

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



Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen

Karl-Heinz Siedersberger

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr. B. Färber
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. E.D. Dickmanns
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. F. Svaricek

Die Dissertation wurde am 11.06.2003 bei der Universität
der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, Werner-Heisenberg-Weg 39,
eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
am 18.06.2003 angenommen.

Tag der Promotion: 04.11.2003

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik an der Universität der Bundeswehr München. Für die - trotz einiger hektischer Phasen - schöne Zeit danke ich allen Mitarbeitern des Instituts.

Im Besonderen gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. E.D. Dickmanns, der durch sein Engagement und seine Geduld, die er mir und meiner Arbeit entgegengebracht hat, maßgeblich zu deren Gelingen beigetragen hat.

Ein Dank auch dem Zweitgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Svaricek.

Für die Übernahme des Vorsitz der Prüfungskommission danke ich Herrn Prof. Dr. B. Färber.

Allen Kollegen, namentlich S. Baten, S. Fürst, R. Gregor, U. Hofmann, V. von Holt, M. Lützeler, M. Maurer, M. Pellkofer und A. Rieder, gebührt mein Dank für die kollegiale und produktive Zusammenarbeit im Rahmen der Entwicklung von **EMS-Vision**.

Bei U. Hofmann und M. Maurer möchte ich mich für die vielen konstruktiven Diskussionen, auch wenn diese teilweise schon Jahre zurückliegen, bedanken. Gleiches gilt für Herrn Dr.-Ing. K.-D. Otto, wobei die oft ausgedehnten Diskussionen mit ihm nicht immer fachlicher Natur waren.

Der guten Seele des Instituts, Frau M. Gabler, danke ich besonders für die stets nette Unterstützung und die Hilfsbereitschaft in allen Dingen rund um den Institutsalltag. Vergelt's Gott Madeleine.

An dieser Stelle möchte ich einen vielfach an mich gerichteten Dank an die Mitarbeiter der Werkstatt weitergeben. Ohne die tatkräftige Unterstützung durch M. Bold, J. Hollmayer, E. Oestereicher und R. Stömmer wäre es mir nicht möglich gewesen, beide Versuchsfahrzeuge über all die Jahre auf einem derart hohen Ausrüstungsstandard zu halten.

Meinen Eltern Hildegard und Karl, meinen Verwandten und Freunden danke ich für die Ablenkungen vom Promovieren während all der Jahre. Ein spezieller Dank gebührt Herrn J. Schober, der mich in die Geheimnisse der Elektronik einführte und Herrn K. Lockenvitz, der mir in mechanischen Fragen stets mit Rat und Tat zur Seite steht.

Niederaltich, im Dezember 2003.

Kurzfassung

Damit ein Fahrerassistenzsystem als vertrauenswürdiger technischer Partner vom Führer eines Kraftfahrzeugs akzeptiert wird - sei es als reiner Assistent oder als selbständiger Agent in bestimmten Bereichen - muss es über annähernd die gleichen Wahrnehmungs- und Verhaltensfähigkeiten wie der menschliche Fahrzeuglenker verfügen. Eine explizite Repräsentation dieser Fähigkeiten ist dazu unerlässlich.

Die Realisierung inertialer Wahrnehmungsfähigkeiten zur Erfassung des Fahrzeug-Eigenzustands und die Verhaltensgenerierung zum Zwecke der Fortbewegung sowie die Repräsentation all dieser Funktionalitäten in Form von Fähigkeiten sind Inhalte dieser Arbeit. Als Basis dient das im Rahmen der Entwicklung des **EMS-Vision** Systems (**'Erwartungsbasiertes Multifokales Sakkadisches - Sehen')** entstandene Fähigkeitenkonzept, welches eine elementare Komponente einer Systemarchitektur für (semi-)autonome Agenten darstellt.

Die entwickelten Ansätze und Konzepte wurden exemplarisch in den beiden Versuchsfahrzeugen für autonome Mobilität und Rechnersehen (**VAMORS** und **VAMP**) implementiert und erfolgreich getestet. Im Rahmen unterschiedlich komplexer autonomer Fahrmissionen konnten sowohl Wahrnehmungsfähigkeiten zur inertialen Bestimmung des Fahrzeug-Eigenzustands und zur Positionsbestimmung als auch Fortbewegungsfähigkeiten für den On- wie für den Offroad-Betrieb demonstriert werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
Liste der verwendeten Abkürzungen	xvii
1 Einführung	1
1.1 Autonome Landfahrzeuge	4
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	5
1.3 Struktur der Arbeit	6
2 Stand der Technik	7
2.1 Aktuelle Entwicklungen im Bereich autonomer Landfahrzeuge	8
2.1.1 Asiatische und australische Gruppen	8
2.1.1.1 University of Tokio	8
2.1.1.2 Tohoku University	8
2.1.1.3 Australian National University	9
2.1.2 Amerikanische Gruppen	9
2.1.2.1 University of California, Berkeley	10
2.1.2.2 Ohio State University	10
2.1.2.3 Carnegie Mellon University	11
2.1.2.4 National Institute of Standards and Technology	12
2.1.3 Europäische Gruppen	13
2.1.3.1 Institut national de recherche en informatique et en automatique	14
2.1.3.2 Universidad de Alcalá und Universidad Politécnica de Madrid	14

2.1.3.3	Università di Parma	15
2.1.3.4	Daimler-Benz	15
2.1.3.5	Dornier	16
2.1.3.6	Niedersächsisches Projekt 'Autonomes Fahren'	17
2.1.3.7	Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung	17
2.1.3.8	Universität der Bundeswehr München	18
2.2	Versuchsträger	20
2.2.1	Übersicht	20
2.2.2	Versuchsfahrzeuge des ISF: VAMoRs und VAMP	20
2.2.2.1	VAMoRs	20
2.2.2.2	VAMP	24
3	Das EMS-Vision System	27
3.1	Vorangegangene Entwicklungen am ISF	27
3.1.1	Vorläufer-Systeme	28
3.1.1.1	BVV Architekturen (1984 - 1991)	28
3.1.1.2	TIP-Bus Architekturen (1991 - 1996)	28
3.1.2	Diskussion der Ergebnisse	31
3.2	Hardware-Konzept	32
3.3	Funktionale Systemarchitektur	34
3.4	Software-Struktur	38
3.5	Zentrale Wissensrepräsentation	39
4	Repräsentation des Eigenfahrzeugs	43
4.1	Das Eigenfahrzeug im Szenenbaum	44
4.1.1	Teilszenenbaum 'Eigenfahrzeug'	44
4.1.2	Zugriff auf Größen des Eigenfahrzeugs	47
4.2	Der Fahrschlauch	48
4.2.1	Modell des Fahrschlauchs	50
4.2.2	Repräsentation des Fahrschlauchs im Szenenbaum	53

