehmung}. \quad (6.6)$$

Das Beispiel des ‘adaptiven Tempomaten’ zeigt, wie komplexe regelbasierte Systeme im vorgestellten Ansatz zur flexiblen Automatisierung in das Gesamtsystem integriert werden können.

Teil III

Hardware-spezifische Realisierungen und Ergebnisse

Kapitel 7

Systembeschreibung auf der hardware-spezifischen Ebene

In Teil II wurde das ‘System zur flexiblen Automatisierung von Kraftfahrzeugen’ unabhängig von der Hardware diskutiert. Dadurch sollte vermieden werden, Speziallösungen für eine bestimmte Fahrzeug- oder Rechnerplattform zu formulieren. Dennoch ist diese Arbeit, wie bereits in der Einleitung ausgeführt, im Kern eine experimentelle. Die Theorie zur flexiblen Automatisierung wurde abstrahiert aus den langjährigen Erfahrungen im Betrieb sehender, autonomer Fahrzeuge.

In der Systemarchitektur wurden die hardware-spezifischen Systemaspekte in einer eigenen Ebene zusammengefaßt, ohne daß diese Ebene bisher genauer spezifiziert werden konnte. In diesem Kapitel wird daher die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Hardware beschrieben. In Abschnitt 7.1 ist der Aufbau der Versuchsfahrzeuge dargestellt, in Abschnitt 7.2 die Architektur der Rechner und der Prozesse. In Kapitel 8 werden ausgewählte mit dieser Hardware erzielte Ergebnisse diskutiert, die die Leistungsfähigkeit des Systems zeigen.

7.1 Versuchsfahrzeuge für autonome Mobilität und Rechnersehen

Die Entwicklung des dynamischen, maschinellen Sehens am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik erfolgte von Anfang an mit dem Ziel, dieses zur Bewegungssteuerung von Fahrzeugen und Robotern einzusetzen (vgl. Abschnitt 1.2). Die Tragfähigkeit der Ansätze konnte mit Hilfe von Versuchsträgern überzeugend nachgewiesen werden, die mangels kommerzieller Verfügbarkeit weitgehend selbst entwickelt wurden. Das **V**ersuchsfahrzeug für **a**utonome **M**obilität und **R**echnersehen (VaMoRs, Abbildungen 7.1 und 7.2), ein Mercedes-Kastenwagen DB 508 (Baujahr 1983), war eines der ersten Fahrzeuge, das mit Rechnersehen automatisch geführt wurde (Dickmanns & Zapp 1986; Zapp 1988; Brüdigam 1994; Müller 1996).



Abbildung 7.1: VaMoRs - Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen



Abbildung 7.2: VaMoRs: Innenansicht

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Mercedes S-Klasse-Fahrzeug der Baureihe W-140 (Baujahr 1992) zu einem 'VaMoRs' umgebaut (Abbildung 7.3). Zur Unterscheidung von dem Vorgängerfahrzeug wird der PKW mit einem zusätzlichen **-P** gekennzeichnet. Mit **VaMoRs-P** oder kurz **VaMP** wurde der Nachweis erbracht, daß autonomes Fahren mittels Rechnersehen auch in Personenkraftwagen möglich ist. Erste Testfahrten mit maschinellem Sehen konnten im Juli 1994 auf dem Versuchsgelände der Universität der Bundeswehr durchgeführt werden. Bei der Abschlußdemonstration von 'Prometheus' (Abschnitt 1.2.2) fuhr VaMP als offizielles Demonstrationsfahrzeug automatisch im dreispurigen Autobahnverkehr (Abschnitt 7.2.1, Dickmanns et al. 1994). Im Juli 1995 wurde das Fahrzeug offiziell für die Fahrt auf öffentlichen Autobahnen zugelassen.

Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz wurde auch im Kastenwagen erprobt. Dazu mußte der Fahrzeugaufbau von VaMoRs so modifiziert werden, daß Längs- und Querverführung voneinander unabhängig aktiviert werden können.¹ Experimentelle Ergebnisse mit VaMoRs werden in Abschnitt 8.2 diskutiert.

7.1.1 Aufbau des Versuchsfahrzeugs VaMP

Das Versuchsfahrzeug VaMP wurde wie auch Vita II (Abschnitt 2.3.3, Ulmer 1994) gemeinsam mit Daimler-Benz konzipiert und teilweise in der Daimler-Benz Forschungswerkstatt in Stuttgart-Untertürkheim umgerüstet. Ein wichtiges Argument der Kritiker der Automatisierung von Fahrfunktionen im Kraftfahrzeug mit Rechnersehen - daß man einen Lastkraftwagen bräuchte, um die notwendige Ausrüstung zu transportieren - konnte mit Hilfe von VaMP widerlegt werden. Seit seiner Umrüstung bot VaMP mehr

¹Der Fahrzeugumbau wurde von K.-H. Siedersberger im März 1999 konzipiert und durchgeführt.



Abbildung 7.3: VaMP - Ein PKW als Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen

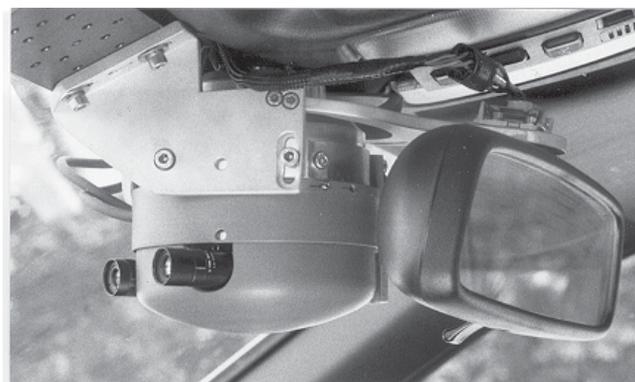


Abbildung 7.4: Bifokale Kameraanordnung für die Vorausschau in VaMP (1994 - 1998)

Platz für Rechnerhardware, als jemals genutzt wurde. Elektrische Leistung war nach dem Einbau einer zusätzlichen Lichtmaschine mit 24V ausreichend vorhanden.

Für den PKW wurden Plattformen zur aktiven Blickrichtungssteuerung entwickelt, die der Anforderung der Automobilindustrie nach Kompaktheit Rechnung tragen. Um die Plattformgröße zu beschränken, wurde auf einen Antrieb in der Nickachse verzichtet. Abbildung 7.4 zeigt eine bifokale Kameraanordnung, die von 1994 - 1998 mit den transputer-basierten Bildverarbeitungssystemen (Abschnitte 7.2.1 und 7.2.2) betrieben wurde (Schiehlen 1995). Seit 1999 wird die kompakte Variante von MarVEye mit vier Kameras eingesetzt (Abschnitt 1.2, Abbildungen 7.5 und 7.6, Dickmanns 1995b). Mit den Kameraplattformen können schnelle Blickzuwendungen (Sakkaden), inertielle Stabilisierungen oder Blickfixierungen ausgeführt werden (Schiehlen 1995).

In Abbildung 7.7 ist der Einbauort einiger Zusatzeinrichtungen im Versuchsfahrzeug skizziert. Die Ziffern (1-3) deuten den Einbauort der elektronisch ansteuerbaren Aktuatoren Lenkung (1), Bremse (2) und Drosselklappe (3) an (vgl. Abschnitt 7.1.2). Ziffer (4) markiert den Einbauort für die vordere Plattform zur aktiven Blickrichtungssteuerung. Die Plattform wurde auf die Windschutzscheibe, die bei der Baureihe W-140 als tragendes Teil hohe Lasten aufnehmen kann, aufgeklebt (siehe auch Abbildung 7.4). Je nach Aufgabe kann VaMP mit einer zweiten Kameraplattform für den rückwärtigen Raum ausgerüstet werden (5). Neben den Kameras verfügt VaMP über zusätzliche Inertialsensoren: Drei orthogonale Beschleunigungsaufnehmer sind in der Nähe des Schwerpunktes angebracht (9), drei orthogonale Winkelratengeber können entweder im Kofferraum (10) oder auf dem rechten Rücksitz (8) befestigt werden. Nicht eingezeichnet sind der Einbauort einer GPS-Antenne, die wie im Serienfahrzeug auf dem



Abbildung 7.5: Multifokale Kameraanordnung für die Vorausschau in VaMP (Einbau und Seitenansicht); seit 1999

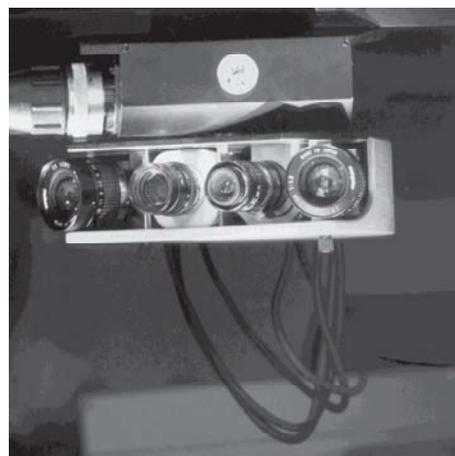


Abbildung 7.6: Multifokale Kameraanordnung für die Vorausschau in VaMP (Frontansicht)

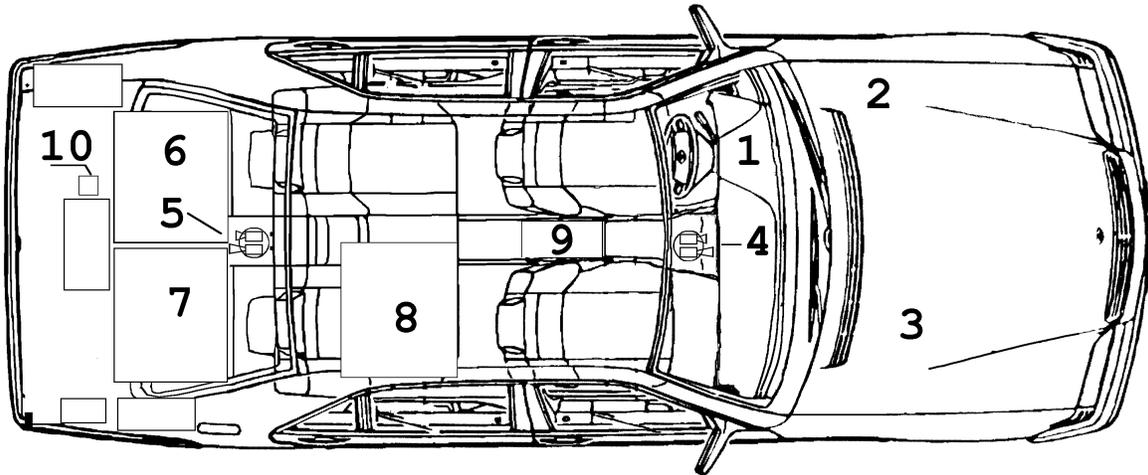


Abbildung 7.7: Zusatzeinrichtungen für die Automatisierung von Fahrfunktionen in VaMP



Abbildung 7.8: Rechnerausrüstung im Kofferraum von VaMP



Abbildung 7.9: Zusätzliches Rechnerregal auf der Rückbank von VaMP

Kofferraumdeckel montiert ist und eines Radarsystems, das seit Ende 1998 im vorderen Stoßfänger untergebracht ist.

Im Kofferraum von VaMP sind zwei Rechnerregale in 19"-Technologie untergebracht, die je 8 Höheneinheiten Platz bieten (6 und 7). Im Schwesterfahrzeug Vita II (Abschnitt 2.3.3) wurden darin alle notwendigen Rechner zur Automatisierung von Fahrfunktionen untergebracht. Um Experimente zu erleichtern, wurde im Versuchsfahrzeug VaMP die Rückbank ausgebaut und durch einen Einzelsitz auf der linken Seite ersetzt (Abbildung 7.9). An diesem Arbeitsplatz findet der Bediener Monitore vor, auf denen er den Sta-

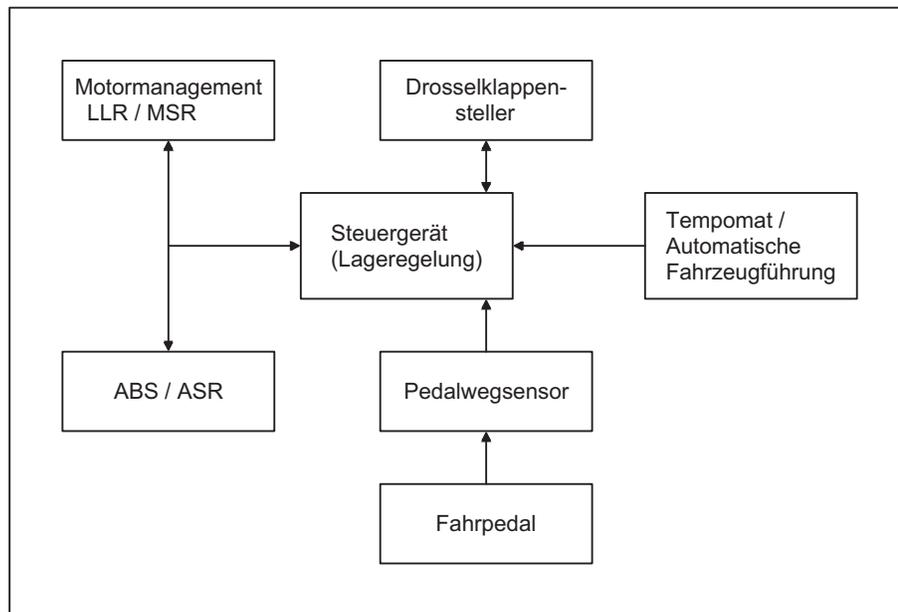


Abbildung 7.10: Elektronische Motorleistungssteuerung; LLR: Leerlaufregelung, MSR: Motorschleppmomentregelung, ABS: Antiblockiersystem; ASR: Antriebsschlupfregelung

tus des Systems analysieren und überwachen kann. Mittels Tastatur sind Korrekturen zur Laufzeit und auch kleinere Adaptionen im Programmcode möglich. Neben diesem Arbeitsplatz wurde ein zusätzlicher Rechnerschrank eingebaut, in dessen 12 Höheneinheiten in 19"-Technologie Rechner und Aufzeichnungsgeräte leicht zugänglich montiert werden können (8, Abbildung 7.9). Zusätzlich zur Innenraumklimatisierung verfügt VaMP über eine Klimaanlage im Kofferraum, die den Einsatz von thermisch empfindlichen Laborrechnern wie etwa dem TIP-Bussystem von Parsytec (Abschnitte 7.2.1 und 7.2.2) erlaubt.

7.1.2 Elektronisch ansteuerbare Stellglieder

Voraussetzung für die flexible Automatisierung von Fahrfunktionen sind Stellglieder, die unabhängig voneinander elektronisch angesteuert werden können. Das in dieser Arbeit entwickelte System zur automatischen Fahrzeugführung gibt als Stellgrößen den Drosselklappenwinkel, die Lenkrate und den Strom für das Stellventil im Bremskraftverstärker vor. Nur bei der Vorgabe des Stroms für das Stellventil im Bremskraftverstärker wird direkt auf den Aktuator zugegriffen. Bei der Ansteuerung von Lenkung und Bremse werden Führungsgrößen für unterlagerte Regelkreise vorgegeben. Im folgenden werden die elektronisch ansteuerbaren Stellglieder kurz beschrieben.

Abbildung 7.10 gibt einen Eindruck, welche komplexen Regelungen bereits im Serienfahrzeug ausgeführt werden, um die vom Menschen oder von der automatischen Fahrzeugführung vorgegebene Führungsgröße ‘Drosselklappenwinkel’ den Umweltgegebenheiten und dem aktuellen Zustand des Motors anzupassen (Lichnofsky & Ohnemüller 1992; Bosch 1995). Die Drosselklappenwinkel werden über einen serienmäßigen CAN-Bus (Controller Area Network, Kollmann et al. 1991; Bosch 1995) über die logische Adresse des Tempomaten in der Serienausstattung kommandiert.

Im Gegensatz zur elektronischen Drosselklappe ist die Bremse im Serienfahrzeug von 1992 noch nicht elektronisch ansteuerbar. In neueren Modellen, die über Bremsassistenten² oder adaptive Tempomaten³ verfügen, ist dies bereits möglich. VaMP wurde für die automatische Fahrzeugführung mit einem modifizierten Bremskraftverstärker ausgerüstet, in dem über ein zusätzliches vom Rechner ansteuerbares Stellventil Druck aufgebaut werden kann. Der aktuelle Bremsdruck wird mit einem Druckmesser am Hauptbremszylinder gemessen (Einzelheiten bei Siedersberger 1996b und Daimler-Benz Forschung, Esslingen).

Die Lenkung wird mit bürstenlosen Gleichstrommotoren angetrieben, die ohne Übersetzung direkt auf der Lenksäule befestigt wurden (Weiß 1993). Der Lenkwinkel wird mit einem eigenen Sensor gemessen. Vom Nutzer kann entweder ein Lenkwinkel oder eine Lenkrate vorgegeben werden (Weiß 1993; Göbel 1994).

7.1.3 Rechner zur Fahrzeugansteuerung

Der Rechner zur Ansteuerung des Versuchsfahrzeugs wurde gemeinsam mit Daimler-Benz und der Firma Hema entwickelt (Hema 1993). Der Rechner basiert auf Transputern, die für Echtzeitanwendungen besonders geeignet sind. Die Software wurde in C mit Hilfe eines INMOS-Transputer-Übersetzers realisiert (inmos 1992).

Abbildung 7.11 zeigt die Struktur des Ansteuerungsrechners: 32-bit Prozessoren (T-8xx) werden für rechenzeitintensivere Aufgaben, 16-bit Prozessoren (T-2xx) für Ansteuerungsaufgaben eingesetzt. Da Aktuatoren und Inertialsensoren transputergestützt angesteuert werden können, ergibt sich intern eine homogene Rechnerstruktur. Die Kommunikation zwischen den Prozessoren und die Kommunikation mit externen Rechnern erfolgt über die leistungsfähige RS-422 Schnittstelle. Die Aufgaben der einzelnen Prozessoren sind in Abbildung 7.12 skizziert. Die grau unterlegten Aufgaben wurden von Daimler-Benz, die anderen im Rahmen dieser Arbeit gelöst.

²Firmenname bei Daimler-Chrysler: *Brake Assist*, (Kiesewetter et al. 1997; Pickenhahn 1995)

³Firmenname bei Daimler-Chrysler: *Distronic*, (ika 1999)

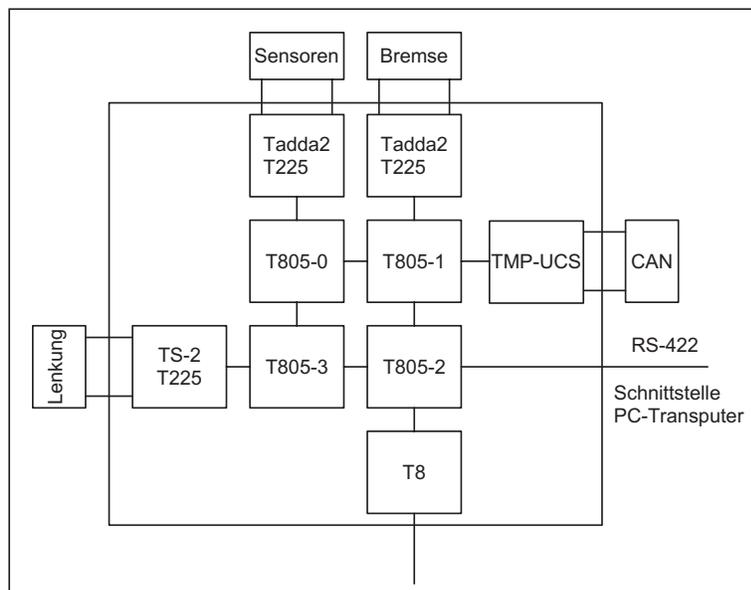


Abbildung 7.11: Rechner zur Fahrzeugansteuerung; T8xx: 32-bit Transputer, T2xx: 16-bit Transputer, (Hema 1993)

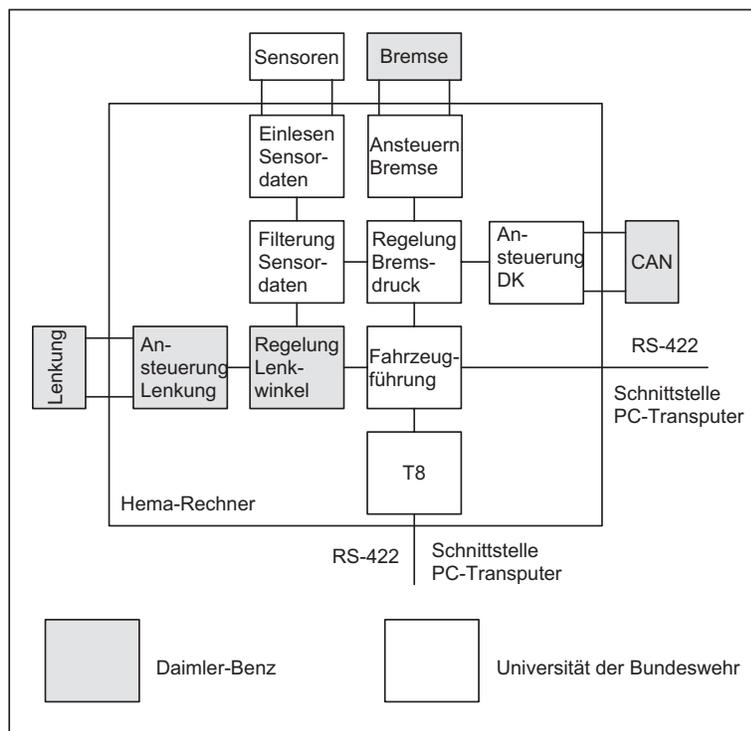


Abbildung 7.12: Aufgaben der einzelnen Prozessoren des Rechners zur Fahrzeugansteuerung, T8xx: 32-bit Transputer, DK: Drosselklappe

7.1.4 Regelkreisauslegung auf der hardware-spezifischen Ebene

Die Methodik zur Automatisierung von Fahrfunktionen, die in Kapitel 5 erläutert wurde, erlaubt strukturell eine weitgehend fahrzeugunabhängige Auslegung der Fahrzeugführung. Nur hardware-abhängige Steueraktivitäten und die Hardware-Ansteuerung, die auf der hardware-spezifischen Ebene zusammengefaßt werden, müssen für jeden Fahrzeugtyp neu angepaßt werden. Am Beispiel der Regelung des Bremsdrucks werden Charakteristika von Regelungen auf der hardware-spezifischen Ebene aufgezeigt.

Der entworfene Bremsdruckregler ist ein typisches Beispiel für einen hochfrequenten Regelkreis auf der hardware-spezifischen Ebene (vgl. Abschnitt 5.1.2). Wegen der starken Nichtlinearitäten wurden robuste Regler im Frequenzbereich entworfen, die außer dem gültigen Stellbereich kein explizites Modellwissen über die Regelstrecke benötigen. Mit der in Abbildung 7.13 abgebildeten Struktur zeigt der Regelkreis bei einer Zykluszeit von 4 ms gutes Führungsverhalten und geringe Totzeit bei der Sprungantwort (Abbildung 7.14, Siedersberger 1996b).⁴

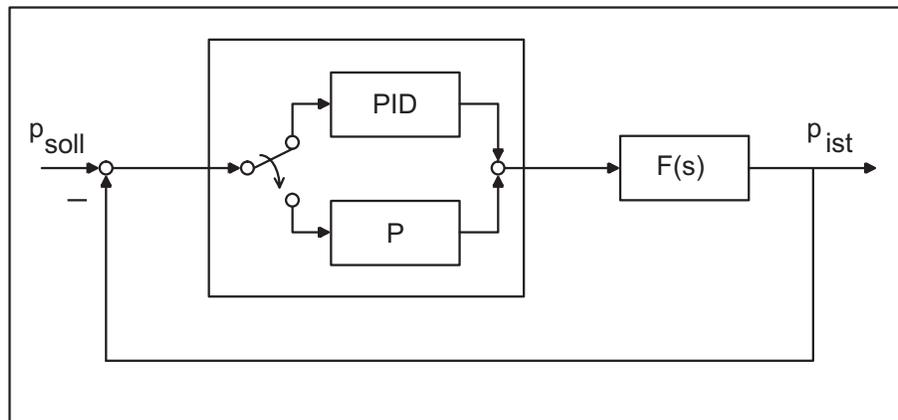


Abbildung 7.13: Blockschaltbild des Bremsdruckreglers; Reglerstruktur umschaltbar zwischen PID- und P-Regler; $F(s)$: Regelstrecke Bremsdruck

Die Übertragungsfunktion $F_R(s)$ für den Druckregler lautet

$$F_R(s) = \begin{cases} k_R \cdot \left(1 + sT_D + \frac{1}{sT_I}\right) & : \text{für } p_{\text{Differenz}} \leq 20 \text{ bar} \\ k_P & : \text{für } p_{\text{Differenz}} > 20 \text{ bar.} \end{cases} \quad (7.1)$$

Bereits in Abschnitt 5.4.2 wurde hergeleitet, daß die Ansprechzeit des Druckregelkreises t_{Druck} kleiner als 0.27 Sekunde sein sollte:

$$t_{\text{Druck}} < 0.27 \text{ Sekunden.} \quad (7.2)$$

⁴Streckenidentifikation und Reglerauslegung werden ausführlich in der Studienarbeit von Siedersberger (1996b) diskutiert.