5	Inertiale/visuelle Eigenzustandsschätzung	55
5.1	Konzept zur inertialen/visuellen Eigenzustandsschätzung	57
5.2	Multisensorielle Zustandsschätzung mittels Kalman-Filter	59
5.3	Dynamische Teilsysteme eines Kraftfahrzeugs	60
5.4	Realisierung der inertialen/visuellen Zustandsschätzung am Beispiel d. Nickdynamik	62
5.4.1	Problematik der Nickdynamikschätzung bei Landfahrzeugen	62
5.4.2	Inertiale Nickdynamikschätzung	63
5.4.3	Visuelle Nickdynamikschätzung	65
5.4.4	Fusionierende Zustandsschätzung	67
5.4.4.1	Schätzung der Nickdynamik	68
5.4.4.2	Weitere Anwendungen	72
 6	 Fähigkeitenkonzept	 73
6.1	Fähigkeiten in einem autonomen System	76
6.1.1	Zustandsautomatenmodell	77
6.1.2	Fähigkeittennetz	80
6.1.3	Aktivierung	82
6.1.4	Monitoring	85
6.1.4.1	Überprüfung aller für eine Fähigkeit notwendigen Bedin- gungen	85
6.1.4.2	Überwachung der Ausführung einer Tätigkeit	86
6.1.5	Vorhersage	90
6.2	Das Fähigkeitenkonzept im 'EMS-Vision' System	91
6.3	Spezielle Kategorien von Fähigkeiten	92
6.3.1	Fähigkeiten zur Wahrnehmung des Eigenzustands	92
6.3.2	Fähigkeiten zur Fortbewegung bei einem (semi-)autonomen Kraft- fahrzeug	95
6.3.2.1	Besonderheiten von Fortbewegungs-Fähigkeiten	96
6.3.2.2	Ablaufmodelle für Fortbewegungs-Fähigkeiten	100

7	Fähigkeitenbasierte Fahrzeugführung	105
7.1	Einbindung des Fähigkeitenkonzepts in die Fahrzeugführung	108
7.1.1	Struktur der Fahrzeugregelung	108
7.1.2	Fahrzeugführung	112
7.1.2.1	Einbindung des Fähigkeitenkonzepts	112
7.1.2.2	Adaption der Fahrzeugregelung	115
7.1.2.3	Überwachung der Verfügbarkeit von Fortbewegungs- Fähigkeiten	116
7.2	Fahrmanöver im Detail	117
7.2.1	Ausweichen	117
7.2.1.1	Modellierung der Kurvenfahrt	118
7.2.1.2	Festlegung der Bahnkurve beim Ausweichen	122
7.2.1.3	Kinematische und fahrdynamische Randbedingungen	125
7.2.1.4	Darstellung als Fortbewegungs-Fähigkeit	126
7.2.2	Stop&Go	127
7.2.2.1	Auslegung der Längsregelung	128
7.2.2.2	Fähigkeitenbasierte Repräsentation	131
7.2.2.3	Ergänzende Bemerkungen	134
8	Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung	137
8.1	Verhaltensentscheidung in autonomen Systemen	137
8.1.1	Organisatorische Hierarchie der Entscheidungsinstanzen	138
8.1.2	Grundlagen für das Fällen von Entscheidungen	140
8.1.3	Aufgabenverteilung in einem hierarchischen Entscheidungssystem	141
8.2	Aufgaben von BDL	146
8.2.1	Überwachung der Fahrzeugführung	146
8.2.2	Koordinierung der Fahrzeugführung	147
9	Experimentelle Ergebnisse	149
9.1	Koordinierte Abfolge von Fahrhandlungen	150
9.2	Ausgewählte Fahrmanöver	153
9.2.1	Ausweich-Manöver	153
9.2.2	Stop&Go	156
9.2.2.1	Anhalten und Anfahren	156
9.2.2.2	Folgefahrt mit minimalem Abstand	158
9.3	Inertiale/visuelle Eigenzustandsschätzung	159
9.3.1	Inertiale Eigenzustandsschätzung	159
9.3.2	Fusionierende Eigenzustandsschätzung	161
10	Zusammenfassung und Ausblick	167
	Literatur	169

Abbildungsverzeichnis

1.1	Funktionsschema des Chrysler-Autopiloten von 1958	2
2.1	Versuchsfahrzeug VAMORS	22
2.2	VAMORS: Zwei-Achsen-Kameraplattform	22
2.3	VAMORS: Einbauorte der wichtigsten Zusatzkomponenten	23
2.4	VAMORS: Innenraum	23
2.5	VAMORS: Fahrersitz	23
2.6	Versuchsfahrzeug VAMP	24
2.7	VAMP: Einachsige-Kameraplattform	25
2.8	VAMP: Kofferraum	25
2.9	VAMP: Zusatzeinrichtungen fürs 'autonome Fahren'	25
2.10	VAMP: Fahrersitz	25
2.11	VAMP: Rückbank	25
3.1	EMS-Hardwarearchitektur	33
3.2	Funktionale Systemarchitektur	35
3.3	EMS-Prozessverteilung	38
3.4	Zentrale Wissensbasis	40
4.1	Repräsentation des Eigenfahrzeugs im Szenenbaum	45
4.2	Fahrschlauch	49
4.3	Klothoide	51
4.4	Fahrschlauchsegmente	52
4.5	Szenenbaum mit Fahrschlauch	53
5.1	Prinzip der inertialen/visuellen Zustandsschätzung	58

5.2	Blockstruktur der Kraftfahrzeugdynamik	61
5.3	Nickwinkelproblematik bei Landfahrzeugen	63
5.4	Modell zur Berechnung der Aufbauschwingungen beim Bremsen	68
6.1	Zuordnung von Fähigkeiten	75
6.2	Zustandsautomatenmodell	78
6.3	Funktionalität des Fähigkeitsnetzes	81
6.4	Fähigkeitsnetz mit 3 Experten	82
6.5	Sequenzdiagramm für die Aktivierung von Fähigkeiten	84
6.6	Fortschrittsmaße für Fähigkeiten	87
6.7	Inertialbasierte Wahrnehmungsfähigkeiten	94
6.8	Fortbewegungsfähigkeiten eines Kraftfahrzeugs	96
6.9	Erweiterung des Zustandsautomatenmodells für Fortbewegungsfertigkeiten	101
6.10	Erweiterung des Zustandsautomatenmodells für Fahrhandlungsfähigkeiten .	102
6.11	Längs- und Querverführungsautomat bei der 'Spurfahrt'	103
7.1	Automatische Fahrzeugführung am Beispiel eines maschinellen Kopiloten .	106
7.2	Gliederung der 'Fortbewegungs'-Komponente der EMS-Systemarchitektur .	106
7.3	Hierarchischer Aufbau der Fahrzeugregelung	110
7.4	Ankopplung der '4D-Ebene' an die 'regelbasierte Ebene'	114
7.5	Nicht-Holonomes Fahrzeugmodell	118
7.6	Modell der Kurveneinfahrt	120
7.7	Spezielle Bahnkurven beim Ausweichen	123
7.8	Geometrie eines Kurvenzuges	124
7.9	Hierarchische Zustandskarten des 'Ausweich'-Manövers	127
7.10	Abstandsregler	129
7.11	Zustandskarten des 'Stop&Go'-Manövers	132
7.12	Kennlinie des Sollabstands beim 'Stop&Go'-Manöver	132
8.1	'Organisatorische Hierarchie' der Entscheidungsinstanzen	139
8.2	Sequenzdiagramm bei Aktivierung einer Fortbewegungs-Fähigkeit	148
9.1	Zusammenhängende Fahrmission I	150

9.2	Fahrmission II	151
9.3	Koordinierte Abfolge von Fahrhandlungen	152
9.4	Lenkraten bei einem Ausweich-Manöver	155
9.5	Resultierender Lenkwinkel bei einem Ausweich-Manöver	155
9.6	Trajektorie eines Ausweich-Manövers	155
9.7	Durchführung eines Ausweich-Manövers	156
9.8	Anhalten und Anfahren	157
9.9	Folgefahrt mit minimalem Abstand	158
9.10	Gemessene und geschätzte Längsbeschleunigung	159
9.11	Gemessene und geschätzte Längsgeschwindigkeit	160
9.12	Detailausschnitt der gemessenen und geschätzten Längsgeschwindigkeit . .	160
9.13	Geschätzter geodätischer Nickwinkel	161
9.14	Ausschließlich auf inertialen Messungen basierende Schätzung des Fahrzeugnickwinkels	162
9.15	Ausschließlich auf visuellen Messungen basierende Schätzung des Fahrzeugnickwinkels	163
9.16	Fusionierter Fahrzeugnickwinkel	164

Tabellenverzeichnis

2.1	Versuchsträger im Bereich autonomer Landfahrzeuge	21
5.1	Variablen zur Beschreibung des Zustands eines starren Körpers	64
5.2	Variablen zur Schätzung der Hub-/Nickdynamik	69
6.1	Inertialbasierte Wahrnehmungshandlungen	94
6.2	Fahrhandlungen	98
7.1	Fortbewegungsfertigkeiten der Längsführung und ihre steuerungs-/regelungstechnischen Realisierungen	113

Liste der verwendeten Abkürzungen

Symbole		Symbole	
a	..Beschleunigung	T	..Zyklus- oder Abtastzeit
α	..Schräglaufwinkel	t	..Zeit
B	..Bremskraft	t_k	..diskreter Zeitpunkt
b	..Breite	v	..Geschwindigkeit
b_0	..Anfangsbreite	ψ	..Gierwinkel
b_1	..Breitenänderung	χ	..Tangenten- bzw. Kurswinkel
β	..Schwimmwinkel	x	..eine Zustandsgröße
c	..Krümmung bzw. Federkonstanten	x	..x-Koordinate
c_0	..Anfangskrümmung	y	..ein Meßwert
c_1	..Krümmungsänderung	y	..y-Koordinate
δ	..Lenkwinkel	ω	..Winkelgeschwindigkeit
ϵ	..Grenzwert	z	..z-Koordinate
F	..Kraft	Vektoren und Matrizen	
ϕ	..Roll-/Wankwinkel	ν	..Störgrößenvektor
γ	..Fahrbahnlängsneigung	u	..Steuervektor
h	..Höhe	x	..Zustandsvektor
i	..Bremskraftverteilung	y	..Meßvektor
J	..Trägheitsmoment	A	..Zustandsmatrix
ϑ	..Drosselklappenwinkel	B	..Steuermatrix
k	..Verstärkungsfaktor bzw. Dämpfungskonstante	C	..Jakobi- oder Meßmatrix
L	..Gesamtlänge	I	..Einheitsmatrix
l	..Laufflänge	K	..Verstärkungsmatrix
M	..Moment	O	..Beobachtbarkeitsmatrix
m	..Masse	P	..Schätzfehlerkovarianzmatrix
p	..Bremsdruck	Φ	..Transitionsmatrix
θ	..Nickwinkel	Q	..Systemfehlerkovarianzmatrix
R	..Radius	R	..Meßfehlerkovarianzmatrix
r	..Krümmungsradius		

Indizes		sonstige Symbole	
0	...initialer Wert	f (...)	...Systemgleichung
2	...Fahrzeugaufbau	h (...)	...Meßgleichung
A	...(Anfangs-)Punkt A		
Achs	...Achse zu Achse		
B	...(Hilfs-)Punkt B		
Begin	...Anfangswert		
Diff	...Differenz		
E	...(Hilfs-)Punkt E		
End	...Endwert		
F	...(Hilfs-)Punkt F		
FS	...Fahrschlauch		
FSS _i	...i-tes Fahrschlauchsegment		
Fusion	...fusionierte Größe		
Fzg	...Fahrzeug		
H	...Hinten bzw. Hinterachse		
Inertial	...Inertial bestimmte Größe		
Ist	...Ist-Wert		
Max	...Maximalwert		
Mess	...Meßgröße		
Min	...Minimalwert		
Norm	...normierter Wert		
Obj	...Objekt		
SP	...Schwerpunkt		
Soll	...Soll-Wert		
V	...Vorn bzw. Vorderachse		
Vision	...visuell bestimmte Größe		
Z	...(Ziel-)Punkt Z		

Kapitel 1

Einführung

1958 umschrieb Frank Rowsome Jr. in der April-Ausgabe der Zeitschrift 'Popular Science' seine erste Fahrt mit einem Tempomaten, der von Chrysler in einem Fahrzeug der firmeneigenen Nobelmarke 'Imperial' als Weltneuheit vorgestellt wurde, mit folgenden Worten:

*„It is a real comfort on a hard run. For psychological reasons, it is not an incitement to dozing. It can be used on many, but by no means all, intercity roads, and it gives some fascinating insights into unconscious driving habits.“*¹

Der Autor sah den Nutzen des Chrysler-Autopiloten vor allem bei längeren Fahrten auf Schnellstraßen. Auf hügeligen Strecken, innerorts oder in dichtem Verkehr wies die automatische Geschwindigkeitsregelanlage, die für den Imperial als Sonderzubehör zu einem Preis von \$88.70 (Grundpreis des Autos \$5898.-) angeboten wurde, jedoch Defizite auf.

Dies lag in der Hauptsache darin begründet, dass die Umsetzung der Regelung, mit der die Geschwindigkeit auf dem eingestellten Wert gehalten werden sollte, zur damaligen Zeit erheblichen mechanischen Aufwand bedeutete. Abbildung 1.1 zeigt das grobe Funktionsschema des Tempomaten. Es handelt sich um ein elektromechanisches System, bei dem mittels eines mechanischen Fliehkraftreglers (Flyball Governor) die Geschwindigkeit geregelt wurde. Als Stellglied diente ein Elektromotor, der mit dem Gestänge der Drosselklappenbetätigung verbunden war und dessen Drehrichtung durch den Fliehkraftregler vorgegeben wurde. Die Wunschgeschwindigkeit war über ein Drehrad am Armaturenbrett einzustellen. Die Funktionsweise war allerdings wesentlich komplexer, als dass sie mit dieser einfachen Beschreibung erschöpfend geschildert wäre.

Seit diesen Tagen hat sich technologisch einiges geändert und so hat auch im Automobilbau die Mikroelektronik Einzug gehalten. Eine Fahrgeschwindigkeitsregelung lässt sich heute in einfacher Weise mit elektronischen Komponenten realisieren und gehört teilweise zur Serienausstattung. Abstandsregelnde Tempomaten sind die aktuelle Evolutionsstufe.