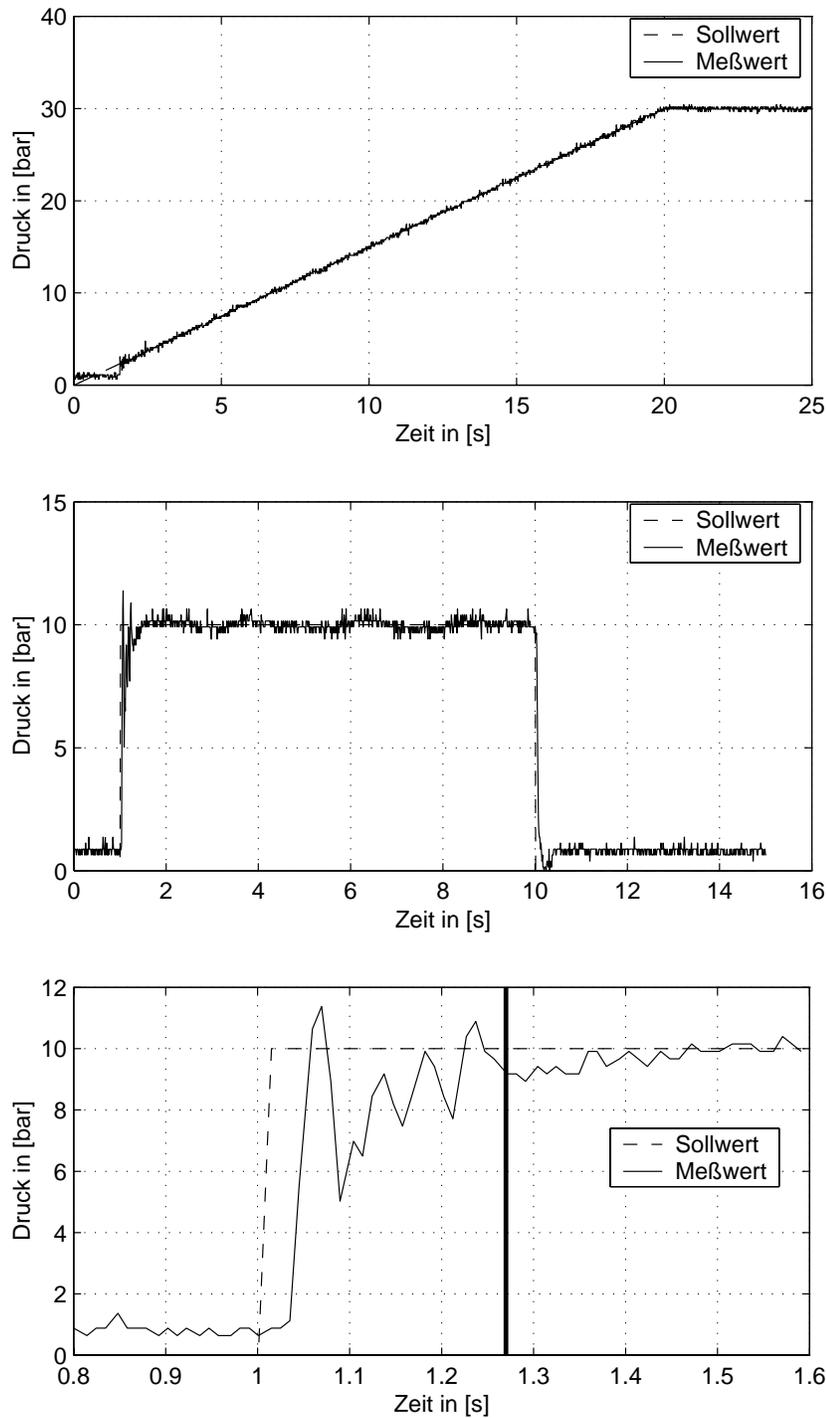


Abbildung 7.14: Rampen- und Sprungantwort des geregelten Bremssystems; PID-Regler: $k_R = 0.23$, $T_I = 250\text{ms}$, $T_D = 30\text{ms}$, Zykluszeit 4ms , Datenaufzeichnung unterabgetastet

untere Abbildung: Ausschnitt aus der Sprungantwort. Die Linie bei $t = 1.27\text{s}$ markiert den Zeitpunkt, zu dem die besten zwei Prozent der menschlichen Fahrer Bremsdruck aufbauen können. Die Daten wurden zur Aufzeichnung unterabgetastet.

Damit wäre das automatische Fahrzeugführungssystem schneller als 98% der Fahrer, und dies sogar in für die Maschine ungünstigen Fällen: Der Vergleich mit dem menschlichen Fahrer ist für das automatische Fahrzeug am schwierigsten bei geringen Bremsdrücken, die der menschliche Fahrer aufgrund des kürzeren Pedalwegs schneller aufbauen kann, während die Maschine wegen der nichtlinearen Eigenschaften des Bremsdruckverstärkers langsamer ist als bei hohen Druckwerten. Abbildung 7.14 zeigt das Einschwingen des Druckreglers auf einen geringen Sollruck von 10bar. Zum Zeitpunkt $t = 1s$ erfolgt die Vorgabe des Sprungs; der Zeitpunkt $t = 1.27s$ markiert den Zeitpunkt, bis zu dem die besten zwei Prozent der menschlichen Fahrer einen Druckaufbau erreichen könnten.

7.2 Rechner und Prozesse

Die Entwicklung des maschinellen Sehens ist eng verknüpft mit der Entwicklung leistungsfähiger Rechner. In den achtziger Jahren konnten Anwendungen in dynamischer Umgebung in Echtzeit nur realisiert werden, wenn die verfügbare Rechenleistung wie im 4D-Ansatz (Abschnitt 1.2, Dickmanns 1997b) effizient genutzt wurde. Da Einzelprozessoren nicht leistungsfähig genug waren, wurden parallele Rechnerarchitekturen eingesetzt. Die Systemarchitekturen wurden durch die Rechnerarchitekturen stark geprägt. Durch den Zuwachs an Rechen- und Kommunikationsleistung gingen die durch die Hardware gegebenen Beschränkungen in den neunziger Jahren zurück.

In diesen Zeitraum fallen die drei im Rahmen dieser Arbeit im Versuchsfahrzeug VaMP eingesetzten Systeme, die im folgenden kurz vorgestellt werden sollen. Das erste System, das im Rahmen des Projektes ‘Prometheus’ (Abschnitt 1.2.2) entwickelt wurde, basiert auf einem homogenen Netzwerk aus etwa 60 Prozessoren (Abschnitt 7.2.1, Dickmanns et al. 1994). Durch den Einsatz von PowerPC-Prozessoren 601⁵ wurde im Projekt ‘Cleopatra’ (Abschnitt 1.2.2) die Rechenleistung einzelner Knoten erhöht und die Anzahl der Prozessoren bei steigender Rechenleistung im Gesamtsystem reduziert (Abschnitt 7.2.2, Maurer et al. 1996a). Mit beiden Systemen wurden Pionierleistungen auf dem Gebiet des automatischen Fahrens auf Autobahnen erbracht (Abschnitt 8.1, Dickmanns et al. 1994; Maurer et al. 1996a).

Der Vergleich mit menschlichen Fahrern zeigte aber auch, daß das System für das automatische Fahren dem Menschen in vielen Belangen unterlegen war. Zum einen war die Leistungsfähigkeit in grundlegenden Fähigkeiten geringer als beim Menschen, zum anderen waren diese Systeme maßgeschneidert auf eine Aufgabe eines bestimmten Fahrzeuges in einer bekannten Domäne. Ziel der seit 1996 neu entwickelten flexiblen Automatisierung mit dem EMS-Wahrnehmungssystem (Abschnitt 1.2) ist es, diese Defizite zu reduzieren. Erste Ergebnisse mit dem System werden in Abschnitt 8.2 diskutiert.

⁵Die PowerPC-Prozessoren sind eine Entwicklung der Firma Motorola.

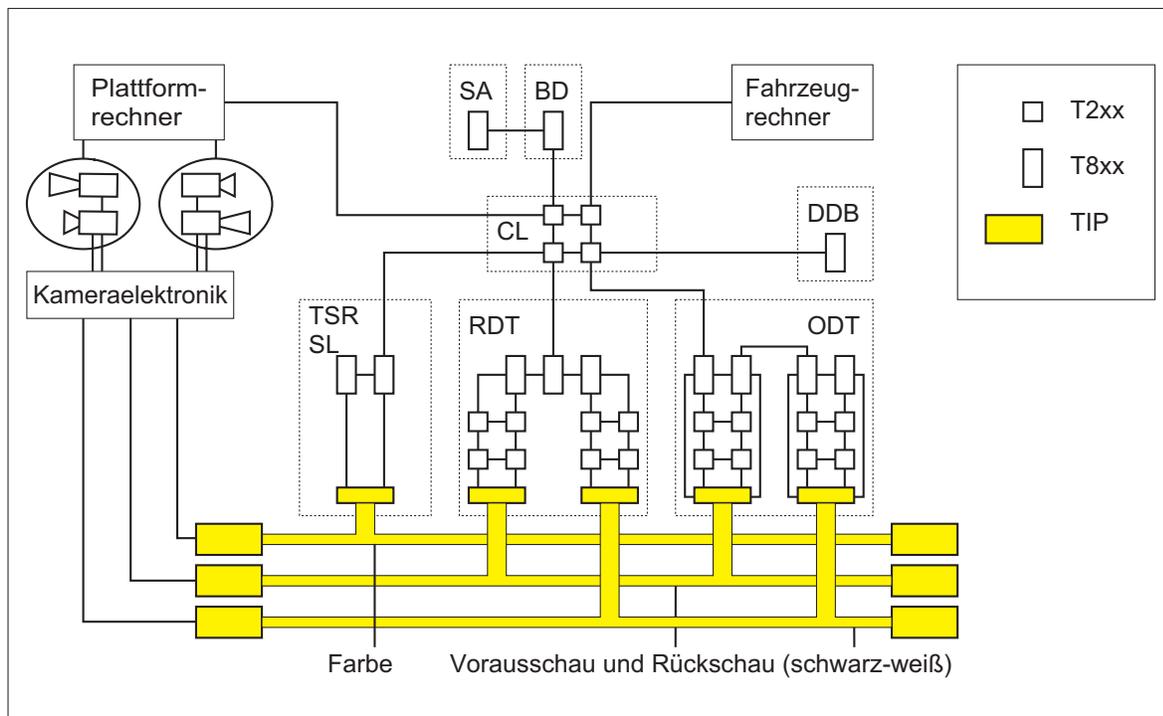


Abbildung 7.15: Transputer-basiertes System zur visuellen Wahrnehmung; SA: Situation Assessment, Situationserfassung, BD: Behaviour Decision, Verhaltensentscheidung, CL: Communication Layer, Kommunikationsschicht, DDB: Dynamic Data Base, Dynamische Datenbasis, TSR: Traffic Sign Recognition, Verkehrszeichenerkennung, SL: Signal Lights, Rückleuchtererkennung, RDT: Road Detection and Tracking, Straßenerkennung, ODT: Obstacle Detection and Tracking, Hinderniserkennung, TIP Bus: Transputer Image Processing Bus, transputer-gestützter Bildverarbeitungsbus, T2xx und T8xx: 16- und 32-bit-Transputer

7.2.1 Transputer-basiertes System zur visuellen Wahrnehmung

Mit einem transputer-basierten System zur visuellen Wahrnehmung (Abbildung 7.15, Dickmanns et al. 1994) konnten im Versuchsfahrzeug VaMP 1994 und 1995 bereits wesentliche Fähigkeiten zur automatischen Fahrzeugführung auf Autobahnen realisiert werden. VaMP wurde mit je einer bifokalen Kameraanordnung (Abschnitt 1.2, Abschnitt 7.1.1) für den Vorausschaubereich und für den rückwärtigen Raum ausgerüstet, die jeweils auf einer Einachsenplattform zur aktiven Blickrichtungssteuerung montiert wurde. Die Kamerabilder wurden über einen transputer-gestützten Bildverarbeitungsbus (Transputer Image Processing, TIP⁶) an die Transputer zur Objekterkennung verteilt und von spezialisierten Wahrnehmungsprozessen zur Fahrspurerkennung (RDT, Abschnitt 3.3, Behringer 1996) und zur Erkennung von Fremdfahrzeugen (ODT, Ab-

⁶Der TIP-Bus ist eine Entwicklung der Firma Parsytec, Aachen.

schnitt 3.3, Thomanek 1996) ausgewertet. Alle 40 ms schätzte RDT den Eigenzustand relativ zur Fahrbahn und die horizontale und vertikale Fahrbahnkrümmung (Behringer 1994). Die doppelte Zykluszeit benötigte ODT, um in einem Bereich von 6m - 120m Entfernung bis zu fünf Fahrzeuge zu erkennen (Dickmanns et al. 1994). Zusätzlich bestand die Möglichkeit, eine *Rückleuchtererkennung* (*Signal Lights*, SL, Tsinas 1996) oder eine *Verkehrszeichenerkennung* (Zheng et al. 1994; Estable et al. 1994; Ritter 1996) ins System einzubinden. Die Module zur *Situationserfassung* und *Verhaltensentscheidung*, die bereits in Abschnitt 6.1.3 diskutiert wurden, gaben Spurwechselempfehlungen (Kujawski 1995). Man beachte, daß sich diese Module trotz Namensgleichheit in ihrem Funktionsumfang wesentlich von den in dieser Arbeit vorgestellten unterscheiden (Abschnitt 6.2, Abbildung 6.1).

Die notwendige Rechenleistung für die maschinelle Wahrnehmung, die Plattformsteuerung und die Fahrzeugansteuerung wurde von ungefähr 60 Transputern erbracht, die über RS 422-Schnittstellen verbunden waren. Die Prozesse kommunizierten über sogenannte virtuelle Kanäle (inmos 1992) direkt miteinander oder über die *dynamische Datenbasis* (*Dynamic Data Base*, DDB, Dickmanns et al. 1994). Über die Datenbasis konnten im Versuchsfahrzeug Vita II (Abschnitt 2.3.3, Ulmer 1994), das ebenfalls mit dem transputer-basierten System zur visuellen Wahrnehmung ausgerüstet wurde, zusätzliche Systeme eingebunden werden (z.B. Abschnitt 2.3.2, Bohrer et al. 1995).

Die Versuchsfahrzeuge VaMP und Vita II zeigten auf der Abschlußdemonstration von 'Prometheus' im Norden von Paris über 1000 km automatische Längs- und Querführung auf dem Autobahnteilstück Senlis - Parc Asterix im normalen Autobahnverkehr, wobei Spurwechsel vom menschlichen Fahrer eingeleitet wurden. Während der Fahrten wurden im automatischen Betrieb Geschwindigkeiten bis 130 km/h, der Höchstgeschwindigkeit auf französischen Autobahnen, erreicht.

Auch wenn die in Paris von VaMP und Vita II gezeigten Fähigkeiten bis dahin weltweit unerreicht waren, so waren die Versuchsfahrzeuge in vielen Belangen der Leistungsfähigkeit menschlicher Fahrer unterlegen. Wichtigste Ursache dafür war die fehlende Rechenleistung. Mit der eingesetzten Rechnerhardware konnten trotz der Effizienz des 4D-Ansatzes (Abschnitt 1.2, Dickmanns 1997b) in Echtzeit lediglich kantenbasierte Verfahren zur Merkmalsextraktion und sehr einfache Formmodelle eingesetzt werden. Dies führte besonders bei der Erkennung von Fremdfahrzeugen zu einer unbefriedigenden Zuverlässigkeit. Das eingebettete System mit 60 Transputern war nur schwer zu handhaben, die Entwicklungsumgebung ungeeignet für Softwareprojekte dieser Größe. Die Konfiguration der Prozesse mußte zur Zeit des Übersetzens festgelegt werden. Änderungen zur Laufzeit waren nicht mehr möglich. Das System war in hohem Maße auf die Aufgabe 'Fahren auf der Autobahn' spezialisiert, wobei Domänenwissen vielfach implizit kodiert wurde.

Die Entwicklung einer Entscheidungsinstanz befand sich erst in den Anfängen. Die Vorgängermodule der *Situationsanalyse* und der *Verhaltensentscheidung* beschränkten sich auf Spurwechselempfehlungen. Das Potential der aktiven Blickrichtungssteuerung konnte mangels Aufmerksamkeitssteuerung nicht genutzt werden. Die Aufgabe der *Überwachung der Leistungsfähigkeit* (Abschnitt 6.2.2) hatte der menschliche Fahrer

zu übernehmen. In der Diktion der in Abschnitt 3.3 entwickelten Systemarchitektur läßt sich zusammenfassen, daß die hardware-spezifische und die 4D-Ebene bereits ausgebaut waren, die regelbasierte und die wissensbasierte Ebene aber noch weitgehend fehlten.

7.2.2 Kompaktes Wahrnehmungssystem zur automatischen Fahrzeugführung

Durch den Einsatz von vernetzten Hochleistungsrechnern⁷ wurde im Rahmen des Projektes ‘Cleopatra’ ein kompaktes System entwickelt, das zuverlässiger als das Vorgängersystem arbeitete. Besonders die Erkennung von Fremdfahrzeugen profitierte von zusätzlicher Rechenleistung, die zum einen eine erhöhte Verarbeitungstaktrate von 25Hz, zum anderen die parallele Nutzung zweier unterschiedlicher Algorithmen zur Objekterkennung erlaubte (von Holt & Thomanek 1996; Maurer et al. 1996a).

Abbildung 7.16 zeigt ein kompaktes Wahrnehmungssystem für die Fremdfahrzeug- und Fahrspurerkennung in der Vorausschau des automatischen Fahrzeugs. Im Vergleich mit Abbildung 7.15 wird deutlich, daß die Komplexität des Systems durch den Einsatz von vernetzten Hochleistungsrechnern erheblich verringert werden konnte.⁸

Dieses System fuhr von 1995 bis 1998 mehrere tausend Kilometer automatisch quer- und längsgeführt auf europäischen Autobahnen. In der Fachwelt bekannt wurde die erste in der Literatur diskutierte Langstreckenfahrt mit automatischer Quer- und Längsführung von München nach Odense in Dänemark (Abschnitt 8.1, Maurer et al. 1996a; Behringer & Maurer 1996). Der leistungsfähigere Rechner vereinfachte die Handhabung des Systems und erhöhte die Robustheit. Die strukturelle Kritik am Vorgängersystem gilt jedoch auch für das kompakte Wahrnehmungssystem.

7.2.3 Maschinelle Wahrnehmung und Verhaltensentscheidung mit Personalcomputern

Aufgrund der Erfahrungen mit den Vorgängersystemen wurde 1996 ein neues Wahrnehmungssystem spezifiziert, das mindestens drei Schwarzweißvideostrome und einen Farbvideostrom in Echtzeit auswerten sollte. Die Rechenleistung des Systems sollte flächenhafte Bildverarbeitung ermöglichen. Die Prozesse sollten zur Laufzeit frei konfigurierbar sein. Ein neuer Schwerpunkt lag auf der Realisierung von regelbasiertem Verhalten (Abschnitt 3.3, Kapitel 6). Als Voraussetzung für verantwortliches Handeln

⁷Als vernetzte Hochleistungsrechner (High Performance Computing and Networking, HPCN) wurden PowerPCs 601 der Firma Motorola eingesetzt, die mit Hilfe von Transputern kommunizierten.

⁸Beim Vergleich des transputer-basierten Systems (Abbildung 7.15) und des kompakten Wahrnehmungssystems (Abbildung 7.16) ist darauf zu achten, daß letzteres über einen geringeren Funktionsumfang und über nur einen Bildverarbeitungsbus für Schwarzweißbilder in der Vorausschau verfügt. Dennoch ersetzt ein MPC für RDT oder ODT im kompakten System fünf Transputer des Vorgängersystems.

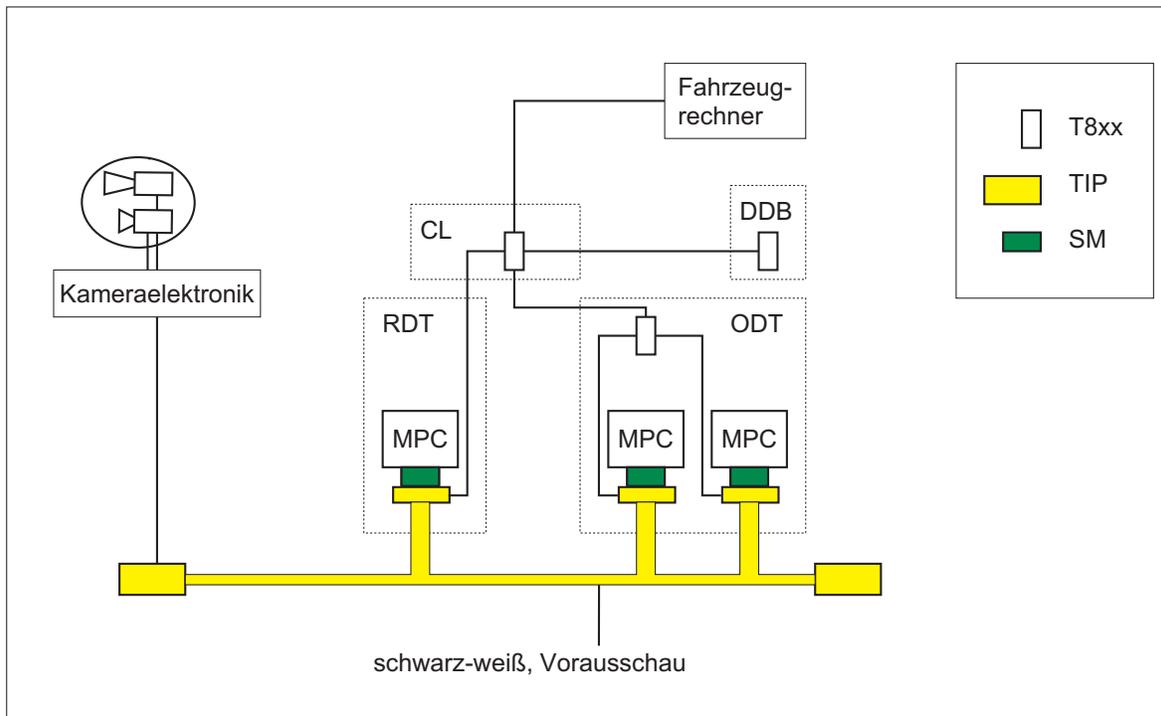


Abbildung 7.16: Ein kompaktes Wahrnehmungssystem zur automatischen Fahrzeugführung; MPC: Motorola PowerPC, TIP Bus: Transputer Image Processing Bus, transputer-gestützter Bildverarbeitungsbus, T8xx: 32-bit Transputer, SM: Shared Memory, gemeinsamer Speicher, CL: Communication Layer, Kommunikationsschicht, DDB: Dynamic Data Base, Dynamische Datenbasis, RDT: Road Detection and Tracking, Straßenerkennung, ODT: Obstacle Detection and Tracking, Hinderniserkennung;

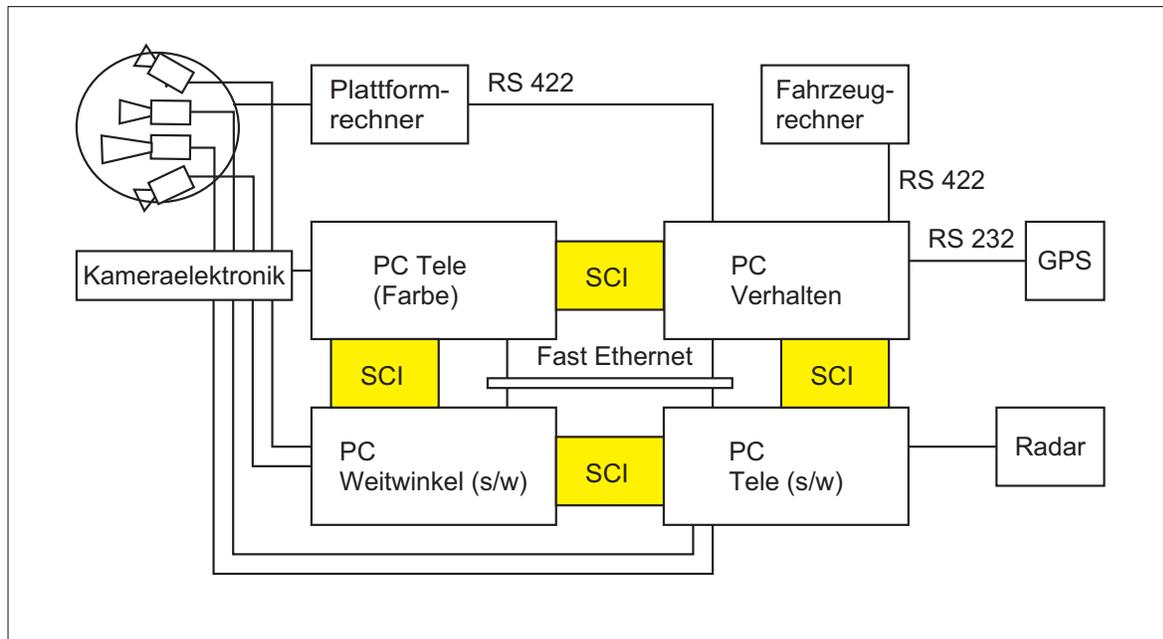


Abbildung 7.17: Maschinelles Wahrnehmungssystem mit Personalcomputern; PC: Personal Computer, GPS: Global Positioning System, Globales Positionierungssystem, SCI: Scalable Coherent Interface, Skalierbare kohärente Schnittstelle, s/w: schwarz/weiß

sollte das System in der Lage sein, die eigene Leistungsfähigkeit zu überwachen. Das System war so zu entwerfen, daß es unabhängig von der Domäne, von der Aufgabe und von einem speziellen Fahrzeug in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden kann.