¹<http://www.imperialclub.com>

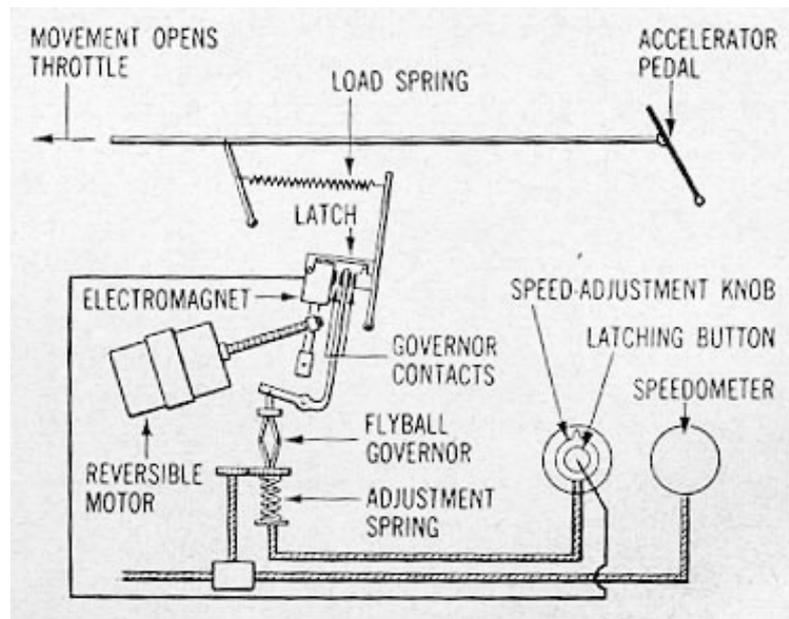


Abbildung 1.1: Funktionsschema des Chrysler-Autopiloten von 1958¹

Sie können in einigen Fahrzeugen der Oberklasse als Sonderzubehör erworben werden. Diese ACC-Systeme ('Adaptive Cruise Control') übernehmen neben der ursprünglichen Funktion, die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers einzuhalten, auch die Aufgabe, den für die aktuelle Geschwindigkeit nötigen Sicherheitsabstand einzuregeln [IKA 99]. Dazu wird mit Hilfe von Radar- oder Lasersensoren der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und die Relativgeschwindigkeit zu diesem ermittelt. In zukünftigen Ausprägungen von ACC-Systemen soll das Bremsen bis in den Stand und das Wiederanfahren möglich sein, was bei den gegenwärtigen Systemen noch nicht der Fall ist.

Neben diesen dem Komfortsegment zugeordneten Systemen wurden auch im Bereich der aktiven Sicherheit Anstrengungen unternommen, Funktionen zu automatisieren. Das bekannteste Beispiel ist das Antiblockiersystem (ABS), das Anfang der achtziger Jahre seinen Siegeszug begann und heute in fast jedem Auto und seit einigen Jahren auch in Motorrädern verbaut wird.

All diese Systeme firmieren unter dem Oberbegriff der Fahrerassistenzsysteme (FAS). Fahrerassistenzsysteme in Kraftfahrzeugen haben in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen. Sei es aus eigener Überzeugung der Automobilhersteller oder weil es der Markt fordert, wurden und werden immer mehr Routineaufgaben des Fahrzeuglenkers automatisiert. Es wird zum einen bezweckt, den Fahrer von immer wiederkehrenden Aufgaben zu entlasten, damit sich dieser vermehrt dem stetig dichter werdenden Straßenverkehr widmen kann. Zum anderen werden Funktionen realisiert, die von menschlichen Fahrern nur bedingt umgesetzt werden können. Dieser Trend wird sich auch in Zukunft fortsetzen.

Neben der Einteilung in Komfort- und Sicherheitssysteme können Fahrerassistenzsysteme nach ihrem Grad der Automatisierung untergliedert werden. Einen Vorschlag liefern [NAAB & REICHART 98]. Sie unterscheiden:

„informierende Systeme, die dem Fahrer (bei Bedarf) zusätzliche, ggf. auch bewertete Informationen über spezifische Fahrsituationen übermitteln, die er schnell und leicht interpretieren, bewerten und in entsprechende Handlungen umsetzen kann.“ Hierzu zählen Warnsysteme wie der Spurwechsellassistent [JULA ET AL. 99] oder Spurverlassenswarner [BATAVIA, 99], [RISACK ET AL. 00]. Letztgenannte Systeme werden bereits kommerziell angeboten, z.B. von den Firmen AssistWare² oder Odetics/Iteris³. Navigationssysteme werden ebenfalls zu dieser Kategorie gezählt.

„Servosysteme, die vom Fahrer vorgegebene Betätigungsaktionen erleichtern oder optimieren.“ Zu dieser Gruppe gehören die klassischen Servosysteme von Bremse und Lenkung (z.B. Bremskraftverstärker oder Servolenkung).

„automatisch intervenierende Systeme, die insbesondere die Auswirkungen der ohne Intervention im Systemverhalten vorhandenen Nichtlinearitäten so begrenzen, dass das Gesamtsystemverhalten im Rahmen der Fahrererwartungen gehalten wird.“ Beispiele für diese Kategorie sind die bekannten aktiven Fahrwerkregelungssysteme wie Antiblockiersystem (ABS), Antriebsschlupfregelung (ASR) oder Fahrdynamikregelung (FDR) [BOSCH 01].

„automatisch agierende Systeme, die vom Fahrer initiiert oder von dessen erkannten Absichten ausgelöst nach seinen 'Regeln' (Anweisungen) Aktionen ausführen. Die Überwachung der automatischen Funktionen und ggf. die Übernahme der Funktion bleibt Aufgabe des Fahrers.“ Der zu Beginn dieses Abschnitts vorgestellte Tempomat und die ACC-Systeme sind typische Beispiele für diese FAS-Kategorie.

autonom agierende Systeme, übernehmen die Fahraufgabe nach Aktivierung durch den Fahrer/Bediener in bestimmten Situationen oder auch ganzen Missionen vollständig. Die Systeme fahren soweit selbständig, dass die Überwachung durch den Fahrer nicht mehr erforderlich ist. Der Stauassistent, so wie er im Rahmen der Forschungsinitiative INVENT⁴ ('Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik') entwickelt wird, ist ein typischer Vertreter dieser Gattung. Aber auch vollautonome Fahrzeuge, die selbständig komplexe Fahrmissionen durchführen, gehören zu dieser Kategorie.

²<http://www.assistware.com>

³<http://www.odetics-its.com>

⁴<http://www.invent-online.de>

Die Klasse der 'autonom agierenden Systeme' stellt eine Ergänzung zur Definition nach [NAAB & REICHART 98] dar und rundet diese nach oben ab. Bei derartigen Systemen wird der Fahrer komplett von der Fahraufgabe entlastet. Autonome Kraftfahrzeuge repräsentieren daher die oberste Stufe der Evolution bei Assistenzsystemen in Automobilen. Sie werden im Fachgebiet der Robotik den 'autonomen Landfahrzeugen' zugerechnet.

1.1 Autonome Landfahrzeuge

Gemäß [ROPPENECKER 00] stellen Kraftfahrzeuge (selbstfahrende, maschinell angetriebene Straßenfahrzeuge), Anhängerfahrzeuge (nicht selbstfahrende Straßenfahrzeuge) und Züge (Kombinationen von Kfz und Anhängern) je eine Untergruppe von Straßenfahrzeugen dar. Straßenfahrzeuge ihrerseits bilden zusammen mit spurgebundenen Fahrzeugen (Eisen-, Straßenbahnen) und Sonderfahrzeugen (Kettenfahrzeuge, Baumaschinen, landwirtschaftliche Maschinen) die Gruppe der Landfahrzeuge.

Wie bei allen autonomen Systemen steht auch bei autonomen Landfahrzeugen das Ziel im Vordergrund, den Menschen von seinen Tätigkeiten teils in gefährlicher Umgebung zu entlasten oder Aufgaben ganz zu übernehmen. Bei autonomen Fahrzeugen ist dies die Entlastung von gefährlichen oder schwierigen Fahraufgaben. So werden im militärischen Bereich große Anstrengungen unternommen, unbemannte Landfahrzeuge für Beobachtungsmissionen zu entwickeln. Im zivilen Bereich wird an Erkundungs- und Bergungsgeräten für den Einsatz in vergifteten, verstrahlten oder schwer passierbaren Gegenden gearbeitet. In der Automobilindustrie ist es Programm, das Autofahren für den Menschen sicherer und komfortabler zu gestalten.

Autonome Fahrzeuge führen ihre Fahraufgaben nach vorgegebenen oder gelernten Regeln selbständig aus. 'Autonom' wird im Sinne von 'bordautonom' verstanden, was bedeutet, dass sämtliche für die selbständige Ausführung der geforderten Aufgabe notwendigen Komponenten wie Sensorik, Stromversorgung, Aktuatorik usw. sich 'an Bord' des Fahrzeugs befinden. Ein autonomes Fahrzeug benötigt gemäß dieser Definition keine zusätzliche Infrastruktur. Neben der bordeigenen Ausstattung werden nur die für den Menschen geschaffenen Einrichtungen genutzt, um sich in der gleichen Umgebung wie der Mensch fortzubewegen.

„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.“ [MAURER 00].

Nach [ANTSACLIS & PASSINO 93] 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 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.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Je komplexer die Aufgaben sind, die automatisiert werden, desto umfangreicher wird das vom (semi-)autonomen System zu verwaltende Wissen. Übertragen auf Fahrerassistenzsysteme in Kraftfahrzeugen bedeutet dies, dass mit zunehmendem Grad der Automatisierung immer mehr Informationen nicht nur über den Zustand des eigenen Fahrzeugs, sondern auch über die Umwelt gewonnen, verarbeitet und bewertet werden müssen.

Bei einem Antiblockiersystem ist es völlig ausreichend, die Messwerte der Raddrehzahlsensoren auszuwerten, um bei einem blockierenden Rad den Bremsdruck zurückzunehmen, damit die Blockade gelöst wird. Bei einem ACC-System müssen bereits Relativgrößen zu anderen Verkehrsteilnehmern bestimmt und ausgewertet werden, damit eine Abstandsregelung überhaupt realisiert und die grundsätzliche Entscheidung getroffen werden kann, ob ein vorausfahrendes Fahrzeug für die Längsregelung relevant ist oder nicht. Werden Aufgaben autonom ausgeführt, wie etwa bei der Durchführung autonomer Fahrmissionen, so muss neben den Relativgrößen zu anderen Verkehrsteilnehmern im Rahmen einer Situationsanalyse auch deren aktuelles und zukünftiges Verhalten bestimmt und bewertet werden. Außerdem muss der autonome Agent seine eigene Leistungsfähigkeit kennen, damit in sinnvoller Weise eigene Aktionen angestoßen und ausgeführt werden können.

Wie diese Beispiele zeigen, ist das in einem Assistenzsystem zu repräsentierende Wissen um so umfangreicher und vielfältiger, je höher der Automatisierungsgrad ist. Mit zunehmendem Grad der Automatisierung steigt somit der Aufwand, Wissen im System explizit zu repräsentieren. Dies führt bei autonomen Fahrzeugen zu einer umfangreichen, in verschiedene Abstraktionsstufen unterteilten internen Modellierung des eigenen Systems und der Umwelt, in der sich das Fahrzeug bewegt.

Ziel dieser Arbeit ist zu zeigen, wie in einem autonomen Landfahrzeug Wissen über das eigene System explizit repräsentiert, wie dieses Wissen gewonnen und wie es bei der Generierung von Fahraktionen genutzt werden kann. Grundlage hierfür sind Modelle zur Wissensrepräsentation in unterschiedlichen Detaillierungs- und Abstraktionsgraden wie sie u.a. in [MAURER 00] vorgestellt und in [RIEDER 00] zur Realisierung einer zentralen Datenverwaltung genutzt wurden. Angewandt auf ein autonomes Landfahrzeug ergibt sich eine sehr detaillierte Beschreibung des 'Eigenfahrzeugs' und all seiner Teilkomponenten, welche die systemdynamischen Zustandsgrößen der einzelnen Teilkomponenten sowie deren Relativlagen zueinander einschließt. Manche fahrzeuginternen, für die Verhaltensgenerierung notwendigen Zustandsgrößen sind aber nicht oder nur mit großem Aufwand messbar, so dass für deren Bestimmung geeignete Schätzverfahren basierend auf Inertialdaten entwickelt wurden.

Für die Generierung von Verhaltensweisen in einem autonomen Landfahrzeug reicht die explizite Repräsentation aller systemdynamischer Zusammenhänge innerhalb des 'Eigenfahrzeugs' und der Relativlagen zu allen anderen Objekten der Umwelt allerdings nicht aus, sondern es müssen auch sämtliche sowohl generell als auch aktuell verfügbaren Fähigkeiten des 'Eigenfahrzeugs' explizit repräsentiert werden. Das Wissen über die eigene Leistungsfähigkeit ist für ein autonomes System unabdingbar, um selbständig Planen und

Entscheiden zu können. Im Besonderen trifft die Notwendigkeit der expliziten Repräsentation der eigenen Leistungsfähigkeit in einem autonomen Landfahrzeug auf die Fähigkeiten zur Fortbewegung und deren Umsetzung in Fahrhandlungen zu.

Die für ein autonomes System entwickelten Verfahren und Methoden können in Assistenzsystemen mit geringerem Grad der Automatisierung ebenfalls verwendet werden. Je nach Ausprägung und Funktionsumfang des semiautonomen Systems können eine passende Repräsentationstiefe und geeignete Verfahren gewählt werden, um die geforderte Funktion zu gewährleisten.

1.3 Struktur der Arbeit

Da sich diese Arbeit mit der autonomen Fahrzeugführung von Landfahrzeugen beschäftigt, werden im folgenden Kapitel aktuelle Forschungsergebnisse und Entwicklungen aus diesem Fachgebiet vorgestellt.

In diesem Kontext wird in Kapitel 3 das am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik der Universität der Bundeswehr entwickelte **EMS-Vision** System zur Bewegungssteuerung durch Rechnersehen präsentiert. Im Zuge der Entwicklung dieses Systems entstand auch die vorliegende Arbeit.

Als elementarer Bestandteil einer zentralen Wissensrepräsentation wird in Kapitel 4 gezeigt, wie im **EMS**-System ein autonomes Kraftfahrzeug (= Eigenfahrzeug) strukturell unter Verwendung von systemdynamischen Zustandsgrößen beschrieben werden kann.

Wie Zustandsgrößen des eigenen Fahrzeugs mit Hilfe von rekursiven Schätzverfahren, Fahrzeugdynamikmodellen und den zur Verfügung stehenden Sensoren ermittelt werden können, wird in Kapitel 5 vorgestellt, wo ein Ansatz zur inertial basierten Eigenzustandsschätzung in Kraftfahrzeugen präsentiert wird.

Neben dem Wissen über die systemdynamischen Zustandsgrößen des autonomen Fahrzeugs ist auch die explizite Repräsentation von im autonomen System vorhandenen Fähigkeiten von Nöten, damit vom System durchführbare Entscheidungen getroffen werden können. Im Mittelpunkt des Kapitels 6 steht daher das entwickelte Fähigkeitenkonzept. Kapitel 7 befasst sich mit der Umsetzung des vorgestellten Fähigkeitenkonzepts in einem autonomen Kraftfahrzeug und hier speziell mit der Struktur der Fahrzeugführungs-Komponente und der Generierung von Fortbewegungsfähigkeiten.

Die situationsgerechte und punktgenaue Aktivierung der in Kapitel 7 vorgestellten Fortbewegungsfähigkeiten ist Aufgabe der Entscheidungsinstanz für die Fortbewegung, die in Kapitel 8 näher erläutert wird.

Ergebnisse zu den bearbeiteten Themenbereichen sind im Kapitel 9 dokumentiert. Die notwendigen Experimente wurden in zahlreichen Fahrversuchen durchgeführt.

Eine Zusammenfassung im letzten Kapitel hebt die Schlüsselkonzepte, welche bei der autonomen Fahrzeugführung Anwendung finden, nochmals hervor und zeigt auf, wie diese auf Fahrerassistenzsysteme mit einem geringeren Automatisierungsgrad übertragen werden können.