Nicht zuletzt aus Kostengründen wurde als Hardwarebasis mit dem Personal Computer der Rechner des Massenmarktes, mit dem Betriebssystem WindowsNT das des Marktführers ausgewählt. Abbildung 7.17 zeigt die Hardware für das maschinelle Wahrnehmungssystem. Das System besteht aus vier leistungsfähigen Personal Computern,⁹ die mit Hilfe einer skalierbaren kohärenten Schnittstelle¹⁰ zu einem Ring verbunden sind. Zur Kommunikation mit einem zusätzlichen Fileserver sind die Rechner über Fast Ethernet¹¹ miteinander verbunden. Drei Rechner, die zur Bildverarbeitung eingesetzt werden, sind mit Framegrabbern¹² zum Bildeinzug ausgerüstet. Über den vierten Rechner kommuniziert das PC-System mit den Subsystemen zur Fahrzeugansteuerung

⁹Dual Pentium II Rechner mit einer Taktrate von 333 und 450 MHz, Stand: September 1999.

¹⁰Scalable Coherent Interface, SCI, IEEE std. 1596-1992 (Giacomini et al. 1999). Persönliche Kommunikation mit S. Fürst, September 1999.

¹¹Fast Ethernet, IEEE std. 802.3u-1995, Datenrate 100 Mbits/s.

¹²Die Framegrabber IM-PCI MVC 150/40 - PCI sind eine Entwicklung der Firma Imaging Technology Inc. (ITI).

(Abschnitt 7.1.3), zur Plattformansteuerung (Rieder 1998) und zum GPS (Globales Positionierungssystem, Global Positioning System). Das System ist frei skalierbar. Je nach Aufgabenstellung und Zielplattform können auch Systeme mit ein bis drei PCs aufgebaut werden.

Das PC-basierte System ist das erste System, das das MarVEye (Abschnitt 1.2, Abschnitt 7.1.1) nutzt. In den Versuchsfahrzeugen sind derzeit¹³ Kameraanordnungen mit vier Kameras im Einsatz, wobei die beiden äußeren nach dem MarVEye-Konzept auswärts schielen.¹⁴ Die Rechner sind Kamerabildern fest zugeordnet, damit die Kamerabilder nicht kommuniziert werden müssen (Abbildung 7.17).

Die Kommunikation im System findet auf der hardware-spezifischen Ebene überwiegend über gemeinsamen Speicher ('shared memory') statt. Eine *Dynamische Objekt-datenbasis* (DOB, Rieder 1999) steht Prozessen auf den oberen Ebenen als Kommunikationsmedium zur Verfügung. In der Konfiguration nach Abbildung 7.18 verschickt jede DOB pro Zyklus eine Nachricht von 24 KB an alle anderen DOBs. Damit ergibt sich eine Datenrate über die skalierbare kohärente Schnittstelle von 1.8 MB/s (Rieder 2000). Der *Prozeßmanager*¹⁵ (PMan) startet oder beendet Prozesse nach Vorgaben des Nutzers oder der *Zentralen Entscheidungsinstanz* (Abschnitt 6.2). Dazu nutzt er die Dienste des *eingebetteten Personal Computers* (*embedded Personal Computer*, EPC, Baten 1997). Bildverarbeitungsprozesse haben über den *Bildeinzugsdienst* (*Grab Device Server*, GDS,¹⁶ Zugriff auf das Bild im Hauptspeicher.

Die Zuordnung der Prozesse zu den Rechnern wird in diesem System abhängig von den aktuellen Aufgaben flexibel vorgenommen. Abbildung 7.18 zeigt Rechner und Prozesse, wenn alle derzeit verfügbaren Prozesse gleichzeitig aktiv sind. Auf den drei Bildverarbeitungsrechnern stehen die Dienste GDS, EPC und DOB zur Verfügung, auf dem PC zur Verhaltensgenerierung zusätzlich der *Prozeßmanager*.

Die Wahrnehmungsprozesse werden so plaziert, daß sie Zugriff auf die für sie relevanten Kamerabilder haben. Bei der in Abbildung 7.18 dargestellten Konfiguration nutzt RDT das Videobild der Farbkamera mit (mildem) Teleobjektiv und die schielenden Schwarzweißkameras mit Weitwinkelobjektiv. Abhängig von der Domäne und den Umweltbedingungen kann zur Straßenerkennung ein flächenbasiertes (Lützeler & Dickmanns 1998) oder eine Weiterentwicklung des kantenbasierten Verfahrens (Hofmann 1999) eingesetzt werden. Der Prozeß zur Fremdfahrzeu-gerkennung ODT wertet die Schwarzweißsignale der Kameras mit den Teleobjektiven und die der schielenden Kameras aus. Die Fahrzeuge werden mit trinokularem Stereo, optischem Fluß oder

¹³Stand: Ende September 1999.

¹⁴Kameras in VaMoRs: Farbkamera (Dreichip, Firma Teli), Brennweite: 16 mm, Chipgröße: $\frac{1}{3}$ ", drei Schwarzweißkameras (Firma Teli), Brennweiten: einmal 25mm, zweimal 6mm, Chipgröße: $\frac{1}{3}$ ". Die 6mm-Kameras schielen auswärts.

Kameras in VaMP: Schwarzweißkamera (Firma Kohu), Brennweite: 50 mm, Chipgröße: $\frac{1}{2}$ ", Farbkamera (Dreichip, Firma Teli), Brennweite: 12.5 mm, Chipgröße: $\frac{1}{3}$ ", zwei schielende Farbkameras (Einchip, Firma Teli), Brennweite: 4.8 mm, Chipgröße: $\frac{1}{2}$ ".
Stand: 30. September 1999.

¹⁵Der *Prozeßmanager* wurde von R. Gregor entwickelt, Stand: September 1999.

¹⁶Der *Grab Device Server* wurde von M. Lützeler entwickelt, Stand: März 1999.

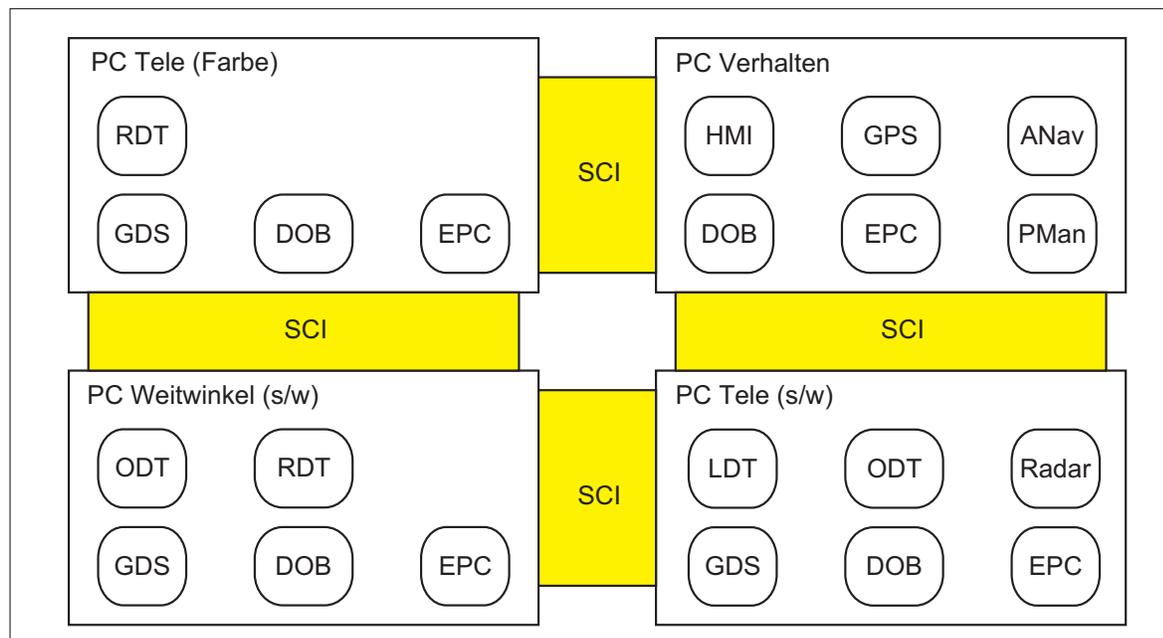


Abbildung 7.18: Konfiguration der Prozesse im maschinellen Wahrnehmungssystem mit Personalcomputern (Ausschnitt aus Abbildung 7.17); PC: Personal Computer, SCI: Scalable Coherent Interface, Skalierbare kohärente Schnittstelle, s/w: schwarz/weiß; RDT: Road Detection and Tracking, Straßenerkennung, ODT: Obstacle Detection and Tracking, Hinderniserkennung, EPC: Embedded Personal Computer, GDS: Grab Device Server, Einleseprozeß für den Bildeinzug, DOB: Dynamic Object Base, Dynamische Objektdatenbasis, LDT: Landmark Detection and Tracking, Landmarkenerkennung, HMI: Human Machine Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle, GPS: Global Positioning System, Globales Positionierungssystem, ANav: Autonomous Navigation, Autonome Navigation, PMan: Process Manager, Prozeßmanager.

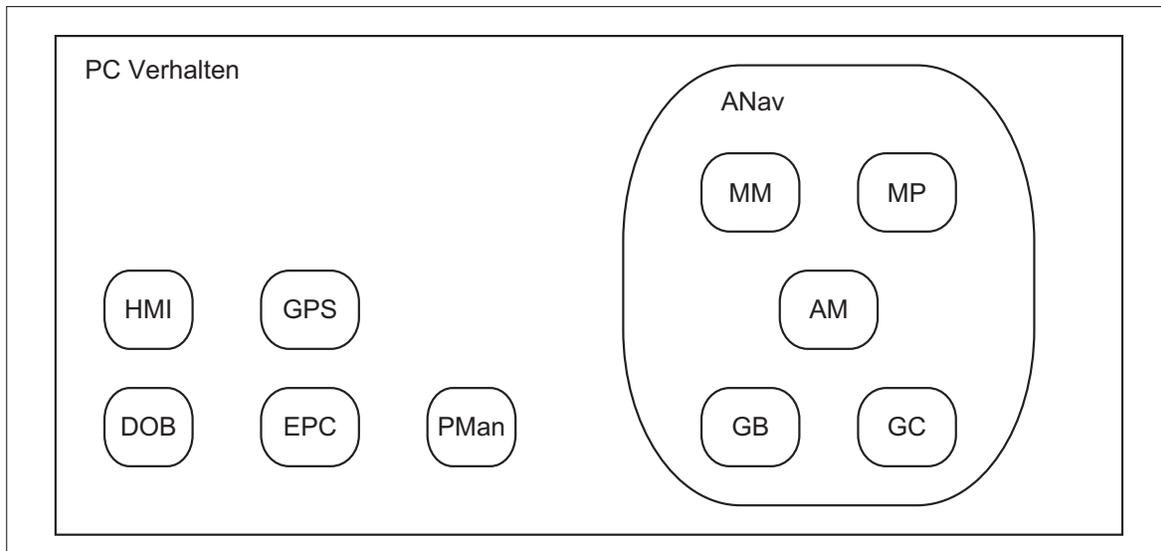


Abbildung 7.19: Konfiguration der Prozesse auf dem Rechner zur Verhaltensgenerierung (Ausschnitt aus Abbildung 7.18); PC: Personal Computer, HMI: Human Machine Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle, GPS: Dienst zum Einlesen der Daten des Globalen Positionierungssystem, DOB: Dynamic Object Base, Dynamische Objektdatenbasis, EPC: Embedded Personal Computer, PMan: Process Manager, ANav: Autonomous Navigation, Autonome Navigation, MM: Mission Monitoring, Missionsüberwachung, MP: Mission Planning, Missionsplanung, AM: Autonomous Mobility, Autonome Mobilität, GB: Gaze Behavior, Verhaltensentscheidung für die Blickrichtung, GC: Gaze Control, Blickrichtungssteuerung.

kantenbasierten Verfahren detektiert und verfolgt (Rieder 2000). Die Detektion der Fremdfahrzeuge kann bei entsprechender Ausrüstung des Fahrzeugs zusätzlich durch Radar gestützt werden. Dazu erhält ODT auf einem Rechner Zugriff auf das Radarsubsystem. Die Landmarkenerkennung LDT konzentriert sich auf das Signal der schwachen Telekamera (Gregor 1998). In dieser Konfiguration beträgt die Transferrate beim Einlesen der Bilder auf allen drei Bildverarbeitungsrechnern 10.98 MB/s.¹⁷

Als Dienste stehen auf dem PC Verhalten DOB, EPC, PMan und ein Einleseprozess für GPS zur Verfügung. Über die *Mensch-Maschine-Schnittstelle* (*Human-Machine-Interface*, HMI)¹⁸ kann der Nutzer den Grad der Automatisierung, Aufgaben oder Missionen vorgeben. Situationsgerechtes Verhalten wird von den Prozessen zur *Auto-*

¹⁷Die Datenrate (D), mit der der Framegrabber Bilder in den Hauptspeicher transferiert, errechnet sich aus dem Produkt der Anzahl der Pixel eines Bildes (B), der Anzahl der Bytes pro Pixel (P), der Anzahl der Kameras (N) und der Einlesefrequenz (F): $D = B * P * N * F$.

PC Tele (Farbe): $B = 384 \times 286$ Pixel, $P = 4$ Bytes/Pixel, $N = 1$, $F = 25$ Hz.

PC Weitwinkel (s/w) und PC Tele (s/w): $B = 768 * 286$ Pixel, $P = 1$ Byte/Pixel, $N = 2$, $F = 25$ Hz. Stand: September 1999.

¹⁸Die *Mensch-Maschine-Schnittstelle* wurde von F. Pieper entwickelt, Stand: September 1999.

nomen Navigation (ANav) generiert, die in Abbildung 7.19 näher aufgeschlüsselt sind.¹⁹ Die Aufgaben der Module *Missionsüberwachung* und *Missionsplanung* (Abschnitt 6.2, Abbildung 6.1, Gregor 1998) werden von den gleichnamigen Prozessen erfüllt. Der Prozeß *Verhaltensentscheidung für die Blickrichtung* (*Gaze Behavior*, GB) ist eine erste Implementierung der Module SAGA und BDGA.²⁰ Der Prozeß *Autonome Mobilität* verwaltet die Objekte für PM, SAL, CD, BDL und VC.²¹ In Abbildung 7.20 ist ein Ausschnitt aus der Klassenhierarchie innerhalb dieses Prozesses dargestellt. Innerhalb des Objekts für *Autonome Mobilität* haben die Objekte für PM, SAL, CD, BDL und VC Zugriff auf die zentrale interne Repräsentation des eigenen Fahrzeugs. Das Objekt für CD ist von den Objekten PM, SAL, BDL und VC abgeleitet und kann deren interne Zustände direkt verändern.²² Bei fortgeschrittener Integration werden die Prozesse zur *Autonomen Navigation* langfristig zu einem gemeinsamen Prozeß zusammengeführt. In der vorgestellten Vererbungshierarchie könnten die Objekte für MM, GB und GC²³ auf einer Ebene mit BDL, SAL, PM und VC angesiedelt werden.

Mit der vorgestellten Rechner- und Prozeßarchitektur wurde das in Teil II vorgestellte ‘System zur flexiblen Automatisierung von Kraftfahrzeugen’ realisiert. Die in Abschnitt 8.2 diskutierten Ergebnisse zeigen, daß damit ein tragfähiger Systementwurf für die Entwicklung von Automatisierungssystemen in Kraftfahrzeugen vorliegt.

¹⁹Die Notation in Abbildung 7.19 orientiert sich an der der Zustandskarten (Kap. 4, Harel 1987).

²⁰SAGA: *Situation Assessment for Gaze and Attention*, BDGA: *Behavior Decision for Gaze and Attention* (Abschnitt 6.2, Abbildung 6.1, Pellkofer 1999).

²¹PM: *Performance Monitoring* (Abschnitt 6.2.2), SAL: *Situation Assessment for Locomotion* (Abschnitt 6.2.3), CD: *Central Decision* (Abschnitt 6.2), BDL: *Behavior Decision for Locomotion* (Abschnitt 6.2.4) und VC: *Vehicle Control* (Kapitel 5).

²²Das dabei eingesetzte Prinzip der mehrfachen Vererbung mit abstrakten Basisklassen wurde in Abschnitt 4.2 (Abbildung 4.3) erläutert.

²³MM: *Mission Monitoring* (Abschnitt 6.2), GC: *Gaze Control* (Abschnitt 3.3).

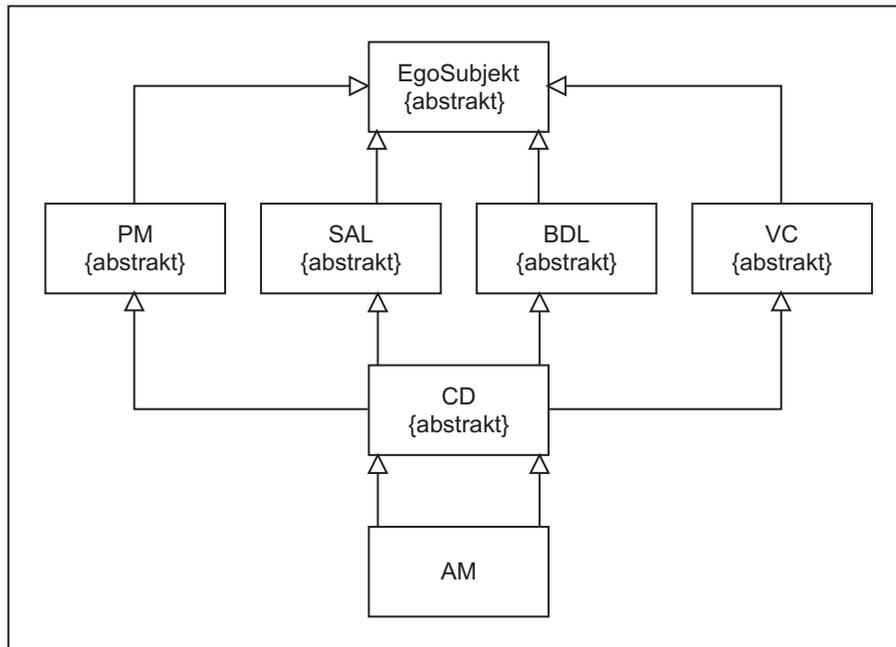


Abbildung 7.20: Ausschnitt aus der Klassenhierarchie innerhalb des Prozesses Autonome Mobilität; PM: Performance Monitoring, Überwachung der Leistungsfähigkeit, SAL: Situation Assessment for Locomotion, Situationserfassung für die Fortbewegung, BDL: Behavior Decision for Locomotion, Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung, VC: Vehicle Control, Fahrzeugführung, CD: Central Decision, Zentrale Entscheidungsinstanz, AM: Autonomous Mobility, Autonome Mobilität

Kapitel 8

Experimentelle Ergebnisse

Mit dem Versuchsfahrzeug VaMP wurden Ergebnisse demonstriert, die international Maßstäbe bei der Automatisierung von Fahrfunktionen gesetzt haben. Seit 1994 hat VaMP auf Autobahnen in Deutschland, Dänemark und Frankreich mehrere tausend Kilometer mit automatischer Quer- und Längsführung zurückgelegt (Abbildung 8.1). Zusammen mit Vita II (Abschnitt 2.3.3) war VaMP eines der Demonstrationsfahrzeuge auf der Abschlußdemonstration von ‘Prometheus’ (Abschnitt 1.2.2). Eine automatische Langstreckenfahrt, die mit dem kompakten Wahrnehmungssystem (Abschnitt 7.2.2) durchgeführt wurde, wird im folgenden Abschnitt quantitativ ausgewertet. Die Ergebnisse sind repräsentativ für die Leistungsfähigkeit der spezialisierten Systeme.¹ Der

¹Als spezialisierte Systeme werden das transputer-basierte System (Abschnitt 7.2.1, Abbildung 7.15) und das kompakte Wahrnehmungssystem (Abschnitt 7.2.2, Abbildung 7.16) bezeichnet.



Abbildung 8.1: Automatische Fahrt mit VaMP auf der Autobahn A99

in Teil II vorgestellte Ansatz zur flexiblen Automatisierung wurde mit dem aus Personalcomputern bestehenden Rechnersystem (Abschnitt 7.2.3) demonstriert, das seit Oktober 1999 zur Verfügung steht. Bereits während der ersten Versuchsfahrten wurde die Leistungsfähigkeit des langjährig optimierten Vorgängersystems erreicht und in den Projektschwerpunkten übertroffen.

8.1 Automatische Langstreckenfahrt

Als Beispiel und Höhepunkt der experimentellen Ergebnisse mit spezialisierten Systemen wird eine automatische Fahrt zu einem Projekttreffen im Rahmen von ‘Cleopatra’ (Kapitel 1.2.2) von München nach Odense (Dänemark) im November 1995 diskutiert.² Die Fahrt erfolgte bis auf kleinere Abschnitte überwiegend auf der Autobahn. Die automatische Querführung wurde zusammen mit der *Straßenerkennung* auch auf kurzen Abschnitten auf dänischen Landstraßen getestet.³

Die automatische Fahrt schloß das automatische Spurhalten, den automatischen Spurwechsel und die automatische Längsführung ein. Durch die Auslösung von automatischen Spurwechseln⁴ hat der Benutzer die Möglichkeit, Schwächen des Systems, wie etwa den begrenzten Vorausschaubereich, teilweise auszugleichen. Durch die Anpassung der Reisegeschwindigkeit an die Verkehrsdichte kann er das System in dieser Konfiguration zusätzlich unterstützen.

Das Versuchsfahrzeug VaMP (Abschnitt 7.1) war für diese Fahrt mit dem kompakten Wahrnehmungssystem (Abschnitt 7.2.2, Abbildung 7.16) und dem transputer-basierten Fahrzeugrechner (Abschnitt 7.1.3, Abbildungen 7.11 und 7.12) ausgestattet. Die Funktionalität wurde von den Modulen RDT, ODT und VC⁵ erbracht. Die ‘experimentell zurückgelegte Strecke’⁶ betrug 1758 km; davon wurden 1678 km automatisch gefahren. Damit wurden etwa 95 Prozent der experimentellen Strecke automatisch zurückgelegt;

²Die Anreise erfolgte am 13. und 14. November, die Rückreise am 15. November. Folgende Route wurde gefahren: 1. Tag: München - Nürnberg - Würzburg - Hannover - Hamburg - Schleswig 2. Tag: Schleswig - Kolding - Hobro - Billund - Odense. Rückreise wie Anfahrt, aber ohne Umwege in Dänemark: Odense - Kolding - Schleswig - ... - München.

³Ergebnisse auf den Landstraßen diskutiert Behringer (1996).

⁴Ein automatischer Spurwechsel wird vom Fahrer ausgelöst und vom System ausgeführt. Dagegen wird ein autonomer Spurwechsel vom maschinellen System selbst aufgrund seiner Kenntnis der Verkehrssituation ausgelöst.

⁵RDT: *Road Detection and Tracking*, *Straßenerkennung*, ODT: *Obstacle Detection and Tracking*, *Hinderniserkennung*, VC: *Vehicle Control*, *Fahrzeugführung* (Abschnitt 3.3).

⁶Unter der ‘experimentell zurückgelegten Strecke’ wird die Strecke verstanden, auf der das System angeschaltet war. Das System wurde während der Fahrt nicht angeschaltet, wenn neue Wahrnehmungsoftware getestet wurde. Auch bei verschiedenen Fahrten durch die Stadt und über Land, Domänen, für die das System nicht ausgelegt war, wurde es ebenfalls nicht aktiviert. Bei optischen Problemen der Kameras (Übersteuerung des Kamerabildes oder mangelnde Empfindlichkeit der Kameras) wurde das System abgeschaltet. Aus rechtlichen Gründen dürfen automatische Fahrten nur mit Sicherheitsfahrer und Bediener durchgeführt werden. Deshalb konnte das System auf der Teiletappe von Billund nach Odense nicht getestet werden.