Kapitel 2

Stand der Technik

In den letzten Jahren haben Forschungsaktivitäten und - damit einhergehend - Veröffentlichungen im Bereich autonomer Landfahrzeuge im Vergleich zu den Anfängen in den siebziger Jahren (z.B. [THOMPSON 77] und [TSUGAWA ET AL. 79]) erheblich zugenommen. Die Erforschung autonomer Landfahrzeuge entwickelte sich zu einem eigenständigen Zweig innerhalb der Robotik, wobei enge Verbindungen zu benachbarten Fachdisziplinen wie den autonomen Luftfahrzeugen oder den Indoor-Robotern vorhanden sind.

Maßgeblichen Anteil an dieser Entwicklung hatte die immer billiger und besser werdende Hardware. So wurde die Rechenleistung bei Mikroprozessoren in dieser Zeit um ein Vielfaches gesteigert. Aber auch bei Sensoren und Aktoren fand eine stetige Weiterentwicklung statt. Waren die Versuchsfahrzeuge der ersten Generation meist Lastkraftwagen oder ähnliche Vehikel¹, die genügend Platz für die großvolumigen Rechneranlagen dieser Zeit boten, so können dank der in vielen Bereichen stattgefundenen Miniaturisierung heute Personenkraftwagen oder noch kleinere Fahrzeuge als Versuchsträger verwendet werden.

Ein zweiter Grund für die rasante Entwicklung in diesem Bereich sind die zahlreichen internationalen Forschungsprojekte. Durch sie wurden die notwendigen Finanzmittel für die einzelnen Vorhaben zur Verfügung gestellt.

Im folgenden Abschnitt werden aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Bereich der autonomen Landfahrzeuge vorgestellt. Die Aufstellung beschränkt sich in Anlehnung an [ROPPENECKER 00] auf Straßenfahrzeuge und Sonderfahrzeuge, da diese in nahezu den gleichen Domänen (on-road wie auch off-road) eingesetzt werden können. Spurgebundene Landfahrzeuge sind nicht berücksichtigt.

Bei der Darstellung des aktuellen Standes der Technik werden außerdem nur solche Ergebnisse berücksichtigt, die im Rahmen von Versuchen mit Testfahrzeugen gewonnen wurden. Simulationsergebnisse geben häufig nur bedingt Auskunft darüber, wie tragfähig Ansätze zur autonomen Fahrzeugführung in realen Szenarien wirklich sind.

¹Übersichten über diese Generation von Testfahrzeugen finden sich z.B. bei [ZAPP 88], [BRÜDIGAM 94] oder [MÜLLER 96].

2.1 Aktuelle Entwicklungen im Bereich autonomer Landfahrzeuge

2.1.1 Asiatische und australische Gruppen

Im asiatischen Raum konzentrieren sich die Forschungsarbeiten auf das 'autonome Fahren' unter Nutzung zusätzlicher Infrastruktur wie Magneträger oder Leitkabel in Leitplanken. Speziell Automobilfirmen sind in diesem Bereich aktiv.

Ein bereits seit über einem Jahrzehnt laufendes Forschungsprojekt ist das japanische 'Advanced Safety Vehicle' Projekt (ASV). Es wurde 1991 vom japanischen Ministerium für Transport und den japanischen Fahrzeugherstellern ins Leben gerufen. Im Dezember 2000 wurde zum Ende der zweiten Phase dieses Projekts im Rahmen einer von der 'Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association' (AHSRA) organisierten Abschlusspräsentation (DEMO2000) eine Reihe autonomer und semiautonomer Systeme vorgestellt². Zur Zeit befindet sich das Projekt in seiner dritten Phase, wo 32 Systeme im Feldversuch getestet werden.

Einen guten Überblick über asiatische Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet (semi-)autonomer Kraftfahrzeuge, die ohne zusätzliche Infrastruktur wie Magneträger auskommen, bietet [MAURER 00]. Diese ausführliche Aufstellung wird nachfolgend um aktuelle Forschungsergebnisse speziell auch aus dem Bereich des Fahrens abseits befestigter Wege und der dazu notwendigen Technologien ergänzt.

2.1.1.1 University of Tokio

Unter der Federführung der Maschinenbau-Fakultät der Universität von Tokio beteiligte sich ein Konsortium aus mehreren Universitätsinstituten an der DEMO2000 [FUJIOKA 00]. Ein in einer digitalen Karte des Testgeländes festgelegter Kurs wurde unter Nutzung von DGPS ('Differential Global Positioning System') autonom abgefahren. Die Versuchsfahrzeuge waren dazu mit einem DGPS-Modul (Standardabweichung der Messdaten: 10cm) ausgerüstet. Die Datenfusion von DGPS- und Odometriedaten erfolgte mittels eines Kalman-Filters. Zur Erkennung von Hindernissen wurde ein Laserscanner eingesetzt. Für die Längsführung war neben der Odometrie noch ein Beschleunigungssensor und für die Querrführung ein optischer Faserkreisel zur Bestimmung der Giergeschwindigkeit vorgesehen. Mit dieser Ausrüstung konnte das autonome Abfahren des in der Karte festgelegten Kurses sowie das Ausweichen an Hindernissen demonstriert werden.

2.1.1.2 Tohoku University

Am Mechatronik-Institut der Tohoku Universität wird für den autonomen Betrieb von Container-Verladefahrzeugen auf Container-Terminals ebenfalls auf DGPS gesetzt

²<http://www.ahsra.or.jp>

[WANG ET AL. 00]. Die Genauigkeit von DGPS reicht für die Navigation in den oft nur wenigen Dezimeter breiten Gassen zwischen den Containern jedoch nicht aus, so dass zur Stützung der DGPS-Signale zusätzlich CCD-Kameras, Ultraschall-Sensoren und ein räumlich auflösender Laserscanner verwendet werden. Mit Hilfe dieses Ortungssystems ist es möglich, Container, die in einer digitalen Karte registriert sind, mit den Verladefahrzeugen autonom anzufahren, aufzunehmen und sie an ihrem Bestimmungsort wieder abzusetzen.

2.1.1.3 Australian National University

Ein Toyota Landcruiser mit Vierrad-Antrieb dient an der 'Australian National University' (ANU) als Versuchsplattform für 'autonomes Fahren'. Ein allradgetriebenes Fahrzeug wurde gewählt, da es zum einen genügend Platz für notwendige Versuchshardware besitzt und zum anderen robust genug ist, um auch Fahrten abseits befestigter Wege zu ermöglichen. Gegenwärtig wird das Fahrzeug nur für Fahrten auf Straßen benutzt. In dieser Domäne konnte autonomes Spurfahren demonstriert werden, wobei die Spurerkennung durch Rechnersehen erfolgt. Die Ansätze zur Fahrspurerkennung gehen auf [DICKMANN 87b] zurück. Als Sichtsystem dienen zwei Stereokamera-paare, von denen das eine über kleine Brennweiten für den Nahbereich, das zweite über Objektive mit großen Brennweiten für den Fernbereich verfügt. Neben der üblichen Aktuatorik (Gas, Bremse, Lenkung) ist das Fahrzeug zusätzlich noch mit einem GPS-Modul, einer 3-achsigen IMU ('Inertial Measurement Unit') und einem Laser-Entfernungsmesser ausgestattet. Zukünftig sollen neben der Erkennung von anderen Fahrzeugen auch autonome Fahrten im Gelände unternommen werden (alle Angaben nach [FLETCHER ET AL. 01]).

2.1.2 Amerikanische Gruppen

In den Vereinigten Staaten gibt es eine Reihe von Programmen, in deren Rahmen die Entwicklung autonomer Fahrzeuge gefördert wird. Für den Bereich autonomer Landfahrzeuge gehören das kalifornische PATH-Programm³ und das 'Unmanned Ground Vehicle Technology Enhancement an Exploitation Program' (UGVTEE oder kurz: UGV)⁴ des US-Verteidigungsministeriums mit zu den Wichtigsten.

Das PATH-Programm ('Partners for Advanced Transit and Highways') wurde 1986 als überdisziplinäre Forschungsinitiative gegründet, um Grundlagen für neue Strategien, Systeme etc. zu schaffen, die helfen sollen, die Verhältnisse auf Kaliforniens Straßen zu verbessern. Verwaltet wird das Programm vom 'Institute for Transportation Studies' (ITS), der 'University of California Berkeley' (UCB) und vom 'California Department of Transportation' (CALTRANS). Das PATH-Projekt gliedert sich in drei Teilbereiche, wobei im Rahmen der 'Advanced Vehicle Control Systems' (AVCS) auch 'autonomes Fahren' zu

³<http://www.path.berkeley.edu>

⁴<http://www.jointrobotics.com>

den Forschungsschwerpunkten zählt. Wichtiger Partner auf diesem Gebiet ist die 'National Highway Traffic Safety Administration' (NHTSA), die für die Zulassung neuer Systeme in Kraftfahrzeugen zuständig ist.

Ziel des 1990 ins Leben gerufenen UGV-Programms ist die Entwicklung autonomer Kampffahrzeuge für den Einsatz im Gefechtsfeld des nächsten Jahrtausends. Das UGV-Programm bestand ursprünglich aus zwei Kampagnen [SHOEMAKER 97]. In der 1992 abgeschlossenen Phase Demo I wurden verschiedene ferngesteuerte und begrenzt autonome Landfahrzeuge entwickelt. 1996 wurde mit der Demo II die zweite Kampagne des Projekts abgeschlossen. In dieser Phase konzentrierten sich die Entwicklungen auf Verfahren zur Missionsplanung und autonomen Navigation in weglosem Gelände. Aufgrund der Notwendigkeit, 'autonomes Querfeldein-Fahren' mit bis zu 20mph ($\approx 35\text{km/h}$) durchzuführen, wurde 1997 das UGV-Programm um eine dritte Phase (Demo III) verlängert, damit weitere Fähigkeiten zur Wahrnehmung und Fahrzeugführung abseits befestigter Wege entwickelt werden können [SHOEMAKER & BORNSTEIN 00].

2.1.2.1 University of California, Berkeley

Im Rahmen des PATH-Programms beteiligt sich auch das 'Department of Electrical Engineering and Computer Science' der 'University of California Berkeley' (UCB) an Forschungsvorhaben im Bereich des 'autonomen Fahrens' auf Straßen. Zusammen mit Honda wurde eine automatische Querführung entwickelt [KÖSECKÀ ET AL. 97]. Die visuelle Fahrspurerkennung orientiert sich am 4D-Ansatz (siehe [DICKMANN 87a]) und verwendet als Sensoren ein monochromes Stereokammerapaar [TAYLOR ET AL. 96]. Mit diesem Ansatz konnten auf kalifornischen Highways automatische Querführung mit Geschwindigkeiten bis 90mph ($\approx 145\text{km/h}$) demonstriert werden.

2.1.2.2 Ohio State University

Auf der vom 'US National Automated Highway System Consortium' (NAHSC) im Jahr 1997 veranstalteten Demonstration (kurz DEMO97) nahm auch das 'Department of Electrical Engineering' der 'Ohio State University' (OSU) teil. Mit den drei vorgestellten Testfahrzeugen konnten innerhalb genau spezifizierter Szenarien Fortbewegungsfähigkeiten wie 'Spurhalten', 'Spurwechsel' und 'Anfahren' automatisch durchgeführt werden. Die Versuchsfahrzeuge wurden dazu herstellerseitig mit elektronisch ansteuerbaren Aktuatoren ausgerüstet. Auf Seiten der Sensorik kamen ein Laser-Radar, ein von der OSU entwickeltes Radar, ein monokulares Kamerasystem, seitliche Radare, ein Winkelratengeber und weitere fahrzeuginterne Größen messende Sensoren zum Einsatz (alle Angaben nach [ÖZGÜNER ET AL. 97a]). Die Fahrspurerkennung erfolgt sowohl mittels des Kamerasystems als auch mittels des dafür eigens entwickelten Radarsystems. Voraussetzung für die radarbasierte Spurerkennung ist, dass die Fahrbahnmarkierungen aus reflektierendem Material bestehen [FARKAS ET AL. 97]. Weitere Schwerpunkte lagen

im Bereich der Repräsentation von Fortbewegungsaktionen [ÖZGÜNER ET AL. 97b] und in der Reglerentwicklung zur Generierung von Fahrmanövern [HATIPOĞLU ET AL. 97], [HASKARA ET AL. 97].

2.1.2.3 Carnegie Mellon University

Eine an vielen US-Programmen beteiligte Institution ist das 'Robotics Institut' der 'Carnegie Mellon University' (CMU) in Pittsburgh. Auf dem Fachgebiet der 'autonomen Landfahrzeuge' gehört es weltweit zu den ersten Adressen. Seit den Anfängen im Jahr 1984 wurden eine Reihe von Fahrzeugen zu 'Navigationslabors' ('Navigation Laboratory', Navlab) umgerüstet. Bis heute wurden 10 Fahrzeuge aufgebaut, angefangen bei Navlab 1, einem Chevrolet Kastenwagen, über Navlab 2, einem 'High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle' (HMMWV), und Navlab 5, einem Pontiac Trans Am (Baujahr 1990), bis hin zu Navlab 9 und 10, zwei Bussen vom Typ New Flyer City Buses von der Firma Houston Metro. Aufgrund der großen Bandbreite von Fahrzeugtypen werden diese entsprechend dem jeweiligen Einsatzzweck und der betrachteten Domänen eingesetzt (alle Angaben nach [HEBERT ET AL. 97]).

Bei der DEMO97 präsentierten die Forscher der CMU insgesamt fünf Fahrzeuge. Ein Fahrzeug - ein Oldsmobile Silhouette Minivan (Navlab 8) - war teilautomatisiert, die anderen vier waren zwei vollautomatisierte Limousinen vom Typ Pontiac Bonneville (Navlab 6 und Navlab 7) und die beiden Busse (Navlab 9 und Navlab 10). Im Rahmen der 'Free Agent Demonstration' (siehe [THORPE ET AL. 97a]) wurden Fähigkeiten wie 'Spurfahren', 'Spurwechsel', 'Einfahren in eine Spur', 'Geschwindigkeits- und Abstandhalten' und kooperative Fahrmanöver demonstriert. Die Fahrzeuge waren dazu mit digitalen Radios zum Empfang des Verkehrsfunks, mit Laser-Radaren zur Überwachung des rückwärtigen Verkehrsraums und mit Radarsystemen der Firma Delco für die Hinderniserkennung im Vorausschaubereich ausgerüstet. Das Sichtsystem, dessen Wurzel das an der CMU entwickelten RALPH-System ist, wurde von der Firma AssistWare⁵ geliefert.