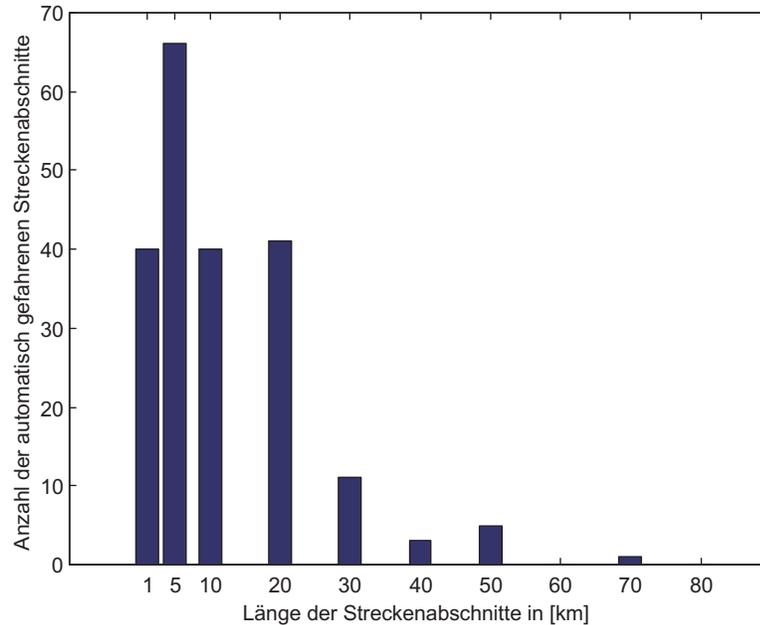


Abbildung 8.2: Automatische Fahrt von München nach Odense, Balkengrafik über die Länge der automatisch gefahrenen Abschnitte; 1 [km] steht für bis einen Kilometer, 70 [km] für 60 – 70 [km]

413 Spurwechsel wurden automatisch durchgeführt. Bei der Fahrt diente das autonome Fahrzeug in erster Linie als Fortbewegungsmittel. Auf die Grenzen des Systems wurde aus Zeitgründen nur bedingt Rücksicht genommen. Dies spiegelt sich vor allem im Geschwindigkeitsbereich bei automatischen Fahrten von 50 – 180 km/h wieder. Das Wetter war bei der automatischen Langstreckenfahrt wechselhaft: Abschnitte mit bedecktem Himmel, dem ‘idealen Bildverarbeitungswetter’, lösten sich mit nebligen, sonnigen (auch mit direktem Gegenlicht) und regnerischen Abschnitten (von leichtem bis starkem Regen) ab.

Die Balkengrafik in Abbildung 8.2 verdeutlicht die Länge der einzelnen automatisch gefahrenen Abschnitte. In dieser Grafik fallen zahlreiche kurze Abschnitte (über 100 Abschnitte unter fünf Kilometern) und einige sehr lange auf. Zu den häufigen Unterbrechungen trugen alle Module bei: Die Straßenerkennung fiel hauptsächlich in (nicht modellierten) Baustellenbereichen immer wieder aus. ODT übersah Fremdfahrzeuge besonders bei hohen Relativgeschwindigkeiten (> 40 km/h) und bei Nebel. Das Modul zur Fahrzeugführung konnte Spurwechsel bei Geschwindigkeiten größer als 140 Kilometern pro Stunde noch nicht automatisch ausführen,⁷ sodaß der menschliche Fahrer bei hohen Geschwindigkeiten für die kurze Zeit des Spurwechsels die Kontrolle über das

⁷Die Solltrajektorien beim Spurwechsel wurden in diesem System analog zu Brüdigam (1994) mit dem Querführungsmodell 3. Ordnung berechnet. Bei höheren Geschwindigkeiten treten beim Spur-

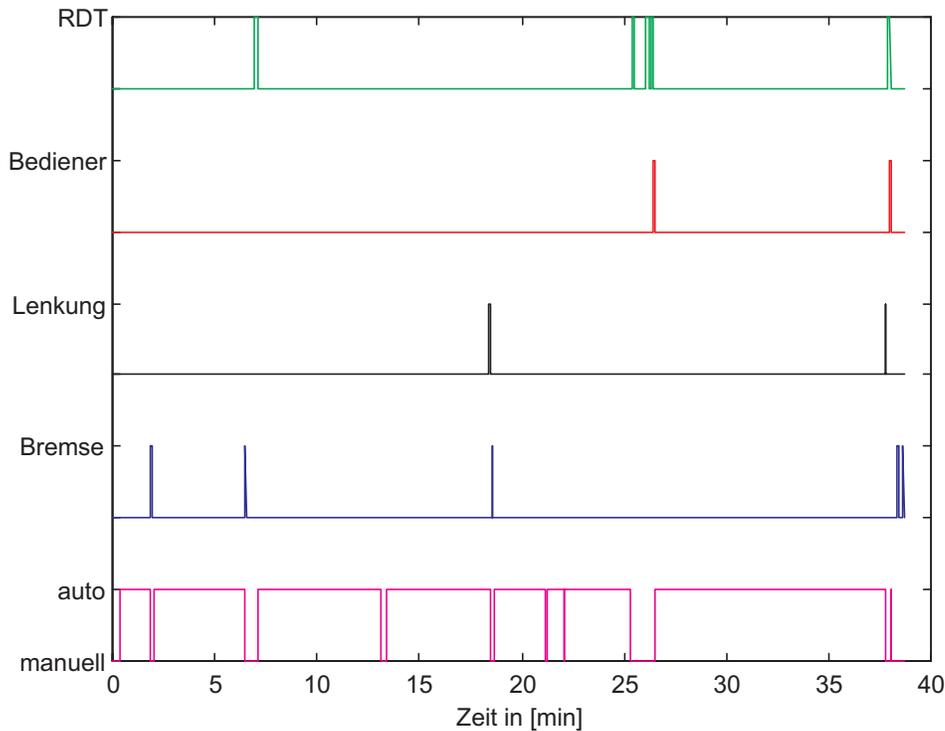


Abbildung 8.3: Automatische Fahrt von München nach Odense, Abschnitt Soltau nach Hamburg; aufgenommene Statussignale; auto: automatische Fahrt, manuell: manuelle Fahrt, Bremse: Bremsengriff des Fahrers, Lenkung: Lenkeingriff des Fahrers, Bediener: Eingriff des Bedieners, RDT: Neuinitialisierung der Straßenerkennung, Datenaufzeichnung unterabgetastet

Fahrzeug übernahm. Es ist kein Zufall, daß der mit 66.4 Kilometern längste zusammenhängende, automatische Abschnitt in Dänemark gefahren wurde, wo landesweit eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 110 km/h gilt.

Die Stärken und Schwächen des Systems werden bei der Diskussion eines einzelnen Abschnittes deutlich. Bewußt wurde dabei ein Abschnitt auf der Autobahn A7 von Soltau bis zum Elbtunnel in Hamburg ausgewählt, bei dem der Prozentsatz der automatisch gefahrenen Strecke mit 91.5 Prozent unterdurchschnittlich war. In den Abbildungen 8.3 - 8.6 werden verschiedene logische Zustände und Zustandsgrößen gezeigt, die mit einer Datenrate von einem Hertz aufgezeichnet wurden. Abbildung 8.3 zeigt den Wechsel zwischen manueller Fahrt und automatischer Fahrt sowie die verschiedenen Eingriffe von Fahrer und Beifahrer. Der Fahrer hat die Möglichkeit, durch Lenken oder Betätigen des Bremspedals die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Der Bediener kann

wechsel die in Abschnitt 5.3.1 diskutierten Probleme auf. Eine ausführliche Analyse des Problems und Lösungsvorschläge auf Basis des Querführungsmodells 5. Ordnung finden sich bei Schädlich (1998).

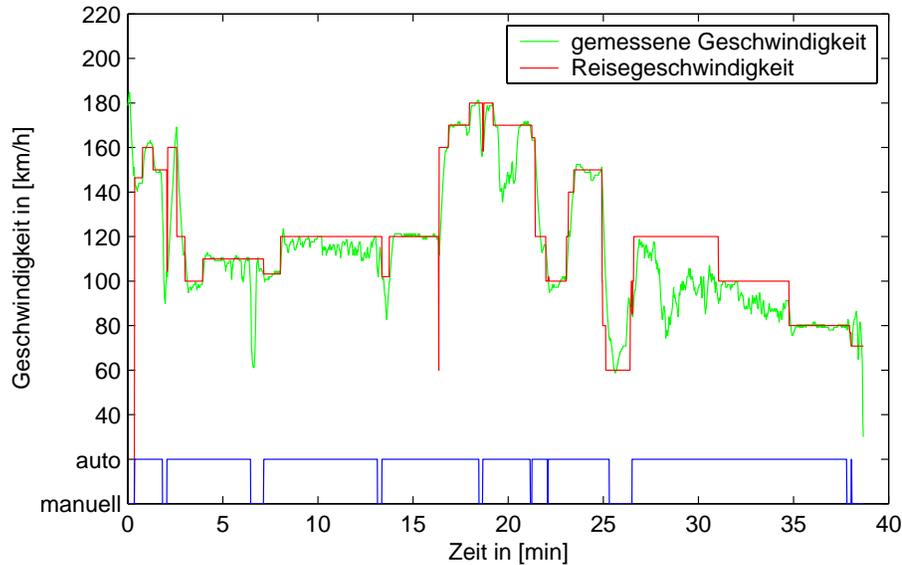


Abbildung 8.4: Automatische Fahrt von München nach Odense, Abschnitt von Soltau nach Hamburg; gemessene Geschwindigkeit und vorgegebene Reise-geschwindigkeit, Datenaufzeichnung unterabgetastet, auto: automatische Fahrt, manuell: manuelle Fahrt

das maschinelle System ebenfalls durch Eingaben auf seiner Tastatur deaktivieren. Ein Vorläufermodul der *Überwachung der Leistungsfähigkeit* (Abschnitt 6.2.2) innerhalb von VC schaltete immer dann in den passiven Modus, wenn RDT Neuinitialisierungen meldete.

Anhand des geführten Logbuches lassen sich einige Gründe für die Unterbrechungen der automatischen Fahrt angeben. RDT meldete Neuinitialisierungen an zwei Baustellen nach sieben und 25 Minuten und am Beginn des Elbtunnels (nach 38 Minuten). Der Bediener griff an der zweiten Baustelle und im Elbtunnel ein, da auch nach den Neuinitialisierungen von RDT keine geeigneten Zustandsgrößen geschätzt wurden. Nach 18 Minuten übernahm der Fahrer kurzzeitig das Fahrzeug, um ein dicht auffahrendes Fahrzeug vorbeizulassen. Bremseneingriffe des Fahrers waren an der ersten Baustelle und wegen eines langsamen Fahrzeugs (nach zwei Minuten) notwendig. Nach 21 Minuten wurde bei hoher Geschwindigkeit ein manueller Spurwechsel durchgeführt.

Abbildung 8.4 zeigt das Geschwindigkeitsprofil während der Teiletappe. Die Reise-geschwindigkeit wurde vom Bediener vorgegeben und bei Bedarf an die vorgegebene Höchstgeschwindigkeit angepaßt. Deutlich zu erkennen ist die stufenweise reduzierte Höchstgeschwindigkeit vor dem Elbtunnel. Größere Abweichungen zwischen der Reise-geschwindigkeit und der gemessenen Geschwindigkeit treten auf, wenn die automatische Längsführung auf langsamere vorausfahrende Fahrzeuge reagiert (z.B. nach 20 min und nach 28 min). Die guten Umweltbedingungen und die gerade Streckenführung wurden dazu genutzt, um die Stabilität der Querverführung bei Geschwindigkeiten bis

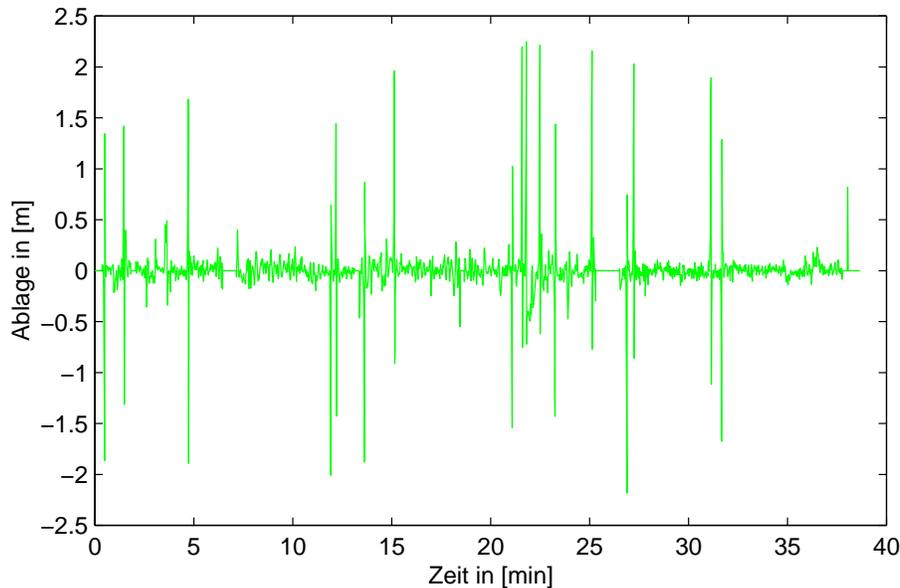


Abbildung 8.5: Automatische Fahrt von München nach Odense, Abschnitt von Soltau nach Hamburg; geschätzte Ablage bei automatischer Fahrt, Ablagen über ± 0.8 [m] treten ausschließlich während der Spurwechsel auf (vgl. Abbildung 8.6), Datenaufzeichnung unterabgetastet

zu 180 km/h zu demonstrieren. Der Vergleich von Abbildung 8.4 mit Abbildung 8.5 macht deutlich, daß auch in diesem Bereich die geschätzte Ablage von der Fahrbahnmitte gering ist. Ablagen über ± 0.8 [m] wurden während der Spurwechsel und bei den erwähnten Störungen im Baustellenbereich und im Elbtunnel geschätzt (vgl. Abbildung 8.5). Der Spurwechselzähler in Abbildung 8.6 wird bei jedem Spurwechsel in- oder dekrementiert. Nach Neuinitialisierungen wird er zu Null gesetzt (nach 25 und nach 38 Minuten). Vor den Neuinitialisierungen sind Fehldetektionen zu erkennen. Der Vergleich mit dem ebenfalls eingezeichneten Statusbit zeigt, welche Spurwechsel manuell und welche automatisch durchgeführt wurden.

Das Histogramm in Abbildung 8.7 zeigt die geschätzten Ablagewerte von der Spurmitte beim automatischen Spurfahren in der diskutierten Teiletappe. Abgesehen von wenigen Ausreißern liegt die geschätzte Ablage bei der automatischen Fahrt in einem Wertebereich von ± 25 cm.

Die diskutierte Langstreckenfahrt stellt einen Höhepunkt der Arbeit mit spezialisierten Systemen am Institut dar, bei dem die Robustheit dieser Systeme demonstriert werden konnte. Leider lassen sich die Ergebnisse nur schwer mit denen anderer Forschungsgruppen vergleichen. Zwei andere Langstreckenfahrten wurden bereits in Kapitel 2 erwähnt. Eine Gruppe der CMU fuhr im Sommer 1995 2850 Meilen von der amerikanischen Ostküste zur Westküste, davon 98.1 Prozent mit automatischer Querführung.

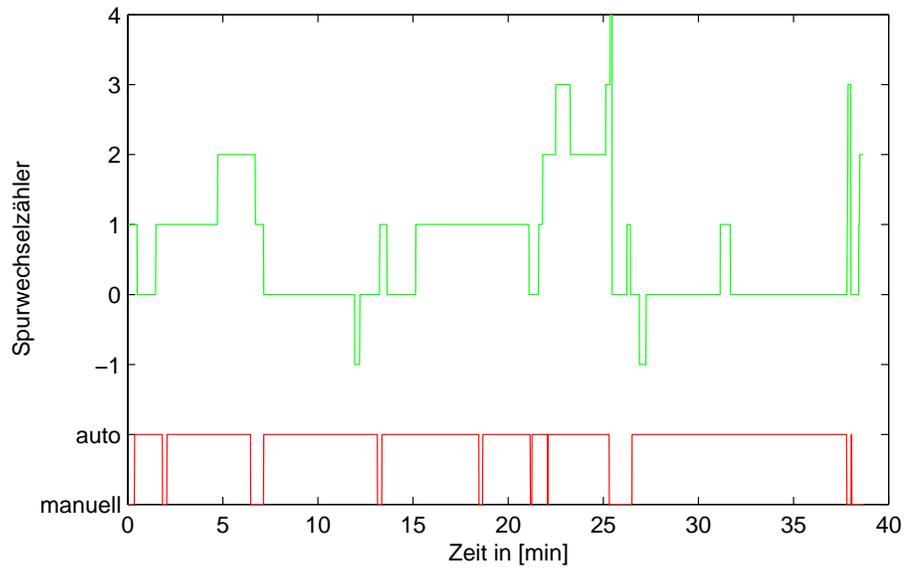


Abbildung 8.6: Automatische Fahrt von München nach Odense, Abschnitt von Soltau nach Hamburg; von RDT erfaßte Spurwechsel bei manueller und automatischer (auto) Fahrt, Spurwechselzähler fortlaufend, Datenaufzeichnung unterabgetastet

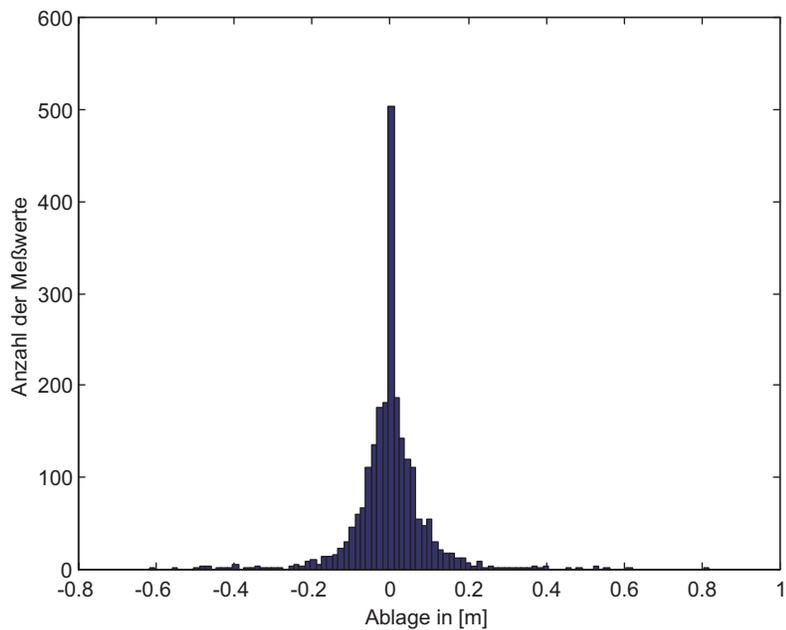


Abbildung 8.7: Automatische Fahrt von München nach Odense, Abschnitt von Soltau nach Hamburg; Histogramm der geschätzten Ablage beim automatischen Spurfahren, Datenaufzeichnung unterabgetastet

Auf automatische Längsführung mußte mangels geeigneter Erkennungsprozesse verzichtet werden. Anders als bei der Universität der Bundeswehr wurde die Fahrweise angepaßt, um einen möglichst hohen Prozentsatz mit automatischen Fahrten zu erzielen (Abschnitt 2.1.1, Pomerleau & Jochem 1996). Drei Jahre später fuhr eine Gruppe der Universität Parma auf einer Strecke von 1860 km durch Italien 91 Prozent automatisch quergeführt. Auch hier konnte die Längsführung nicht automatisiert werden (Abschnitt 2.3.8, Broggi et al. 1999a; Broggi et al. 1999b).⁸ Unter den mir bekannten Langstreckenfahrten ist die der Universität der Bundeswehr die einzige, die automatisch quer- und längsgeführt gefahren wurde. Die Ergebnisse der drei Gruppen mit automatischer Querführung schwanken zwischen 91 und 98.5 Prozent, sind aber nicht direkt vergleichbar, da sie unter unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen, Straßenverhältnissen und bei unterschiedlich dichtem Verkehr erzielt wurden. Nur ein direkter Vergleich könnte Aufschluß über die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Systeme geben.

8.2 Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen

Mit dem PC-basierten System (Abschnitt 7.2.3) wurde eine geeignete Plattform entwickelt, mit der der in Teil II dargestellte Ansatz zur flexiblen Automatisierung realisiert und getestet werden konnte. In diesem Abschnitt wird die Leistungsfähigkeit des Systems anhand der Teilautomatisierungen ‘Hybrider adaptiver Tempomat’, ‘Automatische Notbremsung’ und ‘Automatische Querführung’ mit VaMP sowie einer einfachen ‘autonomen Mission’ mit VaMoRs demonstriert. Alle Versuche wurden mit dem gleichen ausführbaren Programm (executable) zur ‘Autonomen Mobilität’ (Abschnitt 7.2.3) durchgeführt, wobei fahrzeugspezifische Kenngrößen in der Initialisierungsdatei abgelegt waren. Obwohl so zentrale Programme wie ODT erst sechs Wochen vor Ende meiner Tätigkeit am Institut zur Verfügung standen, wurde die Leistungsfähigkeit der in ausführlichen Testfahrten optimierten Vorgängersysteme erreicht. Die automatische Längsführung hat schon jetzt - nicht zuletzt wegen der Integration des Radarsystems und der neuen Algorithmen in der *Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung* - eine am Institut bisher unerreichte Robustheit erlangt, die mit der Integration der Algorithmen zur Detektion von Fremdfahrzeugen mit optischem Fluß und den stereobasierten Ansätzen weiter gesteigert werden wird (Rieder 2000).

⁸Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß andere Gruppen ebenfalls Langstreckenfahrten durchgeführt haben, deren Ergebnisse mir aber nicht vorliegen oder überhaupt nicht veröffentlicht wurden. Eine sogenannte ‘autonome’ Fahrt eines Teams von Daimler-Benz von Stuttgart nach Berlin (Franke et al. 1993) kann hier leider nicht berücksichtigt werden, da weder bekannt ist, welche Funktionen wirklich automatisiert wurden, noch quantitative Ergebnisse vorliegen.

8.2.1 Hybrider adaptiver Tempomat

Am Beispiel des ‘Hybriden adaptiven Tempomaten’ werden die unterschiedlichen Zeithorizonte auf den verschiedenen Systemebenen und die Funktionsweise der *Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung* erläutert. In den Abbildungen 8.8 und 8.9 sind ausgewählte Zeitverläufe dargestellt, die während einer Testfahrt auf der Autobahn A8 von Weyarn nach Ottobrunn bei mäßigem Verkehr aufgenommen wurden.⁹ Deutlich sind die unterschiedlichen Zeithorizonte auf den verschiedenen Ebenen zu erkennen. Die vorgegebene Reisegeschwindigkeit wurde auf der wissensbasierten Ebene über das ganze betrachtete Zeitintervall von 60s konstant zu 140 km/h vorgegeben. Die logischen Zustände auf der regelbasierten Ebene, nach denen die Verhaltensweisen ausgewählt werden, werden jeweils mehrere Sekunden eingenommen. Auf der 4D-Ebene ändern sich die geschätzte Relativgeschwindigkeit und der Relativabstand zu den vorausfahrenden Fahrzeugen alle 40 ms. Der Bremsdruck, der in Abbildung 8.9 nur unterabgetastet dargestellt ist, wird alle 4 ms neu gemessen und gestellt.

Unterschiedliche Hypothesen für vorausfahrende Fahrzeuge in der eigenen Fahrspur sind an den auftretenden Diskontinuitäten im geschätzten Abstand und in der geschätzten Objektgeschwindigkeit zu erkennen. Während der ersten zehn Sekunden wurden verschiedene Objekthypothesen für weit vorausfahrende Fahrzeuge aufgesetzt, auf die das autonome Fahrzeug aufgrund der geringen Relativgeschwindigkeit noch nicht reagiert. Zum Zeitpunkt $t = 12s$ hat sich der Abstand so verringert, daß das Fahrzeug die Verhaltensweise V4 ‘Annähern’ (vgl. Abbildung 6.10) auswählt und verzögert. Nach vier Sekunden Verzögerung hat sich der Abstand weiter verkürzt. Der Automat zur Längsführung wählt die Verhaltensweise V3 ‘Abstandsregelung’(vgl. Abbildung 6.10) aus und regelt den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug auf einen Zeitabstand von 1.6s.

Wegen eines Spurwechsels ist dieses Fahrzeug nach dem Zeitpunkt $t = 31s$ nicht mehr relevant. Dafür wird ein Fahrzeug in etwa 100 Metern Entfernung als relevantes Fahrzeug ausgewählt. Da die Übergangsbedingung für die Verhaltensweise V4 ‘Annähern’ noch nicht erfüllt ist, wählt das autonome Fahrzeug die Verhaltensweise V1 ‘Tempomat’ und beschleunigt dabei auf die Reisegeschwindigkeit. Nach einem erneuten Spurwechsel bremst es bei $t = 35s$ selbständig mit der Verhaltensweise V4 ‘Annähern’ hinter einem langsam fahrenden Fahrzeug. Im Zustand ‘Abstandsregelung’ wird die Objekthypothese zum Zeitpunkt $t = 45s$ kurz verworfen, was einen vorübergehenden Zustandswechsel im Automaten zur Folge hat, der jedoch ohne Folgen für das autonome Fahrzeug bleibt. Im gezeigten Fahrabschnitt waren zwei Bremsengriffe erforderlich, die beide präzise ausgeführt wurden (Abbildung 8.9). Der Sollabstand wird bei der zweiten Annäherung kurz unterschritten (Abbildung 8.8), da der automatisch stellbare maximale Druck aus Sicherheitsgründen auf 15 bar begrenzt war (Abbildung 8.9).¹⁰

⁹Die Testfahrt wurde am Sonntag, den 17. 10. 1999 am frühen Nachmittag bei sonnigem Herbstwetter durchgeführt.

¹⁰Der maximal stellbare Bremsdruck wird derzeit noch begrenzt, um Vollbremsungen wegen möglicher falscher Objekthypothesen zu verhindern.

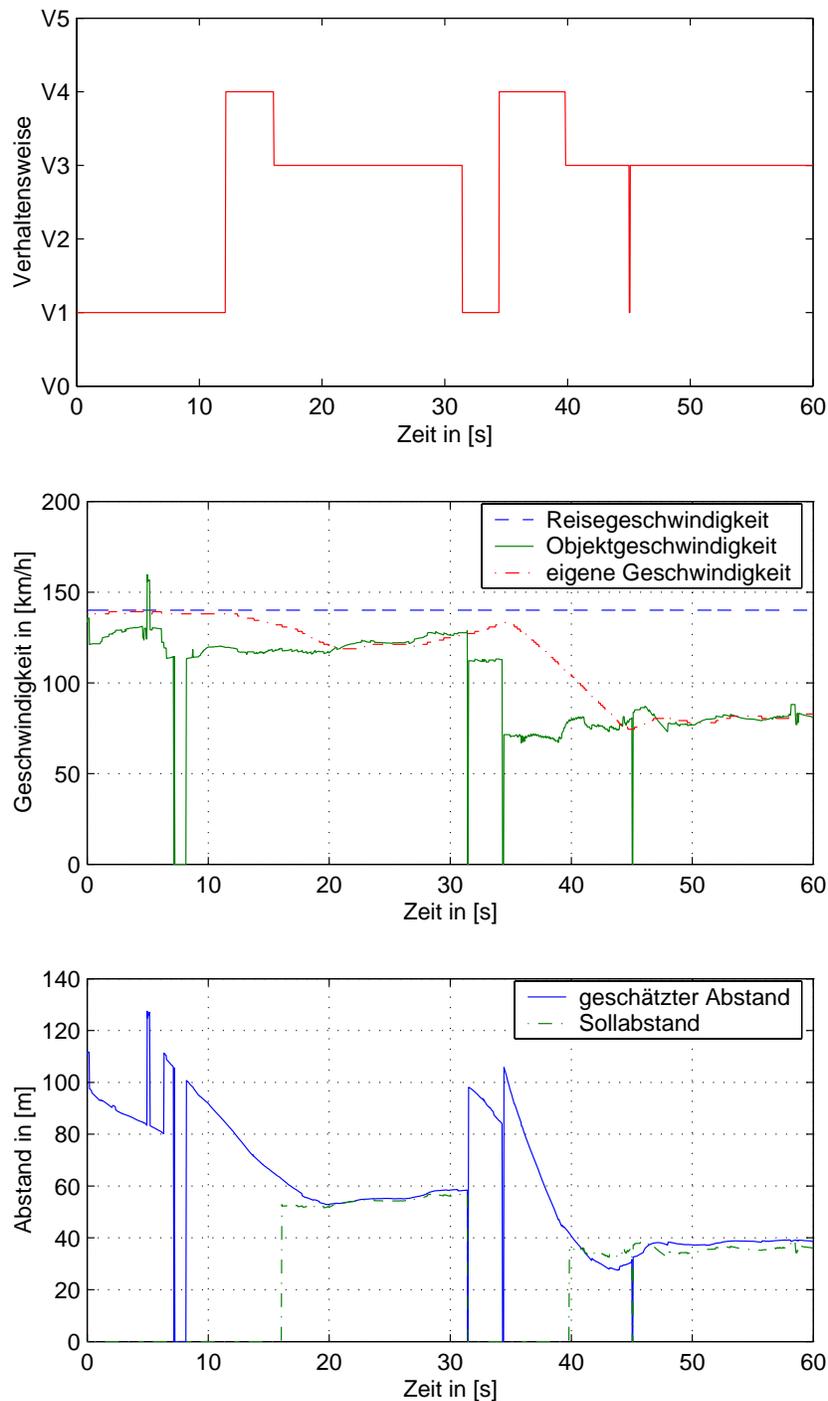


Abbildung 8.8: Fahrt mit hybridem adaptivem Tempomaten auf der Autobahn A8 von Weyarn nach Ottobrunn (Ausschnitt); Darstellung von Verhaltensweisen und physikalischen Zuständen; Verhaltensweisen für die Längsführung in der oberen Grafik: V1: ‘Tempomat’, V2: ‘Abstand vergrößern’, V3: ‘Abstandsregelung’, V4: ‘Annähern’, V5: ‘Maximal Verzögern’

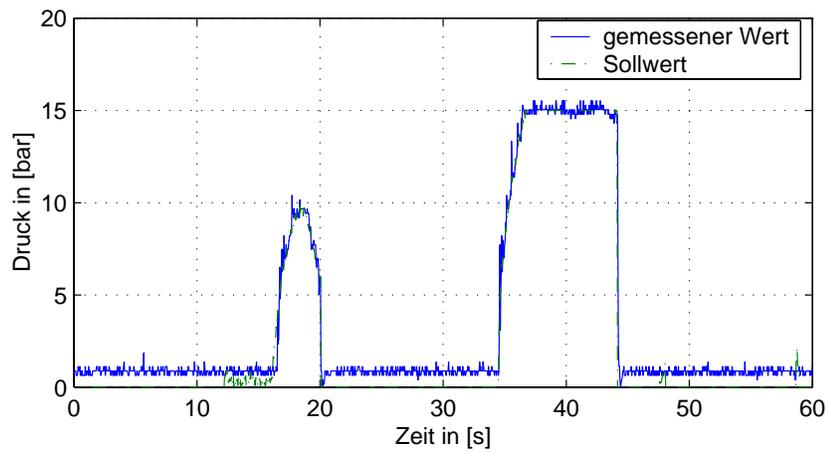


Abbildung 8.9: Bremsdruck, Datenaufzeichnung unterabgetastet

8.2.2 Automatische Notbremsung

Das Potential der automatischen Längsführung wird beim hybriden adaptiven Tempomaten nur teilweise genutzt, da der maximale Bremsdruck so begrenzt wird, daß automatische Bremsengriffe aufgrund von Fehlhypothesen im öffentlichen Straßenverkehr keine fatalen Folgen haben. Diese Einschränkung wird bei der ‘Automatischen Notbremsung’ fallen gelassen, die auf dem Versuchsgelände der UniBwM getestet wurde. In einem ersten Experiment wurde der Fahrzeugführung zum Zeitpunkt $t = 25s$ ein simuliertes stehendes Hindernis als relevantes Fahrzeug in 70 Meter Entfernung gemeldet (Abbildung 8.10). Da das Fahrzeug nur mit einer Notbremsung rechtzeitig gestoppt werden kann, wählt der Automat zur Fahrzeugführung die Verhaltensweise ‘Maximal Verzögern’ aus. Während des Bremsvorgangs erreicht das Fahrzeug eine negative Beschleunigung von $-7m/s^2$ bis $-8m/s^2$ mit einem Druck von 70 bar (Abbildung 8.11).

In einem zweiten Experiment wurde untersucht, ob ähnliche Leistungen auch mit der vorhandenen maschinellen Wahrnehmung möglich sind. Da stehende Fahrzeuge vom Radarsystem nicht als Objekte gemeldet wurden, fuhr das ‘relevante Fahrzeug’ mit geringer Geschwindigkeit voraus. Aus Sicherheitsgründen wurde das vorausfahrende Fahrzeug auch dann als relevant angenommen, wenn das autonome Fahrzeug mit einer seitlichen Ablage von $\pm 2.5m$ hinter dem langsamen Fahrzeug fuhr. Es wurde damit implizit davon ausgegangen, daß ein ‘Ausweichen’ nicht möglich war. Bei einer Geschwindigkeit von $115km/h$ wurde in 140 Meter Entfernung ein Fahrzeug erkannt, das mit $25 km/h$ voraus fuhr. Das autonome Fahrzeug leitete sofort eine Notbremsung ein, während der Verzögerungen von bis zu $-8m/s^2$ erreicht wurden (Abbildungen 8.12 und 8.13).

In Abbildung 8.12 ist eine Störung des geschätzten Geschwindigkeitssignals des vorausfahrenden Fahrzeugs zu erkennen. Eine Vergrößerung in Abbildung 8.14 zeigt, daß die Störung durch das Ausnicken des Fahrzeugs nach dem Notbremsvorgang verursacht wurde und daher in dieser Situation für das System nicht sicherheitskritisch war. Nach der kurzen Notbremsung genügen die Fähigkeiten des ‘Hybriden adaptiven Tempomaten’ zur automatischen Längsführung. Bemerkenswert ist die geringe Regelabweichung vom Sollwert beim Bremsdruck während des Annäherns und bei Geschwindigkeit und Abstand während des Konvoifahrens bei niedriger Geschwindigkeit.

Die Versuche zeigen das Entwicklungspotential des Systems zur flexiblen Automatisierung bei einem Experiment, für das das System, abgesehen von der Erhöhung des Bremsdrucks und der veränderten Auswahl des relevanten Fahrzeugs, gegenüber dem ‘hybriden adaptiven Tempomaten’ nicht verändert wurde.

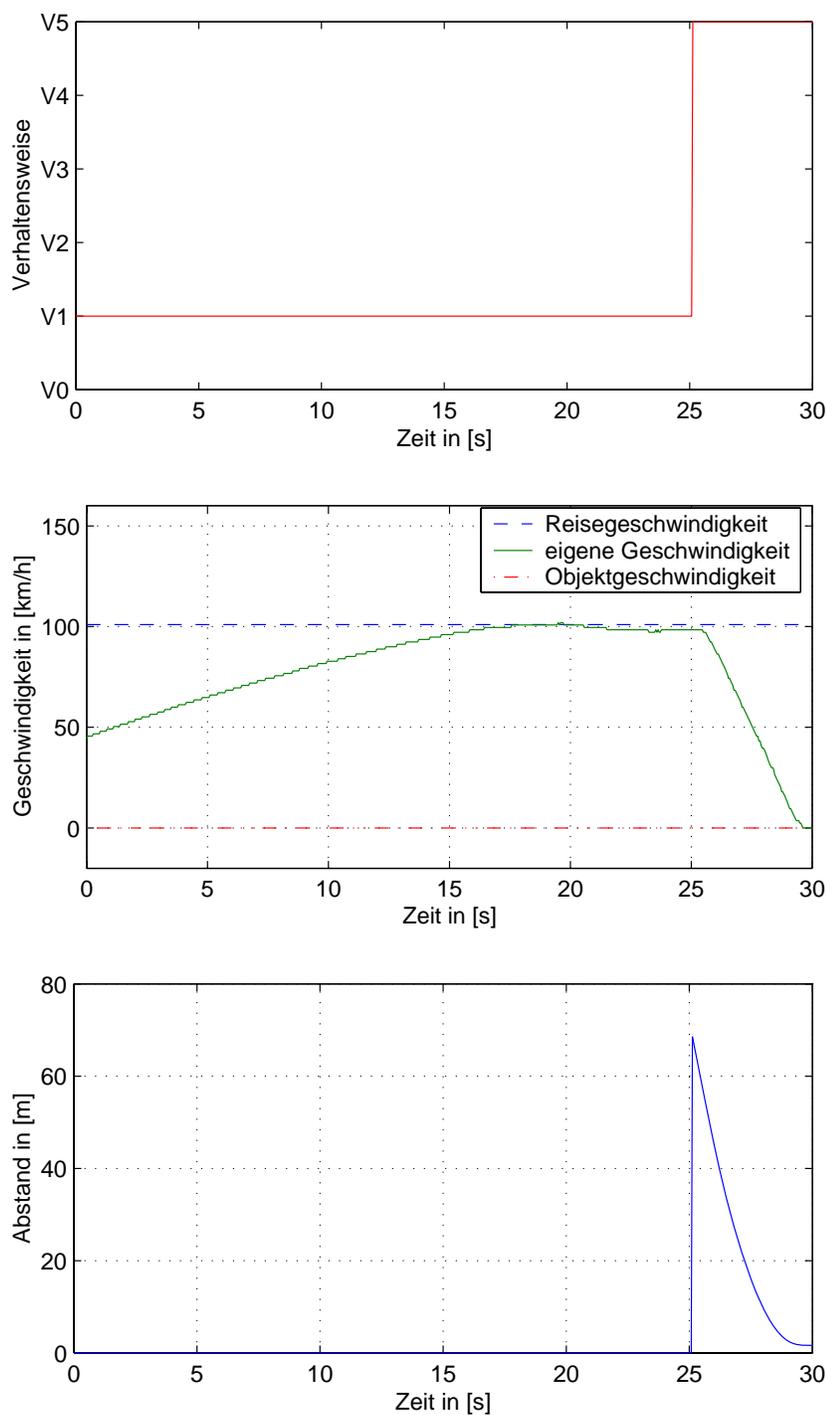


Abbildung 8.10: Automatische Notbremsung aufgrund simulierter Objekte auf dem Versuchsgelände der UniBwM, (Ausschnitt); Erkennen eines Fremdfahrzeugs bei $t = 25\text{s}$; Darstellung von Verhaltensweisen und physikalischen Zuständen; Verhaltensweisen für die Längsführung in der oberen Grafik: V1: 'Tempomat', V2: 'Abstand vergrößern', V3: 'Abstandsregelung', V4: 'Annähern', V5: 'Maximal Verzögern'

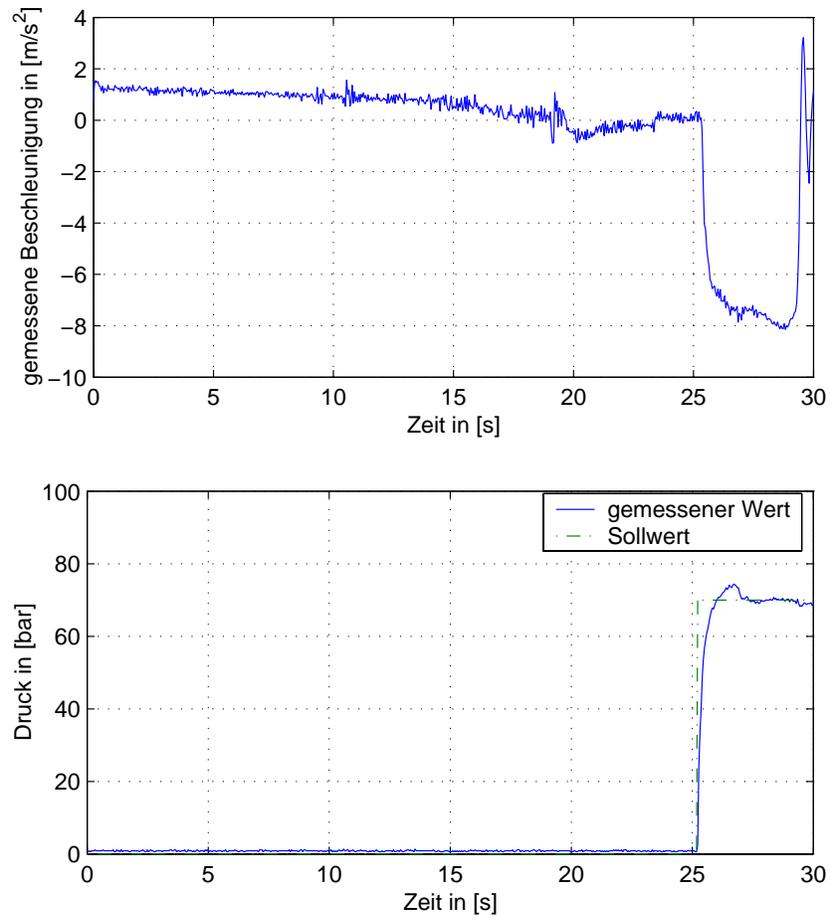


Abbildung 8.11: Automatische Notbremsung aufgrund simulierter Objekte auf dem Versuchsgelände der UniBwM, (Ausschnitt); Darstellung von physikalischen Zuständen;

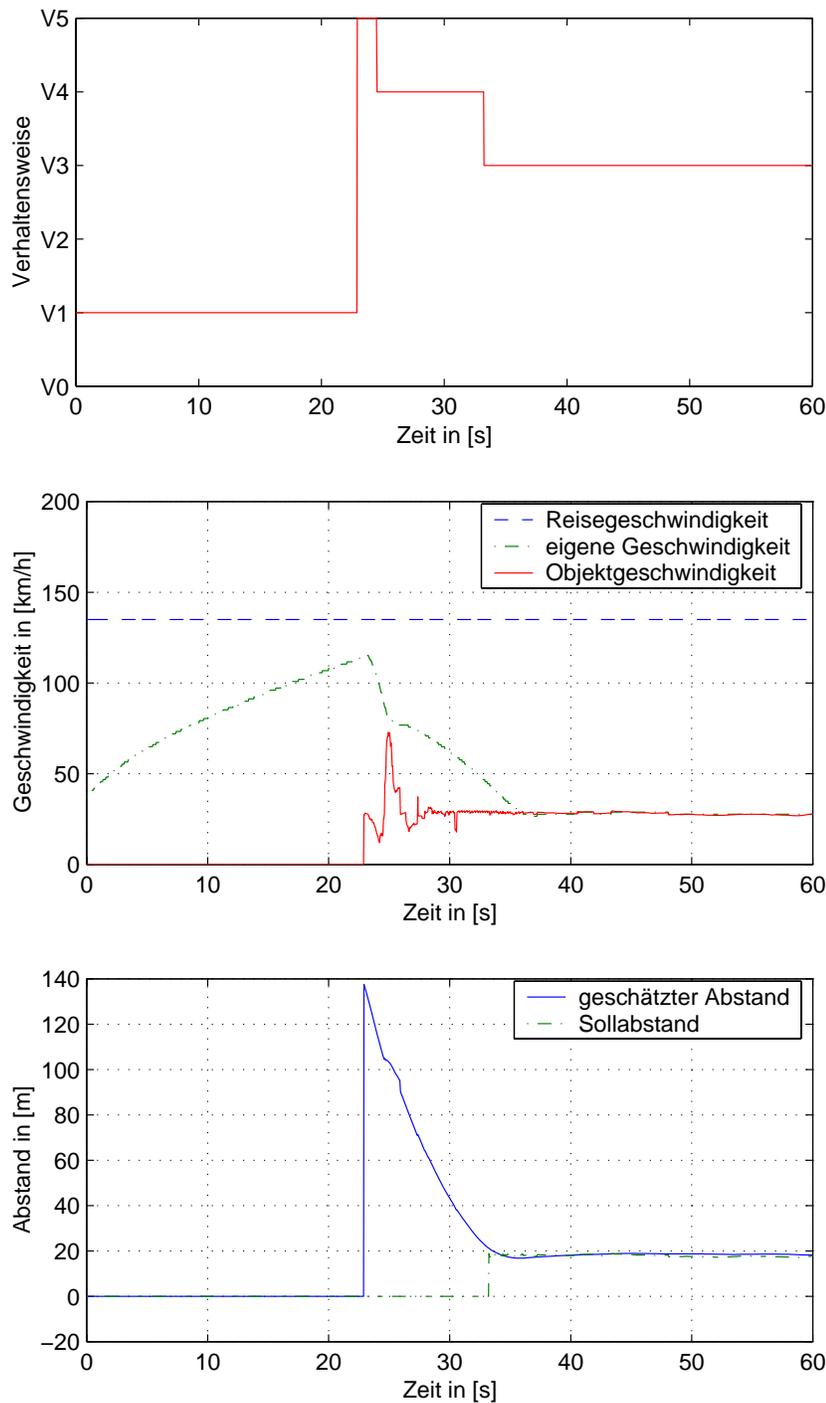


Abbildung 8.12: Automatische Notbremsung auf dem Versuchsgelände der UniBwM, (Ausschnitt); Darstellung von Verhaltensweisen und physikalischen Zuständen; Verhaltensweisen für die Längsführung in der oberen Grafik: V1: ‘Tempomat’, V2: ‘Abstand vergrößern’, V3: ‘Abstandsregelung’, V4: ‘Annähern’, V5: ‘Maximal Verzögern’

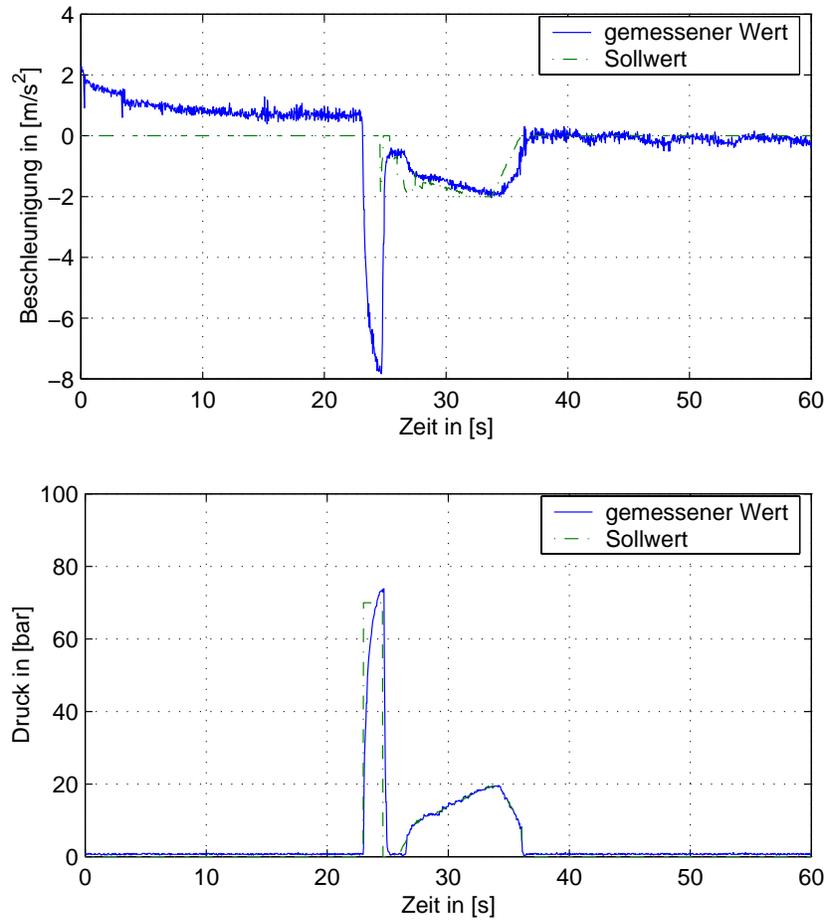


Abbildung 8.13: Automatische Notbremsung auf dem Versuchsgelände der UniBwM, (Ausschnitt); Darstellung von physikalischen Zuständen;

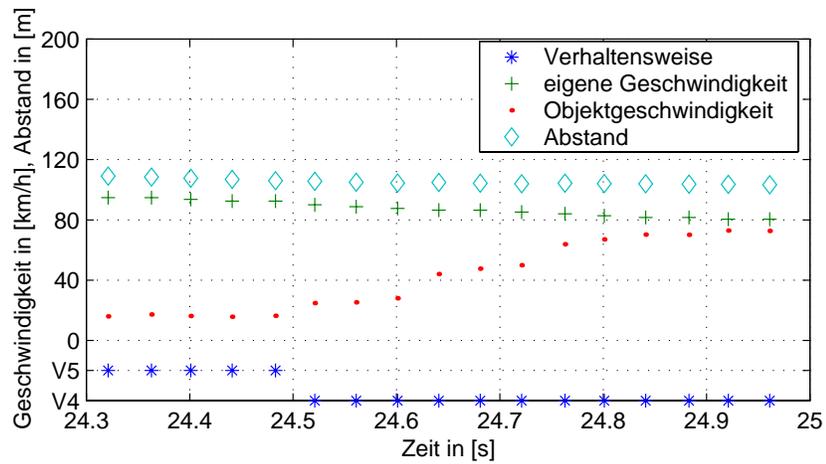


Abbildung 8.14: Automatische Notbremsung; Ausschnitt aus Abbildung 8.12; Störung des geschätzten Geschwindigkeitssignals bei Nickbewegungen der Fahrzeugkarosserie; Verhaltensweisen für die Längsführung: V4: 'Annähern', V5: 'Maximal Verzögern'

8.2.3 Automatische Querführung

Ergebnisse mit der automatischen Querführung werden an einem kurzen kurvigen Streckenabschnitt auf einer Testfahrt auf der A8 in Richtung München vor dem Irschenberg dargestellt.¹¹ Neben der automatischen Querführung war dabei auch der hybride adaptive Tempomat aktiv. Die geschätzte horizontale Straßenkrümmung zeigt, daß auf dem Streckenabschnitt Radien von unter 1000 Metern auftreten (Abbildung 8.15), die zügig durchfahren wurden (Abbildung 8.16). Dank hochfrequenter Stellbewegungen (Abbildung 8.16) liegt die geschätzte Ablage des Fahrzeugs von der Fahrspurmitte immer unter ± 0.4 Metern. Die Zeit von der Bildbelichtung bis zur Datenübertragung an den Transputer im Fahrzeugrechner, auf dem der Prozeß zur Querregelung ausgeführt wurde, ist aus regelungstechnischer Sicht näherungsweise die Totzeit in der Querdynamik.¹² Auch bei auftretenden Spitzen lag sie unter dem maximal tolerierten Wert von 240 ms, bei dem das Modul *Überwachung der Leistungsfähigkeit* die Kontrolle über die Querführung sofort an den menschlichen Fahrer übertragen hätte.

In Abbildung 8.17 sind zwei der im System berechneten Gütemaße für die Querführung dargestellt: ein einfaches integrales Gütemaß und die TLC ('Time-To-Line-Crossing', Abschnitt 5.3.2). Bei dem integralen Gütemaß wurde über ein Zeitfenster von einer Sekunde oder 25 Zyklen über das Quadrat der Ablage integriert. Dadurch werden größere Ablagen stärker gewichtet als kleinere. Dies wird im Intervall zwischen $t = 50$ s und $t = 60$ s beim Vergleich der Ablage (Abbildung 8.15) und des integralen Gütemaßes (Abbildung 8.17) deutlich. Ein sehr natürliches Gütemaß für die Querführung ist die Zeit, bis zu der voraussichtlich die Spur verlassen wird (Time-to-line-crossing, TLC, Abschnitt 5.3.2, Godthelp 1984), wenn die aktuelle Lenkrate im ganzen Vorausschaubarzeitraum gestellt würde. Dazu wird die Trajektorie des eigenen Fahrzeugs voraussimuliert und der Berührungspunkt des auf die Fahrbahn projizierten Fahrzeugs mit der Fahrbahnmarkierung errechnet. Mit der TLC steht beim Spurfahren ein Maß für die Gefährlichkeit der aktuellen automatischen Stellgröße für das Gesamtsystem zur Verfügung. Wird die TLC zu gering, bleibt dem Sicherheitsfahrer nicht mehr genügend Zeit, um mögliche Fehlreaktionen des Systems auszugleichen. Mit dem integralen Gütemaß werden Störungen erfaßt, nachdem sie bereits zu einer größeren Ablage geführt haben. Dieses Verfahren ist robust gegen mittelwertfreies Rauschen in den Schätzwerten. Die Berechnung der TLC bietet die Möglichkeit, gefährliche Handlungen bereits zu erkennen, bevor sie zu Auswirkungen auf die Querführung geführt haben. Solange der Fahrer in teilautomatischen Systemen die Verantwortung für die Fahrzeugführung hat, ist die TLC so zu begrenzen, daß der Fahrer immer genügend Zeit zum Eingreifen in das System hat.

¹¹Die Testfahrt wurde am 18.10.1999 bei leichtem Nebel durchgeführt.

¹²Die Zeit zur Ansteuerung der Lenkung liegt im Versuchsfahrzeug VaMP unter 10 ms und kann damit vernachlässigt werden (Maurer & Siedersberger 2000).

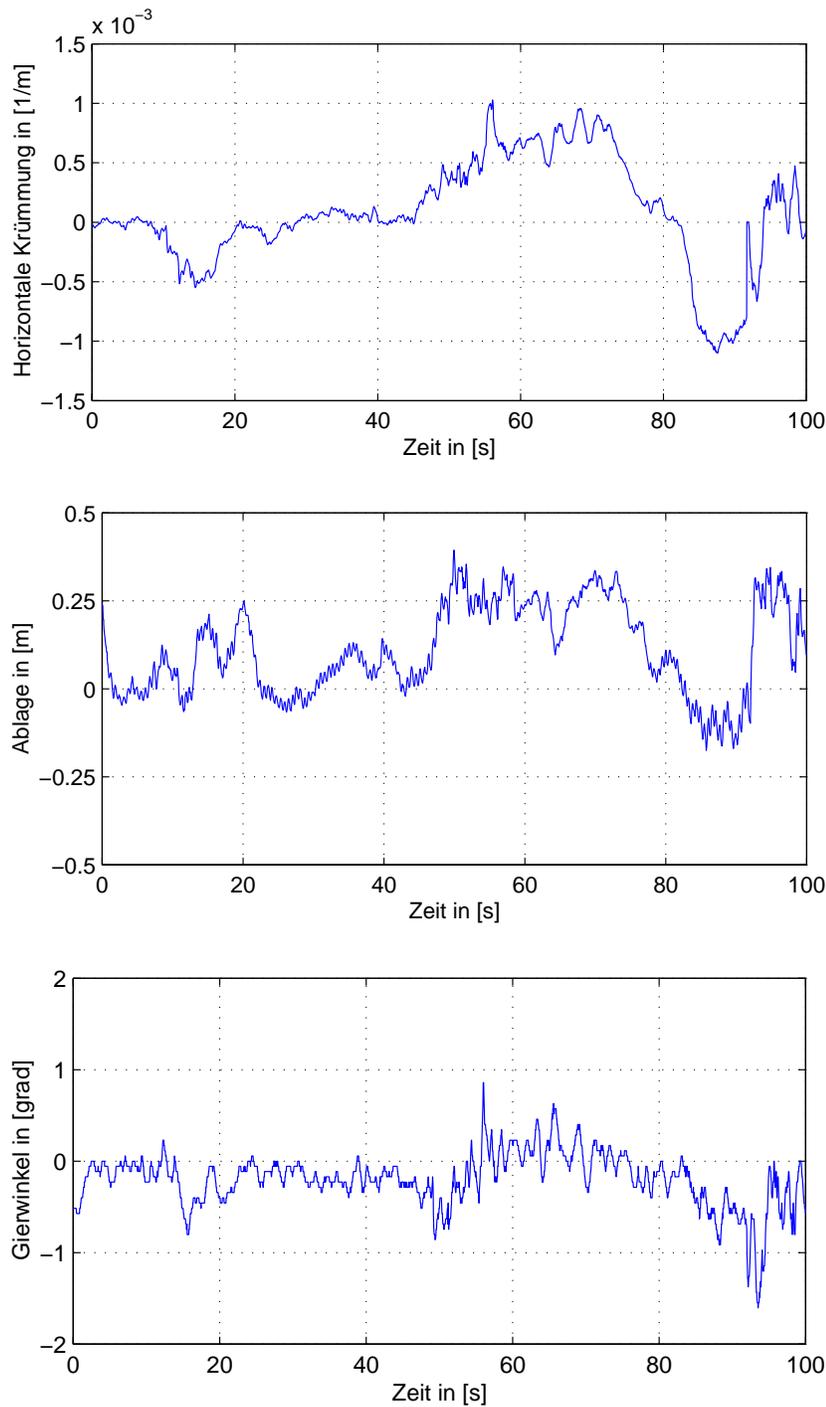


Abbildung 8.15: Fahrt mit automatischer Quer- und Längsführung auf der Autobahn A8 von Rosenheim nach Irschenberg (Ausschnitt vor dem Irschenberg), von der Straßenerkennung geschätzte Zustände: Straßenkrümmung, Ablage und Gierwinkel

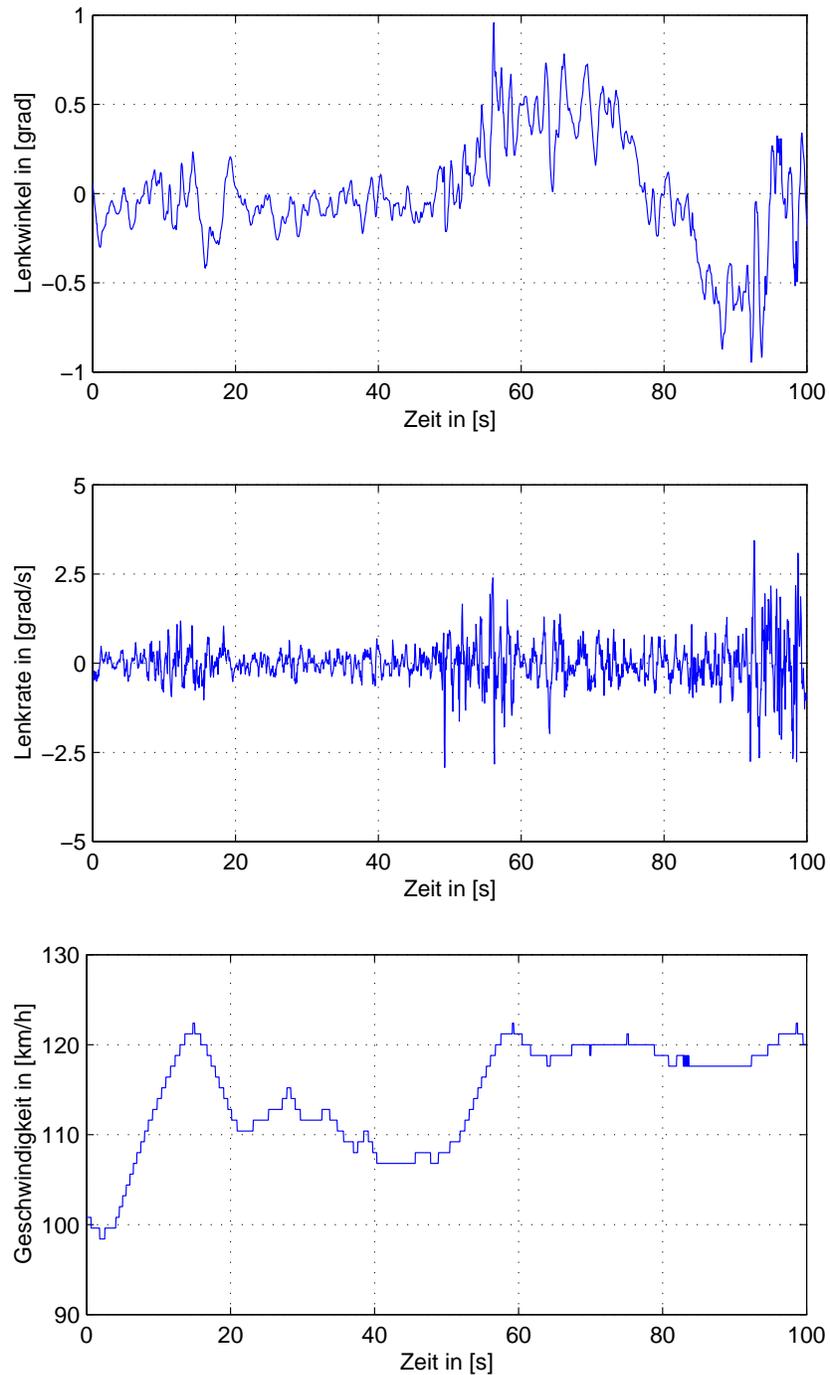


Abbildung 8.16: Fahrt mit automatischer Quer- und Längsführung auf der Autobahn A8 von Rosenheim nach Irschenberg (Ausschnitt vor dem Irschenberg), Meßgrößen: Lenkwinkel und Geschwindigkeit, Stellgröße: Lenkrate

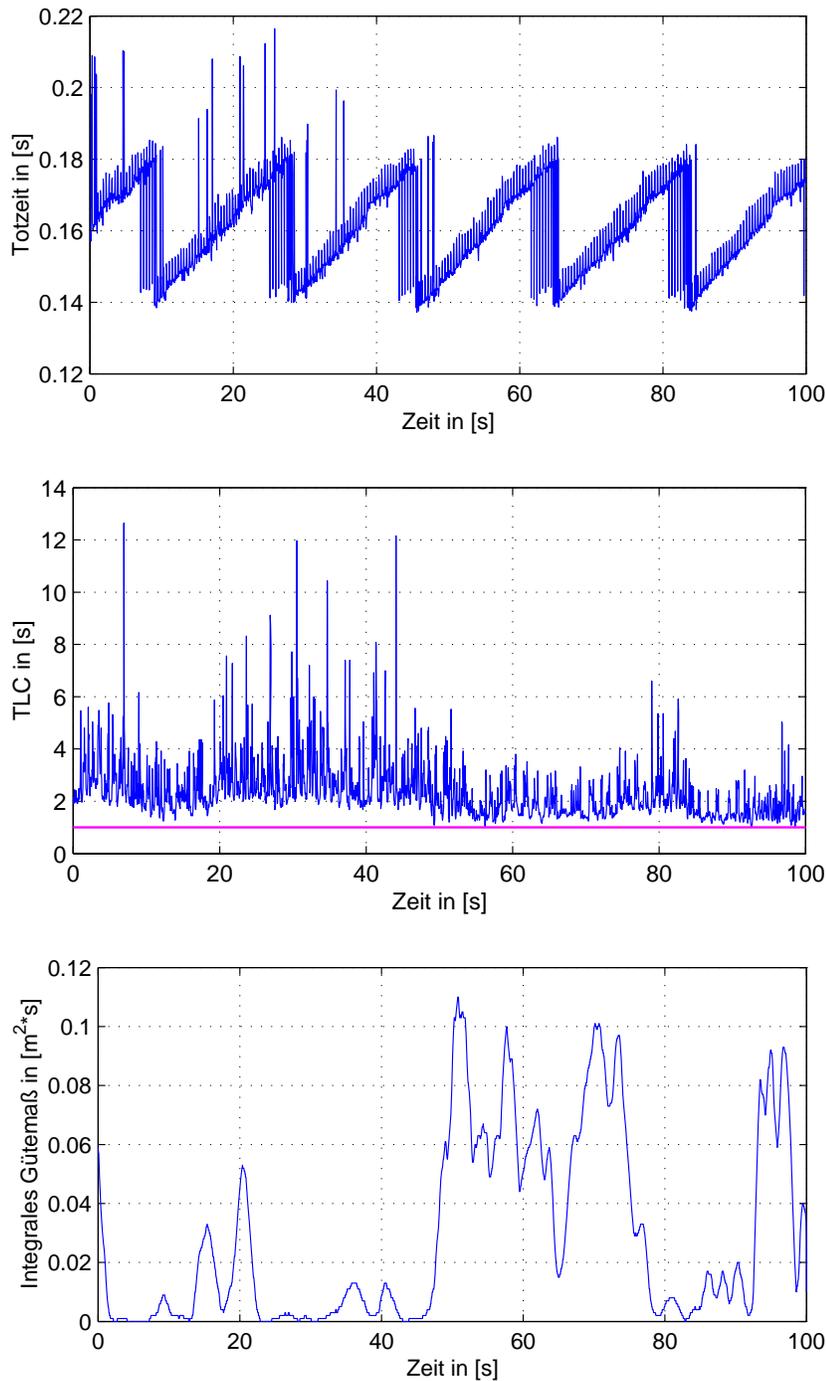


Abbildung 8.17: Fahrt mit automatischer Quer- und Längsführung auf der Autobahn A8 von Rosenheim nach Irschenberg (Ausschnitt vor dem Irschenberg), gemessene Totzeit, simulierte TLC (time-to-line-crossing), integrales Gütemaß über das Quadrat der Ablage y : $I_{EQ}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(k-i)^2$.

8.2.4 Autonome Missionen

Der vorgestellte Ansatz für die flexible Automatisierung entstand zunächst für die Autobahn, auf der er ausführlich getestet wurde. Der Ansatz ist aber nicht auf diese Domäne begrenzt, was mit dem folgenden Experiment nachgewiesen wurde. Die Einbindung in den Missionskontext (Abschnitt 3.3, Gregor 1998) wird anhand einer einfachen Mission auf dem Versuchsgelände der Universität der Bundeswehr mit dem Versuchsfahrzeug VaMoRs demonstriert (Abbildungen 8.18 und 8.19), dessen System zur autonomen Fahrzeugführung bis auf den fahrzeugabhängigen Teil identisch mit dem von VaMP ist.¹³ Die Mission enthält die drei Missionselemente ‘Halt’, ‘Straße folgen’ und ‘Stop’ (vgl. Gregor 1998). Im Missionselement ‘Halt’ steht VaMoRs, was durch die Verhaltensweise ‘Stehen’ (V1, Abbildung 8.18) realisiert wird. Nach Ablauf eines im Missionsplan festgelegten Zeitkriteriums fährt es selbständig an und folgt der Straße mit der Verhaltensweise ‘Tempomat’ (V3) und der im Missionsplan vorgegebenen Reisegeschwindigkeit. Abhängig von den Gütekriterien leitet VaMoRs ein Anhaltemanöver ein, die Verhaltensweise ‘Anhalten’ (V2), um im Missionselement ‘Stop’ zum Stehen zu kommen.¹⁴

An dieser einfachen Mission lassen sich wesentliche Merkmale der Einbindung der Fahrzeugführung in den Missionskontext diskutieren. In Abbildung 8.18 sind die unterschiedlichen Zeithorizonte der Missionselemente und der Verhaltensweisen zu erkennen. Der Unterschied wird noch deutlicher, wenn das Fahrzeug innerhalb eines Missionselementes auf Hindernisse reagieren muß.

Zu Beginn der Mission wird die Zuordnung der Position des autonomen Fahrzeugs zum Wegenetz mit Hilfe von GPS und einer digitalen Karte mit einer Genauigkeit von ± 100 Metern bestimmt. Die damit verbundene Unsicherheit ist für die Ausführung dieser Mission, bei der der Zielpunkt genau erreicht werden soll, zu groß (Abbildungen 8.18 und 8.19). Die Positionsbestimmung wird zum Zeitpunkt $t = 17$ Sekunden durch Erkennen einer Landmarke verbessert, deren Relativlage zum Wegenetz aus der Karte bekannt ist.¹⁵ Die Erkennung der Landmarke wird durch die aktive Blickrichtungssteuerung unterstützt, mit deren Hilfe die Kameras bei Annäherung an die Landmarke nach- und anschließend wieder zurückgeführt werden (Abbildung 8.19). In Abbildung 8.19 ist deutlich zu sehen, wie zum einen die Abstandsschätzung zum Endpunkt der Mission durch die Erkennung der Landmarke verbessert wird (obere Grafik), zum anderen die Unsicherheit über die eigene Position um zwei Größenordnungen reduziert wird (mittlere Grafik). Erst wenn die aktuelle Unsicherheit einen für die Fahrzeugführung tolerierbaren Schwellwert unterschritten hat, werden die Übergangsbedingungen in die

¹³Der fahrzeugabhängige Teil wurde von K.-H. Siedersberger realisiert.

¹⁴Die Verhaltensweise ‘Anhalten’ entspricht der Verhaltensweise ‘Annähern’ an ein stehendes Objekt (vgl. Abschnitt 5.4), wobei zusätzlich die eigene Reaktionszeit berücksichtigt wird.

¹⁵Das Verfahren zur Positionsbestimmung mittels Landmarken ist bei Hock (1994) und Gregor (1998) ausführlich beschrieben.

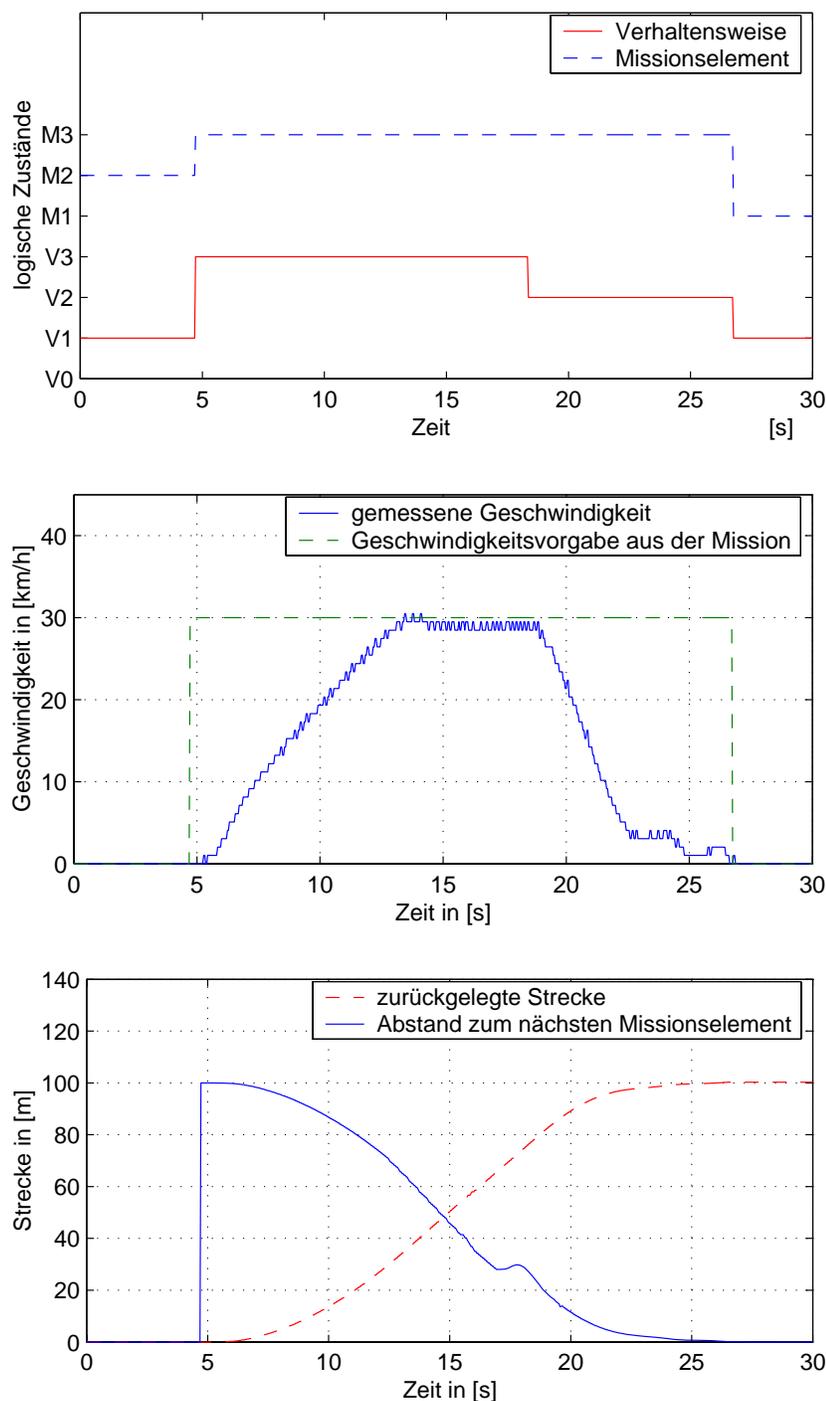


Abbildung 8.18: Autonome Mission auf dem Versuchsgelände der Universität der Bundeswehr; Darstellung von Missionselementen, Verhaltensweisen und Zuständen; Missionselemente in der oberen Grafik: M1: 'Stop', M2: 'Halt', M3: 'Folge Straße', Verhaltensweisen für die Längsführung in der oberen Grafik: V0: 'Passiv', V1: 'Stehen', V2: 'Anhalten', V3: 'Tempomat'

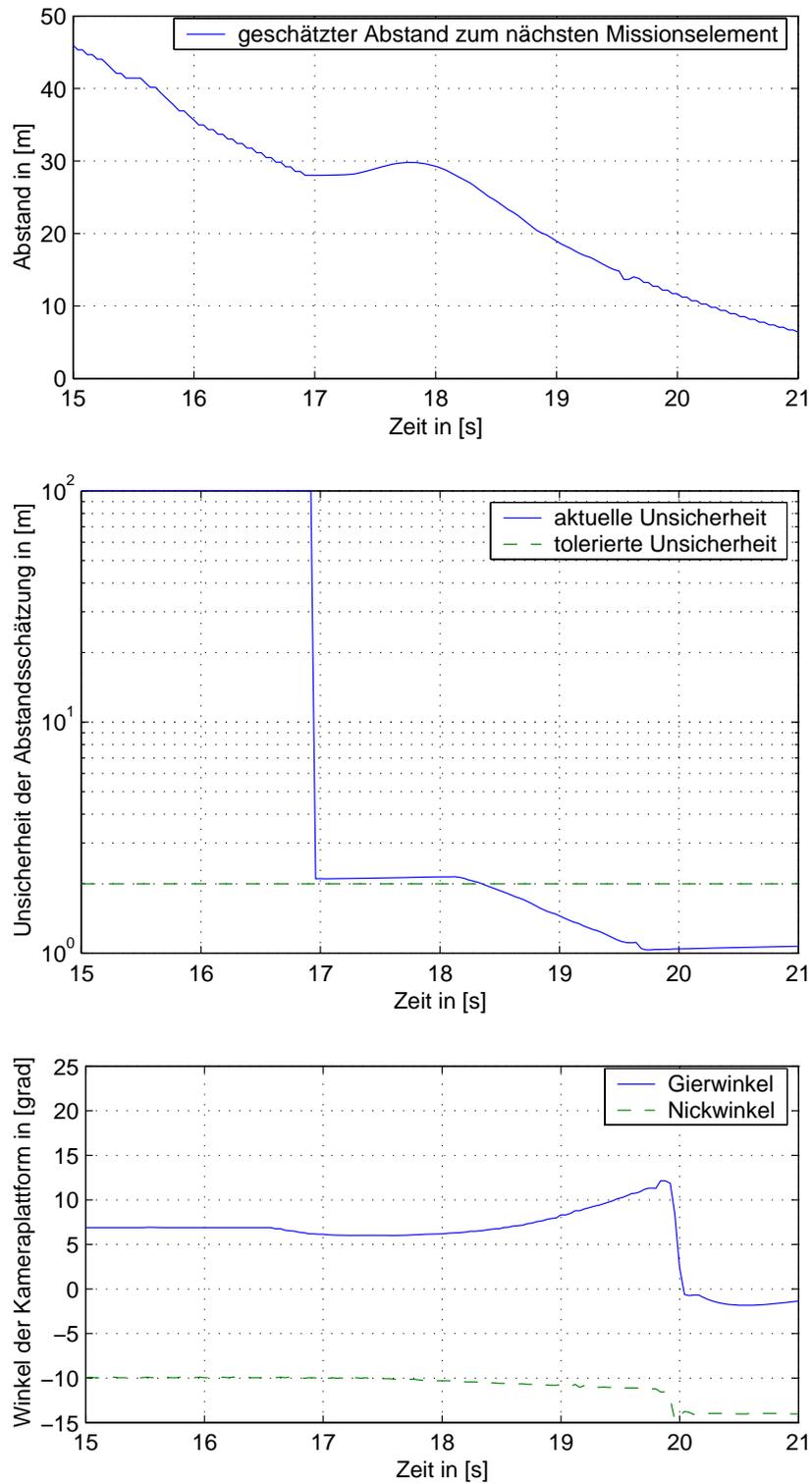


Abbildung 8.19: Autonome Mission auf dem Versuchsgelände der Universität der Bundeswehr (Ausschnitt); Verbesserung der Positionsbestimmung durch Landmarkennavigation

nächste Verhaltensweise ‘Anhalten’ überprüft, die im diskutierten Fall erfüllt sind.¹⁶ Der Zeitpunkt, an dem das Anhaltenmanöver eingeleitet wird, hängt auch vom aktuellen Gütekriterium ab: Bei komfortorientierter Fahrweise bremst das Fahrzeug früher und mit geringerer durchschnittlicher Verzögerung, bei zeitoptimaler Fahrweise so spät wie möglich, dann aber mit maximal erlaubter Verzögerung.

¹⁶Übergangsbedingung für das ‘Anhalten’: $d = v * T_T - v^2 / (2 * a_x)$, mit dem Abstand d , der eigenen Geschwindigkeit v , der Verzögerung a_x , mit der das eigene Fahrzeug verzögern soll und der Totzeit T_T , die der Verzögerungsregler benötigt, um die gestellte Verzögerung aufzubauen.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Die Analyse englisch- und deutschsprachiger Publikationen hat gezeigt, daß es derzeit kein veröffentlichtes Gesamtkonzept für autonome, sehende Fahrzeuge gibt, das erfolgreich in Straßenfahrzeugen nachgewiesen wurde. In dieser Arbeit wurde ein hardwareunabhängiges Gesamtkonzept für die flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen entwickelt, um diese Lücke zu schließen.

Zur Strukturierung dieser komplexen Systeme wurde eine funktionale Systemarchitektur entwickelt, die sowohl Ergebnisse der Analyse menschlichen Verhaltens als auch Systemarchitekturen für autonome Systeme berücksichtigt, die für andere Anwendungsgebiete entwickelt wurden. Die entstandene Architektur ist hierarchisch organisiert, aber auch verhaltensorientiert, was in einigen Veröffentlichungen fälschlich als Gegensatz angesehen wird.

Die Strukturierung der Wissensrepräsentation ist von großer Bedeutung für die effiziente Generierung von Verhalten in autonomen Fahrzeugen. Sie orientiert sich in dieser Arbeit an der Hierarchie der funktionalen Systemarchitektur und an Objekten im Sinne des umgangssprachlichen und des programmiertechnischen Wortgebrauchs.

In keiner der mir bekannten Arbeiten zur Generierung von Verhalten im autonomen Straßenfahrzeug wurde berücksichtigt, daß die existierenden Verfahren zur maschinellen visuellen Wahrnehmung nicht zuletzt wegen mangelnder Rechenleistung bislang nicht die Zuverlässigkeit von einfachen Meßsystemen haben und daher nur in eingeschränkten Domänen und nicht bei allen Umweltbedingungen eingesetzt werden können. Dieses Defizit, das bisher vom menschlichen Fahrer kompensiert werden mußte, wirkte sich bei Testpersonen negativ auf die Akzeptanz maschineller Verhaltensentscheidungen aus.

In dieser Arbeit wird die aktuelle Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs daher bei der Wissensrepräsentation, der Fahrzeugführung und der Verhaltensentscheidung berücksichtigt. Bei der flexiblen Automatisierung wird der mögliche Grad der Automatisierung, ein neuer Freiheitsgrad im System, abhängig von der aktuellen Leistungsfähigkeit bestimmt. Voraussetzung für die Bestimmung der eigenen Leistungsfähigkeit ist zunächst eine interne Repräsentation des eigenen Fahrzeugs mit seinen Fähigkeiten.

Integraler Bestandteil der Regler für die Quer- und Längsführung sind Gütemaße, die zur Laufzeit ständig mit der Spezifikation verglichen werden. Die flexible Automatisierung erfordert flexible Strukturen zur Generierung von Verhalten. Im vorgestellten Ansatz wird die hierarchische Konfiguration und die Auswahl der Regler erst zur Laufzeit abhängig vom Grad der Automatisierung festgelegt. Bei der Situationsanalyse wird ständig überprüft, ob die Leistungsfähigkeit nach eigener Einschätzung des Fahrzeugs noch ausreicht, um die aktuellen Aufgaben automatisch auszuführen. Die Initiative für autonomes Handeln und die damit verbundene Verantwortung übernimmt im System zur flexiblen Automatisierung eine zentrale Entscheidungsinstanz: Sie aktiviert und beendet benötigte Fähigkeiten, löst bei Bedarf Konflikte auf und gibt Gütekriterien vor, hinsichtlich derer sie die Handlungen bewertet.

Das vorgestellte System zur flexiblen Automatisierung wurde aus langjährigen praktischen Erfahrungen in sehenden Versuchsfahrzeugen abstrahiert und anschließend wieder erfolgreich in Versuchsfahrzeugen getestet. Das Versuchsfahrzeug VaMP, das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde, wurde international bekannt durch die Abschlußdemonstration von 'Prometheus' 1994, bei der automatische Längs- und Querführung auf einer dreispurigen Autobahn im normalen Verkehr demonstriert wurde, und durch die Langstreckenfahrt von München nach Odense 1995, die zu 95 Prozent automatisch quer- und längsgeregelt gefahren wurde. Die Erfahrungen während tausender Kilometer mit automatischer Quer- und Längsführung flossen in das System zur flexiblen Automatisierung ein, das 1999 zusammen mit dem EMS-Wahrnehmungssystem demonstriert werden konnte. Exemplarisch wurden die Grade der Automatisierung 'hybrider, adaptiver Tempomat' und 'automatische Querführung' auf der Autobahn demonstriert, 'automatische Notbremsung', 'autonome Längs- und Querführung' auf dem Testgelände der UniBwM.

Seit Abschluß meiner Arbeiten am ISF hat sich das vorgestellte System bei der Integration des automatischen Abbiegens weiter bewährt. Damit stehen alle Manöver für komplexere Missionen zur Verfügung, die in diesem Jahr auf Straßen niederer Ordnung geplant sind. Mit zunehmender Komplexität der Missionen und aufwendigeren Strategien zur Aufmerksamkeitssteuerung werden Konfliktlösungsstrategien an Bedeutung gewinnen.

Wegen der wachsenden kommerziellen Bedeutung wird die Zukunft der Automatisierung von Landfahrzeugen mit Rechnersehen stärker von industriellen Entwicklungen geprägt sein als in der Vergangenheit, in der die Grundlagen an Universitäten und Forschungsinstituten entwickelt wurden. Die zunehmende Rechenleistung bei sinkenden Kosten wird in den nächsten Jahren militärische und zivile Anwendungen ermöglichen, die ein hohes wirtschaftliches Potential aufweisen. Zukünftige Generationen von militärischen Fahrzeugen werden gegenüber aktuellen einen erhöhten Grad der Automatisierung aufweisen. Mit der Einführung des adaptiven Tempomaten wurde das erste Wahrnehmungssystem zur Automatisierung von Fahrfunktionen als Komfortsystem in den Markt eingeführt. Mit dem Einsatz von visuellen Wahrnehmungssystemen werden weitere automatisierte Fahrfunktionen für die Längs- und Querführung angeboten

werden. Ob jemals Kraftfahrzeuge autonom auf öffentlichen Straßen unterwegs sein werden, hängt mehr vom politischen Willen als von der technischen Machbarkeit ab.

Literatur

- Ackermann, J. (1988): *Abtastregelung*. Dritte Aufl. Berlin: Springer.
- Albus, J. S. (1991): Outline for a Theory of Intelligence. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Bd. 21, Nr. 3: S. 473–509.
- Albus, J. S. (1997): *4D/RCS: A Reference Model Architecture for Demo III*. Techn. Ber., National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg. NISTIR 5994.
- Albus, J. S. & Meystel, A. (1997): *Behavior Generation in Intelligent Systems*. Techn. Ber., National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg. NISTIR 6083.
- Alur, R., Henzinger, T. & Sontag, E., Hg. (1996): *Hybrid Systems III*, Bd. 1066 von *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer.
- Ameling, C. (1999): The Electronic Copilot for an Autonomous Vehicle Design and first results. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '99*, S. 521 – 526. Tokio.
- Ammon, D. (1997): *Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik*. Stuttgart: B.G. Teubner.
- Anderson, J. R. (1989): *Kognitive Psychologie*. Zweite Aufl. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft.
- Antsaklis, P., Kohn, W., Nerode, A. & Sastry, S., Hg. (1995): *Hybrid Systems II*, Bd. 999 von *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer.
- Antsaklis, P., Kohn, W., Nerode, A. & Sastry, S., Hg. (1997): *Hybrid Systems IV*, Bd. 1273 von *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer.
- Antsaklis, P. J. (1994): Defining Intelligent Control. *IEEE Control Systems*.
- Antsaklis, P. J. & Passino, K. M. (1993): Introduction to Intelligent Control Systems with High Degrees of Autonomy. In: P. J. Antsaklis & K. M. Passino, Hg., *An Introduction to intelligent and autonomous control*, S. 1 – 26. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Arkin, R. (1998): *Behavior-Based Robotics*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Åstrom, K. J. & Wittenmark, B. (1990): *Computer-Controlled Systems*. Zweite Aufl. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

- Bajcsy, R. (1995): Signal-to-Symbol Transformation and Vice Versa: From Fundamental Processes to Representation. *ACM Computing Surveys*, Bd. 27, Nr. 3: S. 310–313.
- Batavia, P. H., Pomerleau, D. & Thorpe, C. (1997): Overtaking Vehicle Detection Using Implicit Optical Flow. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.
- Baten, S. (1997): Embedded Personal Computer Daemon für Windows NT. Dokumentation zur Software.
- Baten, S. (1998): EMSSYNC Version 0.03. Dokumentation zur Software.
- Baten, S. (2000): *Erkennung der vertikalen Oberflächenstruktur zur Navigation im Gelände*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik. Angekündigt.
- Beck, C., Hg. (1993): *Straßenverkehrsrecht*. 29. Aufl. München: C.H. Beck.
- Becker, J. C., Simon, A., Söhnitz, I., Göllinger, H. & Schumacher, W. (1998): A Decentralized Path Planning and Control Structure for an Autonomous Vehicle. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 457 – 462. Stuttgart.
- Behringer, R. (1994): Road Recognition from Multifocal Vision. In: *Intelligent Vehicles Symposium '94*, S. 302 – 307. Paris.
- Behringer, R. (1996): *Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Behringer, R. & Maurer, M. (1996): Results on Visual Road Recognition for Road Vehicle Guidance. In: *Intelligent Vehicles Symposium '96*, S. 415 – 420. Tokyo.
- Bertozzi, M., Broggi, A., Conte, G. & Fascioli, A. (1997): Obstacle and Lane Detection on ARGO. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.
- Bertozzi, M., Broggi, A., Conte, G. & Fascioli, A. (1998): The Experience of the ARGO Autonomous Vehicle. In: *SPIE '98 - Enhanced and Synthetic Vision Conference*. Orlando. Nachdruck im Internet unter http://www.ce.unipr.it/computer_vision/papers/CV_biblio.html.
- Binfet-Kull, M., Heitmann, P. & Ameling, C. (1998): System Safety for an Autonomous Driving Vehicle. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 469 – 474. Stuttgart.
- Bohrer, S., Zielke, T. & Freiburg, V. (1995): An Integrated Obstacle Detection Framework for Intelligent Cruise Control on Motorways. In: *Intelligent Vehicles Symposium '95*, S. 276 – 281. Detroit.
- Bosch, G. R., Hg. (1995): *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. 22. Aufl. Düsseldorf: VDI.

- Braess, H.-H. & Reichart, G. (1995a): Prometheus: Vision des 'intelligenten Automobils' auf 'intelligenter Straße'? Versuch einer kritischen Würdigung - Teil 1. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 97, Bd. 4: S. 200 – 205.
- Braess, H.-H. & Reichart, G. (1995b): Prometheus: Vision des 'intelligenten Automobils' auf 'intelligenter Straße'? Versuch einer kritischen Würdigung - Teil 2. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 97, Bd. 6: S. 330 – 343.
- Brauckmann, M., Goerick, C., Groß, J. & Zielke, T. (1994): Towards All Around Automatic Visual Obstacle Sensing for Cars. In: *Intelligent Vehicles Symposium '94*, S. 79 – 84. Paris.
- Brockhaus (1990): *Brockhaus Enzyklopädie in 24 Bänden*, Bd. 10, Mannheim. F. A. Brockhaus.
- Brockhaus (1994): *Brockhaus Enzyklopädie in 24 Bänden*, Bd. 19, Mannheim. F. A. Brockhaus.
- Broggi, A., Bertozzi, M. & Fascioli, A. (1999a): ARGO and the MilleMiglia in automatico tour. *IEEE Intelligent Systems*. Nachdruck im Internet unter http://www.ce.unipr.it/computer_vision/papers/CV_biblio.html.
- Broggi, A., Bertozzi, M., Fascioli, A. & Conte, G. (1999b): *Automatic Vehicle Guidance: The Experience of the ARGO Autonomous Vehicle*. Singapore: World Scientific.
- Brooks, R. (1986): A Robust Layered Control System For A Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Bd. 2, Nr. 1: S. 14–23.
- Brüdigam, C. (1994): *Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Buchanan, B. G. & Shortliffe, E. H., Hg. (1984): *Rule-based expert systems*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Burckardt, M. (1985): *Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen*. Köln: TÜV Rheinland.
- Burckardt, M. (1991): *Fahrwerkstechnik: Bremsdynamik und PKW-Bremsanlagen*. Würzburg: Vogel.
- Choi, D., Oh, S.-Y. & Kim, K.-I. (1995): Fitness-Based Modular Visuosteering Architecture for Super Cruise Control of Automobiles. In: *IEEE Intelligent Vehicles '95*, S. 170 – 175. Detroit.
- Coughlan, D. (2000): Safety first? *aw - automotive world*, S. 50 – 53. März.
- Daimler-Benz, Hg. (1994): 'Prometheus'. Sonderdruck aus Daimler-Benz High-TechReport 4/94.
- Daviet, P. & Parent, M. (1996): Longitudinal and Lateral Servoing of Vehicles in a Platoon. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 41 – 46. Tokyo.

- Dennett, D. C. (1991): *Consciousness Explained*. Erste Aufl. Boston: Back Bay Books.
- Deshpande, A., Göllü, A. & Varaiya, P. (1997): SHIFT: A Formalism and a Programming Language for Dynamic Networks of Hybrid Automata. In: P. Antsaklis, W. Kohn, A. Nerode & S. Sastry, Hg., *Hybrid Systems IV*, Bd. 1273 von *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer.
- Dickmanns, D. (1997a): *Rahmensystem für visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer*. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Dickmanns, E. D. (1980): *Untersuchungen und Arbeitsschritte zum Thema künstliche Intelligenz: Rechnersehen und -steuerung dynamischer Systeme*. Techn. Ber., Hochschule der Bundeswehr München.
- Dickmanns, E. D. (1987): 4-D Dynamic Scene Analysis with Integral Spatio-Temporal Models. In: *4th Int. Symposium on Robotics Research*. Santa Cruz. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Dickmanns, E. D. (1989): Subject-Object Discrimination in 4D-Dynamic Scene Interpretation for Machine Vision. In: *IEEE-Workshop on 'Visual Motion'*, S. 298 – 304. Irvine.
- Dickmanns, E. D. (1992): Machine Perception Exploiting High-Level Spatio-Temporal Models. In: *AGARD-Lecture Series 185*. Hampton, USA. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Dickmanns, E. D. (1995a): Parallel use of differential and integral representations for realising efficient mobile robots. In: *7th Int. Symposium on Robotics Research*. Munich. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Dickmanns, E. D. (1995b): Road Vehicle Eyes for High Precision Navigation. In: *3rd International Workshop High Precision Navigation*. Stuttgart. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Dickmanns, E. D. (1996): Dynamic Machine Vision. Course at California Institute of Technology.
- Dickmanns, E. D. (1997b): Vehicles Capable of Dynamic Vision. In: *15th Int. Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*. Nagoya. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Dickmanns, E. D. (1999): An Expectation-based, Multi-focal, Saccadic (EMS) Vision System for Vehicle Guidance. In: *9th International Symposium of Robotic Research*. Salt Lake City. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Dickmanns, E. D. & Maurer, M. (1999): Eine Systemarchitektur für sehende autonome Straßenfahrzeuge. *at - Automatisierungstechnik*, S. 70 – 79.
- Dickmanns, E. D. & Mysliwetz, B. (1992): Recursive 3D Road and Relative Ego-State Recognition. *IEEE Transactions on PAMI, Special Issue on 'Interpretation of 3D scenes'*, S. 199 – 213.

- Dickmanns, E. D. & Zapp, A. (1986): A Curvature-based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision. In: *Mobile Robots*, S. 161 – 168. SPIE, Cambridge.
- Dickmanns, E. D. & Zapp, A. (1987): Autonomous High Speed Road Vehicle Guidance by Computer Vision. In: *10-th IFAC World Congress*, S. 232 – 237. Munich.
- Dickmanns, E. D., Behringer, R., Dickmanns, D., Hildebrandt, T., Maurer, M., Thomanek, F. & Schiehlen, J. (1994): The seeing passenger car VaMoRs-P. In: *Intelligent Vehicles Symposium '94*, S. 68 – 73. Paris.
- Dickmanns, E. D., Thomanek, F. & Maurer, M. (1995): *Multi Object Tracking*. Deliverable D2.3.5 ESPRIT Project 8329 CLEOPATRA, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg.
- Dillmann, R. & Huck, M. (1991): *Informationsverarbeitung in der Robotik*. Berlin: Springer-Verlag.
- Donges, E. & Naab, K. (1996): Regelsysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik. *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 5: S. 226 – 236.
- Douglass, B. P. (1998): *Real-Time UML - Developing Efficient Objects for Embedded Systems*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Duden (1989): *Deutsches Universalwörterbuch*, Mannheim. Duden-Verlag.
- Eco, U. (1985): *Einführung in die Semiotik*. Fünfte Aufl. München: Wilhelm Fink Verlag.
- Enkelmann, W. (1997): *Entwicklung von Systemen zur Interpretation von Straßenverkehrsszenen durch Bildfolgenauswertung*. St. Augustin: Infix.
- Estable, S., Schick, J., Stein, F., Janssen, R., Ott, R., Ritter, W. & Zheng, Y.-J. (1994): A Real-Time Traffic Sign Recognition System. In: *Intelligent Vehicles Symposium '94*, S. 213 – 218. Paris.
- Fagerer, C. (1996): *Automatische Teleoperation eines Tracking- und Greifvorgangs im Weltraum basierend auf Bilddatenauswertung*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Feil, E. (1987): *Antithetik neuzeitlicher Vernunft - 'Autonomie - Heteronomie' und 'rational - irrational'*. Erste Aufl. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Fenton, R. (1970): Automatic Vehicle Guidance and Control - A state of the art survey. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 19, Nr. 1.
- Feraric, J. P. (1996): *Echtzeitfähige Modellierung des individuellen Fahrerhaltens zur Realisierung adaptiver Unterstützungsfunktionen in einem Monitor- und Warnsystem*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Föllinger, O. (1994): *Regelungstechnik*. 8. Aufl. Heidelberg: Hüthig.

- Franke, U., Fritz, H., Kühnle, A. & Schick, J. (1993): Transputers on the road. In: *World Transputing Conference '93*. Aachen. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Franke, U., Mehring, S., Suissa, A. & Hahn, S. (1994): The Daimler-Benz Steering Assistant - a Spin-off from Autonomous Driving. In: *Intelligent Vehicles Symposium '94*, S. 120 – 125. Paris.
- Franke, U., Böttiger, F., Zomotor, Z. & Seeberger, D. (1995): Truck Platooning in Mixed Traffic. In: *IEEE Intelligent Vehicles '95*, S. 1 – 6. Detroit.
- Franke, U., Görzig, S., Lindner, F., Mehren, D. & Paetzold, F. (1997): Steps Towards an Intelligent Vision System for Driver Assistance in Urban Traffic. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.
- Franke, U., Gavrilă, D., Görzig, S., Lindner, F., Paetzold, F. & Wöhler, C. (1998): Autonomous Driving Goes Downtown. *IEEE Intelligent Systems*, Bd. 13, Nr. 6: S. 40 – 48.
- Fürst, S. (1999): *Cronos*. UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik. Programmbericht UniBwM/LRT/WE13/PB95-1.
- Gehrig, S. K. & Stein, F. J. (1998): A Trajectory-Based Approach for the Lateral Control of Vehicle Following Systems. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 1, S. 156 – 161. Stuttgart.
- Giacomini, F., Amundsen, T., Bogaerts, A., Hauser, R., Johnsen, B. D., Kohmann, H., Nordstrøm, R. & Werner, P. (1999): *Low-level SCI software functional specification*. Esprit Project 23174 - Software Infrastructure for SCI (SISCI). Deliverable D.1.1.1.
- Göbel, F. (1994): *Sicherheitsanalyse eines transputerbasierten Lenkungssystems für Kraftfahrzeuge*. Diplomarbeit, Fachhochschule Kempten. Durchgeführt bei der Daimler-Benz AG, Stuttgart, F1M/IS.
- Godbole, D., Lygeros, J. & Sastry, S. (1995): Hierarchical Hybrid Control: a Case Study. In: P. Antsaklis, W. Kohn, A. Nerode & S. Sastry, Hg., *Hybrid Systems II*, Bd. 999 von *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer.
- Godthelp, H. (1984): *Studies on Human Vehicle Control*. Dissertation, Instituut voor Zintuigfysiologie, TNO, Soesterberg.
- Goldbeck, J., Draeger, G., Huertgen, B., Ernst, S. & Wilms, F. (1998): Lane Following Combining Vision and DGPS. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 445 – 450. Stuttgart.
- Görzig, S. & Franke, U. (1998): ANTS - Intelligent Vision In Urban Traffic. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 545 – 549. Stuttgart.
- Grashey, S. & Onken, R. (1997): Adaptive Verhaltensmodellierung für den Autofahrer auf der Basis von statistischen Klassifikatoren. In: *2. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin. Vorabversion ohne Seitenangaben.

- Gregor, R. (1998): Wissensbasierte Navigation für autonome Straßenfahrzeuge. Interner Bericht.
- Grossman, R. L., Nerode, A., Ravn, A. P. & Rischel, H., Hg. (1993): *Hybrid Systems*, Bd. 736 von *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer.
- Hahn, S. (1996): Automation of Driving Functions - Future Development, Benefits and Pitfalls. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 309 – 312. Tokyo.
- Harel, D. (1987): Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems. *Science of Computer Programming*, Bd. 8: S. 231–274.
- Hattori, A., Kurami, K., Yamada, K., Ooba, K., Ueki, S. & Nakano, E. (1993): Control System for an Autonomous Driving Vehicle. *Heavy Vehicle Systems, Special Series, Int. Journal of Vehicle Design*, Bd. 1, Nr. 1: S. 99 – 113.
- Hebert, M. H., Thorpe, C. & Stentz, A., Hg. (1997): *Intelligent Unmanned Ground Vehicles - Autonomous Navigation Research at Carnegie Mellon*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Hema (1993): *Dokumentation Vita-2 Fahrzeugrechner*. Hema, Aalen.
- Hock, C. (1994): *Wissensbasierte Fahrzeugführung mit Landmarken für autonome Roboter*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Hofmann, U. (1999): Road Detection and Tracking. Persönliche Kommunikation, Weiterentwicklungen im Projekt 'Hybrides ACC'.
- von Holt, V. & Thomanek, F. (1996): *Robust Object Tracking*. Deliverable D2.3.6 ESPRIT Project 8329 CLEOPATRA, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg.
- Hopcroft, J. E. & Ullman, J. D. (1990): *Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie*. Zweite Aufl. Bonn: Addison-Wesley.
- ika (1999): Adaptive Cruise Control - Series Introduction and Future Development. Euromotor Seminar - Telematic, Vehicle and Environment. Institut für Kraftfahrwesen, Aachen.
- inmos (1992): *IMS D7314A IBM 386 PC ANSI C Toolset*. INMOS Limited.
- Inoue, T., Aoki, K., Suzuki, T. & Yokoyama, T. (1993): A Preview Steering Control Strategy Based on Computer Vision for Automated Vehicle Highway Systems. In: *IFAC 12th Triennial World Congress*, S. 123 – 126. Sydney, Australia.
- Isermann, R. (1988a): *Identifikation dynamischer Systeme*, Bd. 1. Berlin: Springer.
- Isermann, R. (1988b): *Identifikation dynamischer Systeme*, Bd. 2. Berlin: Springer.

- ITSC (1997): *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC '97*, Boston.
- ITSC (1999): *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC '99*, Tokio.
- IV (1994): *Intelligent Vehicles Symposium '94*, Paris.
- IV (1995): *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Detroit.
- IV (1996): *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Tokyo.
- IV (1998): *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Stuttgart.
- Jochem, T., Pomerleau, D., Kumar, B. & Armstrong, J. (1995a): PANS: A Portable Navigation Platform. In: *Intelligent Vehicles Symposium '95*, S. 107 – 112. Detroit.
- Jochem, T., Pomerleau, D. & Thorpe, C. (1995b): Vision Guided Lane Transition. In: *Intelligent Vehicles Symposium '95*, S. 30 – 35. Detroit.
- Johannsen, G. (1993): *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin: Springer-Verlag.
- Juberts, M., Raviv, D. & Bishop, J. (1993): Autonomous Road Following - A Vision-Based Approach for AVCS. In: *Intelligent Autonomous Systems*, S. 135 – 144. Pittsburgh.
- Kailath, T. (1980): *Linear Systems*. Erste Aufl. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kalman, R. E. (1960): A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Trans. ASME J. Basic Eng.*, Bd. 82: S. 34 – 45.
- Kanal, L. (1993): On pattern, categories, and alternate realities. *Pattern Recognition Letters*, Bd. 14: S. 241 – 255.
- Kato, S., Tomita, K. & Tsugawa, S. (1996): Visual Navigation along Reference Lines and Collision Avoidance for Autonomous Vehicles. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 385 – 390. Tokyo.
- Kato, S., Tomita, K. & Tsugawa, S. (1997): Lane-Change Maneuvers for Vision-based Vehicle. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.
- Kelly, A. & Stentz, A. (1998a): Rough Terrain Autonomous Mobility - Part 1: A Theoretical Analysis of Requirements. *Autonomous Robots*, Bd. 5: S. 129 – 161.
- Kelly, A. & Stentz, A. (1998b): Rough Terrain Autonomous Mobility - Part 2: An Active Vision, Predictive Control Approach. *Autonomous Robots*, Bd. 5: S. 163 – 198.
- Kiesewetter, W., Klinkner, W., Reichelt, W. & Steiner, M. (1997): Der neue Brake Assist von Mercedes-Benz - aktive Fahrerunterstützung in Notsituationen. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 99, Nr. 6: S. 330 – 339.

- Kim, K., Oh, S. Y., Kim, S. W., Jeong, H., Han, J., Lee, C. N., Kim, B. S. & Kim, C. S. (1995): An Autonomous Land Vehicle PRV II: Progresses and Performance Enhancement. In: *IEEE Intelligent Vehicles '95*, S. 264 – 269. Detroit.
- Klass, P. J. (1985): DARPA Envisions New Generation of Machine Intelligence. *Aviation Week & Space Technology*.
- Kollmann, K., Strauss, W., Peters, A. & Behnke, H. (1991): Das Motorsteuerungssystem der neuen Mercedes-Benz S-Klasse. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 52, Nr. 9: S. 446–452.
- Kopf, M. (1993): *Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Kopf, M. (1997): Vorschlag eines Entwurfs- und Bewertungsschemas für aus Nutzersicht konsistente Assistenzsysteme. In: *2. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin. Vorabversion ohne Seitenangaben.
- Kortüm, W. & Lugner, P. (1994): *Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen*. Berlin: Springer.
- Košecká, J., Blasi, R., Taylor, C. J. & Malik, J. (1997): Vision-Based Lateral Control of Vehicles. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.
- Košecká, J., Blasi, R., Taylor, C. J. & Malik, J. (1998): A Comparative Study of Vision-Based Lateral Control Strategies for Autonomous Highway Driving. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 1903 – 1908. Leuven.
- Kovács, G., Bokor, J., Palkovics, L., Gianone, L., Semsey, A. & Széll, P. (1998): Lane-Departure Detection and Control System for Commercial Vehicles. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 46 – 51. Stuttgart.
- Kujawski, C. (1993): *Der Modul Behaviour Decision*. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Programmiersprachen und Programmentwicklung.
- Kujawski, C. (1995): Deciding the Behaviour of an Autonomous Mobile Road Vehicle. In: *2nd IFAC Conference on Intelligent Autonomous Vehicles*. Helsinki. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Langer, D. (1996): An Integrated MMW Radar System for Outdoor Navigation. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 417 – 422. Minneapolis.
- Langer, D. & Kumar, B. (1997): Integrating Radar and Carrier Phase GPS for Classifying Roadway Obstacles. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.

- Langer, D. & Thorpe, C. (1995): Range Sensor Based Outdoor Vehicle Navigation, Collision Avoidance and Parallel Parking. *Autonomous Robots*, Bd. 2, Nr. 2: S. 147 – 161.
- Laugier, C., Paromtchik, I. & Parent, M. (1996): Developing Autonomous Maneuvering capabilities for future cars. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 41 – 46. Tokyo.
- Lee, D.-M., Kim, D.-H., Kim, B.-S., Moon, S.-H. & Han, M.-H. (1996): Development of Autonomous Test Vehicle Using Image Processing. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 409 – 414. Tokyo.
- Lichnofsky, R. & Ohnemüller, H. (1992): ABS, ASR und MSR der neuen S-Klasse. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 94, Nr. 6: S. 322–331.
- Ljung, L. (1987): *System Identification - Theory for the User*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Luenberger, D. G. (1971): An Introduction to Observers. *IEEE Trans. Automatic Control*, Bd. AC-16: S. 596 – 602.
- Lützel, M. & Dickmanns, E. D. (1998): Road recognition with MarVEye. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 341 – 346. Stuttgart.
- Maler, O., Hg. (1997): *Hybrid and Real-Time Systems*, Bd. 1201 von *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer.
- Maurer, M. (1993): *Kombinierte Quell- und Kanalcodierung für Subband-transformierte Bilder*. Diplomarbeit, TU München. Durchgeführt an der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Nachrichtentechnik.
- Maurer, M. (1998a): *Flexible Automatisierung von Fahrfunktionen im Kraftfahrzeug - Anmerkungen zu einer funktionalen Systemarchitektur*. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg.
- Maurer, M. (1998b): A Framework for Flexible Automation of Semi-autonomous Land Vehicles. In: *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, S. 531 – 536. Gaithersburg, Maryland.
- Maurer, M. (1999): Vision-based Flexible Automation for Semi-Autonomous Land Vehicles. In: *EUROMOTOR: Telematic / Vehicle and Environment*. Aachen.
- Maurer, M. & Dickmanns, E. D. (1997a): An advanced control architecture for autonomous vehicles. In: *AeroSense, Conference 3087*, S. 94 – 105. Orlando.
- Maurer, M. & Dickmanns, E. D. (1997b): A System Architecture for Autonomous Visual Road Vehicle Guidance. In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.

- Maurer, M. & Siedersberger, K.-H. (2000): *Anmerkungen zur automatischen Querführung*. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg. In Vorbereitung.
- Maurer, M., Behringer, R., Fürst, S., Thomanek, F. & Dickmanns, E. D. (1996a): A compact vision system for road vehicle guidance. In: *13th Int. Conference on Pattern Recognition*, S. 313 – 317. Wien.
- Maurer, M., Thomanek, F. & Dickmanns, E. (1996b): *Motion Understanding*. Deliverable D2.3.7 ESPRIT Project 8329 CLEOPATRA, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg.
- Maybeck, P. S. (1979): *Stochastic models, estimation and control*, Bd. 1 - 3. New York: Academic Press.
- McLauchlan, P. F. & Malik, J. (1997): Vision for Longitudinal Vehicle Control. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.
- Mehring, S., Franke, U. & Suissa, A. (1996): Optische Spurhaltung - Eine Unterstützung des Fahrers bei der Lenkaufgabe. *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 5.
- Meissner, H. G. (1982): *Steuerung dynamischer Systeme aufgrund bildhafter Informationen*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Mesarovic, M., Macko, D. & Takahara, Y. (1970): *Theory of Hierarchical, Multi-level Systems*. New York: Academic Press.
- Metzler, H.-G. (1997): Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung. In: H. Willumeit & H. Kolrep, Hg., *Wohin führen Unterstützungssysteme? - Entscheidungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen*, S. 206 – 225. 2. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, Berlin.
- Mimuro, T., Miichi, Y., Maemura, T. & Hayafune, K. (1996): Functions and Devices of Mitsubishi Active Safety ASV. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 248 – 253. Tokyo.
- Mitschke, M. (1990): *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, Bd. C: Fahrverhalten. Zweite Aufl. Berlin: Springer.
- Mitschke, M. (1995): *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, Bd. A: Antrieb und Bremsung. Dritte Aufl. Berlin: Springer.
- Mitschke, M. (1997): *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, Bd. B: Schwingungen. Dritte Aufl. Berlin: Springer.
- Mock-Hecker, R. (1994): *Wissensbasierte Erkennung kritischer Verkehrssituationen - Erkennung von Plankonflikten*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Müller, N. (1996): *Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Straßenfahrzeug*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.

- Mysliwetz, B. (1990): *Parallelrechner-basierte Bildfolgen-Interpretation zur autonomen Fahrzeugführung*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Nagel, H.-H. (1996): Zur Strukturierung eines Bildfolgen-Auswertungssystems. *Informatik: Forschung und Entwicklung*, Bd. 11, Nr. 1: S. 3 – 11.
- Nilubol, O. (1998): *Manövrieren in dynamischer Umgebung auf der Autobahn*. Diplomarbeit, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Nirschl, G. & Kopf, M. (1997): Untersuchung des Zusammenwirkens zwischen dem Fahrer und einem ACC-System in Grenzsituationen. In: *VDI/BMW-Gemeinschaftstagung 'Der Mensch im Verkehr'*. München. Vorabversion ohne Seitenangaben.
- Oeser, E. & Seitelberger, F. (1995): *Gehirn, Bewußtsein und Erkenntnis*, Bd. 2 von *Dimensionen der modernen Biologie*. Zweite Aufl. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Oestereich, B. (1997): *Objekt-orientierte Softwareentwicklung mit der Unified Modeling Language*. Dritte Aufl. München: Oldenbourg.
- Özgüner, U., Baertlein, B., Cavello, C., Farkas, D., Hatipoğlu, C., Lytle, S., Martin, J., Paynter, F., Redmill, K., Schneider, S., Walton, E. & Young, J. (1997a): The OSU Demo '97 Vehicle. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.
- Özgüner, U., Hatipoğlu, C., İftar, A. & Redmill, K. (1997b): Hybrid Control Design for a Three Vehicle Scenario Demonstration Using Overlapping Decompositions. In: P. Antsaklis, W. Kohn, A. Nerode & S. Sastry, Hg., *Hybrid Systems IV*, Bd. 1273 von *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer.
- Paetzold, F. & Franke, U. (1998): Road Recognition in Urban Environment. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 1, S. 87 – 91. Stuttgart.
- Pellkofer, M. (1999): *Ein Konzept für aktives Sehen im Rahmen von EMS-Vision*. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg.
- Pickenhahn, J. (1995): Elektronisch geregelter Bremskraftverstärker. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 97, Nr. 1: S. 36–37.
- Pomerleau, D. (1995): RALPH: Rapidly Adapting Lateral Position Handler. In: *Intelligent Vehicles Symposium '95*, S. 506 – 511. Detroit.
- Pomerleau, D. (1997a): Neural Network Vision for Robot Driving. In: M. H. Hebert, C. Thorpe & A. Stentz, Hg., *Intelligent Unmanned Ground Vehicles - Autonomous Navigation Research at Carnegie Mellon*, S. 53 – 72. Boston: Kluwer Academic Publishers.

- Pomerleau, D. (1997b): Visibility Estimation From a Moving Vehicle Using the RALPH Vision System. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.
- Pomerleau, D. & Jochem, T. (1996): Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering. *IEEE Expert*, Bd. 11, Nr. 2: S. 19 – 27.
- Popp, K. & Schiehlen, W. (1993): *Fahrzeugdynamik*. Stuttgart: B.G. Teubner.
- Puppe, F. (1988): *Einführung in die Expertensysteme*. Berlin: Springer.
- Rasmussen, J. (1983): Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Bd. 13, Nr. 3: S. 257–266.
- Reichardt, D. (1996): *Kontinuierliche Verhaltenssteuerung eines autonomen Fahrzeuges in dynamischer Umgebung*. Dissertation, Universität Kaiserslautern.
- Reichardt, D. M. (1998): Using Automated Assistance Systems - Putting The Driver into Focus. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 413 – 418. Stuttgart.
- Reimer, U. (1991): *Einführung in die Wissensrepräsentation*. Stuttgart: B.G. Teubner.
- Rieder, A. (1998): *ISF-Kameraplattformen zum aktiven Sehen*. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg. UniBwM/LRT/WE 13/IB 98-3 C.
- Rieder, A. (1999): Dynamische Objektdatenbasis. Dokumentation zur Software, UniBwM, Neubiberg.
- Rieder, A. (2000): Fahrzeuge sehen - Multisensorielle Objekterkennung auf verteilten Systemen. Entwürfe zur Dissertation an der UniBwM.
- Rill, G. (1994): *Simulation von Kraftfahrzeugen*. Braunschweig: Vieweg.
- Ritter, W. (1996): *Automatische Verkehrszeichenerkennung - Ein stabiles echtzeitfähiges Verkehrszeichenerkennungssystem basierend auf der Auswertung von digitalen Farbbildern*. Dissertation, Universität Koblenz-Landau.
- Roppenecker, G. (1994): Fahrzeugdynamik: Grundlagen der Modellierung und Regelung. *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 10, Nr. 42: S. 429–441.
- Ruckdeschel, W. (1991): *Visuell gestützte Fahrzeugführung mit parallelen Prozessoren für ein autonomes Transportsystem*. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg.
- Ruckdeschel, W. (1997): *Modellierung regelbasierten Pilotenverhaltens mit Petri-netzen*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.

- Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F. & Lorenzen, W. (1993): *Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen*. München und London: C. Hanser und Prentice-Hall. Titel der amerikanischen Originalausgabe: Object-Oriented Modeling and Design, 1991.
- Saridis, G. (1985): Machine-Intelligent Robots: A Hierarchical Control Approach. In: A. Wong & A. Pugh, Hg., *Machine Intelligence and Knowledge Engineering for Robotic Applications*, Bd. F33 von *ASI series*, S. 221–234. NATO, Berlin: Springer.
- Schädlich, D. (1997): *Der Spurwechsel als Manöver der Fahrzeugquerführung in der Rechnersimulation*. Studienarbeit, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Schädlich, D. (1998): *Optimierung des Manövers Spurwechsel*. Diplomarbeit, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Schell, F. (1992): *Bordautonomer automatischer Landeanflug aufgrund bildhafter und inertialer Meßdatenauswertung*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Schick, J. (1992): *Gleichzeitige Erkennung von Form und Bewegung durch Rechnersehen*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Schiehlen, J. (1995): *Kameraplattformen für aktiv sehende Fahrzeuge*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Schiehlen, J. & Dickmanns, E. D. (1994): A Camera Platform for Intelligent Vehicles. In: *Intelligent Vehicles Symposium '94*, S. 393 – 398. Paris.
- Schmidt, G. (1989): *Grundlagen der Regelungstechnik*. Zweite Aufl. Berlin: Springer.
- Schneider, S. J. & Özgüner, U. (1998): A Framework for Data Validation and Fusion, and Fault Detection and Isolation for Intelligent Vehicle Systems. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 528 – 533. Stuttgart.
- Schneiderman, H., Nashman, M., Wavering, A. & Lumia, R. (1995): Vision-based robotic convoy driving. *Machine Vision and Applications*, Bd. 8: S. 359 – 364.
- Schreiner, F. (1999): *Automatische Führung des Kraftfahrzeugs mit fahreradaptiven Eigenschaften*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Schwarze, K., Göllinger, H. & Busch, A. (1998): Actuator Concepts for an Autonomous Robotic Driver. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 463 – 468. Stuttgart.
- Siedersberger, K.-H. (1996a): *Entwicklung einer automatischen Längsführung für Kraftfahrzeuge auf Autobahnen*. Diplomarbeit, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.

- Siedersberger, K.-H. (1996b): *Entwurf eines Bremsdruckreglers für VaMoRs-P*. Studienarbeit, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Siedersberger, K.-H. (1999a): Inertial-basierte Zustandsschätzung für EMS-Vision. Persönliche Kommunikation.
- Siedersberger, K.-H. (1999b): *Koordinaten und Koordinatensysteme für EMS-Vision*. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg.
- Siedersberger, K.-H. & Maurer, M. (1998): Fahrfunktionen sehender autonomer Straßenfahrzeuge. In: *GMA-Kongreß Meß- und Automatisierungstechnik*. Ludwigsburg.
- Söhnitz, I. & Schwarze, K. (1999): Control of an Autonomous Vehicle: Design and First Practical Results. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '99*, S. 448 – 452. Tokio.
- Stiller, C., Hipp, J., Rössig, C. & Ewald, A. (1998): Multisensor Obstacle Detection and Tracking. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 451 – 456. Stuttgart.
- Stroustrup, B. (1994): *Die C++ Programmiersprache*. Zweite Aufl. Bonn: Addison-Wesley. 4. überarbeiteter Nachdruck, Titel der amerikanischen Originalausgabe: *The C++ programming language*, 1991.
- Sukthankar, R. (1993): RACCOON: A Real-time Autonomous Car Chaser Operating Optimally at Night. In: *Intelligent Vehicles 1993*. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Sukthankar, R. (1997): *Situation Awareness for Tactical Driving*. Dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- Thomanek, F. (1996): *Visuelle Erkennung und Zustandsschätzung von mehreren Straßenfahrzeugen zur autonomen Fahrzeugführung*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Thorpe, C. (1992): Point-Counterpoint: Big Robots vs Little Robots. In: *21st Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, Bd. 2. SPIE, Washington DC. 5. keynote address, Nachdruck der CMU ohne Seitenangaben.
- Thorpe, C., Hebert, M., Kanade, T. & Shafer, S. (1988): Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Bd. 10, Nr. 3: S. 401 – 412.
- Thorpe, C., Jochem, T. & Pomerleau, D. (1997): The 1997 Automated Highway Free Agent Demonstration. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '97*. Boston. Keine Seitenangaben, auf CD-ROM.
- Tolle, H. (1991): Autonomieerhöhung durch Imitation menschlicher Intelligenz. *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 39, Nr. 3 und 4: S. 85–91.
- Tölle, W. (1996): *Ein Fahrmänöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*, Bd. 299 von *Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik*. Düsseldorf: VDI Verlag.

- Tsinas, L. (1996): *Zur Auswertung von Farbinformation beim maschinellen Erkennen von Verkehrssituationen in Echtzeit*. Dissertation, UniBwM.
- Tsugawa, S. (1993): Vision-Based Vehicles in Japan: The Machine Vision Systems and Driving Control Systems. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, S. 278 – 285. Budapest.
- Tsugawa, S., Tomita, K., Hosaka, A. & Taniguchi, M. (1993): Steering Control Algorithms for Intelligent Vehicles with Machine Vision. In: *IFAC 12th Triennial World Congress*, S. 117 – 122. Sydney.
- Ulmer, B. (1994): VITA II - Active Collision Avoidance in Real Traffic. In: *Intelligent Vehicles Symposium '94*, S. 1–6. Paris.
- UML (1999): OMG Unified Modeling Language Specification. Veröffentlicht im Internet: <http://www.rational.com/uml>. Version 1.3.
- Unbehauen, H. (1993): *Regelungstechnik*, Bd. 2. 6. Aufl. Braunschweig: Vieweg.
- Unbehauen, H. (1994): *Regelungstechnik*, Bd. 1. 8. Aufl. Braunschweig: Vieweg.
- Unbehauen, H. (1995): *Regelungstechnik*, Bd. 3. Fünfte Aufl. Braunschweig: Vieweg.
- Vollmar, R. (1994): *Rechnergesteuerte Fahrzeuglängsführung für das VaMoRs-P*. Diplomarbeit, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Volpe, R., Balaram, J., Ohm, T. & Ivlev, R. (1996): The Rocky 7 Mars Rover Prototype. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Workshop WT1: Planetary Rover Technology and Systems*. Minneapolis. Ohne Seitenangaben.
- Weber, J., Koller, D., Luong, Q.-T. & Malik, J. (1995): New results in stereo-based automatic vehicle guidance. In: *Intelligent Vehicles Symposium '95*, S. 530 – 535. Detroit.
- Weiß, G. (1993): *Fehlertolerante Motoransteuerung*. Diplomarbeit, Fachhochschule Kempten. Durchgeführt bei der Daimler-Benz AG, Stuttgart, F1M/IS.
- Weisser, H., Schulenberg, P. J., Bergholz, R. & Langes, U. (1998): Autonomous Driving on Vehicle Test Tracks: Overview, Motivation, and Concept. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 2, S. 439 – 443. Stuttgart.
- Weisser, H., Schulenberg, P., Göllinger, H. & Michler, T. (1999): Autonomous Driving on Vehicle Test Tracks: Overview, Implementation and Vehicle Diagnosis. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '99*, S. 62 – 67. Tokio.
- Werner, S. (1996): *Schätzung von Zustandsgrößen im Versuchsfahrzeug VaMP durch Auswertung von Inertialsensoren*. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.

- Werner, S. (1997): *Maschinelle Wahrnehmung für den bordautonomen automatischen Hubschrauberflug*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Werner, S., Buchwieser, A. & Dickmanns, E. D. (1995): Real-Time Simulation of Visual Machine Perception for Helicopter Flight Assistance. In: *Proc. SPIE - Aero Sense*. Orlando. Nachdruck ohne Seitenangaben.
- Wershofen, K.-P. & Graefe, V. (1996): Situationserkennung als Grundlage der Verhaltenssteuerung eines mobilen Roboters. In: *Fachgespräch AMS*. München. Nachdruck der UniBwM ohne Seitenangaben.
- Wöhler, C., Anlauf, J. K., Pörtner, T. & Franke, U. (1998): Time Delay Neural Network Algorithm for Real-Time Pedestrian Recognition. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, Bd. 1, S. 247 – 252. Stuttgart.
- Wünsche, H.-J. (1988): *Bewegungssteuerung durch Rechnersehen*. Berlin: Springer-Verlag.
- Yamamoto, M., Kagawa, Y. & Okuno, A. (1999): Robust Control for Automated Lane Keeping Against Lateral Disturbances. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '99*, S. 240 – 245. Tokio.
- Zapp, A. (1988): *Automatische Straßenführung durch Rechnersehen*. Dissertation, UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Zheng, Y. J., Ritter, W. & Janssen, R. (1994): An Adaptive System for Traffic Sign Recognition. In: *Intelligent Vehicles Symposium '94*, S. 165 – 170. Paris.
- Zomotor, A. (1991): *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. Würzburg: Vogel.