Beim RALPH-System ('Rapidly Adapting Lateral Position Handler') handelt es sich um eines von zwei an der CMU entwickelten Bildverarbeitungssystemen zur Unterstützung der Fahrzeugquerführung. Bei RALPH wird ein Ansatz verfolgt, der auf nachgeführten Schablonen beruht, um zunächst die Straßenkrümmung und anschließend den Eigenzustand des Fahrzeugs relativ zur Straße zu bestimmen [POMERLEAU 95]. Beim zweiten System - ALVINN ('Autonomous Land Vehicle in a Neural Network') - handelt es sich um ein dreischichtiges neuronales Netzwerk, das zugunsten von RALPH aufgegeben wurde. Ein Bild (32x30 Pixel) der Straße dient beim ALVINN-Algorithmus als Eingangssignal für das neuronale Netz, woraus innerhalb des Netzes die Lenkrichtung für die automatische Querführung ermittelt wird [POMERLEAU 92].

Eine weitere vielbeachtete Demonstration im Bereich der Führung von semiautonomen Straßenfahrzeugen war die Tour 'No-Hands-Across-America' von Wahington

⁵<http://www.assistware.com>

D.C. nach San Diego im Sommer 1995 mit Navlab 5. Von den insgesamt 2850 Meilen konnten 2796 Meilen mit automatischer Querführung zurückgelegt werden [POMERLEAU & JOCHEM 96]. Dazu wurde Navlab 5 mit dem tragbaren Navigationssystem PANS ('Portable Advanced Navigation Support') ausgerüstet, welches einen Laptop als Basisrechner benutzt und Meßdaten von einer Farbkamera, vom DGPS, von einem Lenkwinkelsensor und von einem optischen Kreisel auswertet [JOCHEM ET AL. 95]. Wie RALPH so ist auch PANS mittlerweile kommerziell verfügbar [THORPE ET AL. 97b].

Im Rahmen des UGV-Programms lag der Fokus der CMU auf der Entwicklung von Systemarchitekturen für autonome Landfahrzeuge, die sich in unwegsamem Gelände bewegen. Dies umfasst den Bereich der Wahrnehmung, die Entscheidungsfindung sowie die Generierung von Verhaltensweisen zur Fortbewegung, wodurch sicheres Navigieren im Gelände möglich ist. Mit SMARTY wurde ein System geschaffen, das die lokale Umfahrung von Hindernissen ermöglicht, indem Daten von entfernungsmessenden Sensoren dazu verwendet werden, Sollgrößen für die Aktuatoren zu generieren. Informationen über (nicht-)befahrbare Bereiche vor dem Fahrzeug werden an ein globales Navigationsmodul geschickt. Dieses plant unter Verwendung des D^* -Algorithmus' (siehe dazu [STENTZ 94]) eine Route auf befahrbarem Terrain und erzeugt ebenfalls eine Sollgrößenanforderung an die Lenkung, um die globale Mission erfüllen zu können. Aufgabe des zentralen Schiedsrichtermoduls DAMN ('Distributed Architecture for Mobile Navigation') ist es, situationsabhängig die passende Anforderung an die Aktuatoren weiterzuleiten.

Mit Navlab 2 wurde die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes mit unterschiedlichen abstandsmessenden Sensoren (Laser Range Findern und Kamera-Stereosystemen) im Rahmen der Abschlusspräsentation der zweiten Phase (Demo II) des UGV-Projekts nachgewiesen. Details können in [HEBERT ET AL. 97] nachgelesen werden.

2.1.2.4 National Institute of Standards and Technology

Wie die 'Carnegie Mellon University' so verfügt auch das 'National Institute of Standards und Technology' (NIST) über ein HMMWV, mit dem Fahrversuche im Gelände durchgeführt werden können. Im Rahmen von DEMO III wurden Fahrten im Gelände mit positiven Hindernissen wie Bäumen oder Sträuchern gezeigt. Dabei konnten Geschwindigkeiten bis zu 20mph ($\approx 35\text{km/h}$) erreicht werden. Zur Erkennung von Hindernissen wurde eine scannende EBK ('Entfernungs-Bild-Kamera') der Firma Dornier eingesetzt. Ein GPS-Sensor, eine Inertialsensoreinheit und andere typische Fahrzeugsensoren wie Lenkwinkelsensor und Odometrie vervollständigen die Sensorausstattung des NIST-HMMWV [COOMBS ET AL. 00].

Aufgrund einer aus den Daten der EBK gewonnenen Hinderniskarte werden für die nächsten 20m alle möglichen Solltrajektorien für das Fahrzeug berechnet. Den Trajektorien liegt dabei das Klothoidenmodell (vgl. Abschnitt 4.2.1) zugrunde. Das Modul für 'Autonomous Mobility' (AM) wählt aus allen möglichen Solltrajektorien diejenige aus, welche bei geringstem Lenkeinschlag den weitesten Abstand von den Hindernissen ermöglicht [LACAZE ET AL. 98].

Grundlage der Systemarchitektur ist das echtzeitfähige Führungssystem RCS ('Real-time Control System') [ALBUS & MYSTEL 97]. Dabei handelt es sich um eine Referenzarchitektur für autonome Roboter, die wegen ihrer kanonischen Form als Grundlage für zahlreiche hierarchisch gegliederte Robotersystemarchitekturen dient.

2.1.3 Europäische Gruppen

In Europa gab und gibt es eine Vielzahl von nationalen und europaweiten Förderprogrammen, im Rahmen derer auch 'automatisches bzw. autonomes Fahren' im Fokus von Entwicklungs- und Forschungstätigkeiten stand und steht.

Eine aktuelle vom deutschen 'Bundesministerium für Bildung und Forschung' (BMBF) getragene Forschungsinitiative ist INVENT ('Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik'). In INVENT haben sich 23 deutsche Institutionen zusammengeschlossen, um in drei Projekten:

- die Verkehrssicherheit zu erhöhen,
- den Verkehrsfluss zu optimieren,
- die eingesetzte Technik nutzergerechter zu gestalten,
- eine Selbstorganisation des Verkehrs durch Informationen im Verkehrsnetzwerk zu erreichen und
- einen Ausgleich zwischen individuellen und gesellschaftlichen Zielen bei der Verkehrsabwicklung zu erwirken,

damit Mobilität weiterhin möglich ist. Ein Teilprojekt befasst sich dabei mit Fahrerassistenz und aktiver Sicherheit.

Zwei vom 'Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung' (BWB) initiierte und daher militärisch ausgerichtete Projekte sind zum einen PRIMUS ('Programm intelligenter mobiler unbemannter Systeme') und zum anderen IFF ('Intelligente Fahrzeug-Funktionen'). Ziel dieser militärischen Robotik-Vorhaben ist die Entbindung der Soldaten von Aufgaben mit hohem Gefährdungsgrad durch unbemannte Systeme. Die dritte Phase des IFF-Projekts wurde im Oktober 2001 mit einer Präsentation an der Universität der Bundeswehr München abgeschlossen. PRIMUS befindet sich zur Zeit ebenfalls in der dritten Projektphase. Ein aus diesen nationalen Programmen hervorgegangenes internationales Projektabkommen ist AUTONAV ('Autonomous Navigation'). Unter dem Dach von AUTONAV erfolgt der wissenschaftliche Austausch von Forschern der deutschen militärischen Projekte mit ihren US-amerikanischen Kollegen des UGV-Programms.

Als das bekannteste europaweite Forschungsvorhaben ist das 1994 ausgelaufene PROMETHEUS-Projekt ('Programme for a European Traffic with Highest Efficiency

and Unprecedented Safety') zu nennen. In diesem Forschungsvorhaben schlossen sich alle großen europäischen Automobilhersteller, deren Zulieferer und zahlreiche wissenschaftliche Institute zusammen, um Fragen zur Sicherheit, zur Leistungsfähigkeit und natürlich auch zur Umweltverträglichkeit des Straßenverkehrs zu beantworten. Einen Schwerpunkt der PROMETHEUS-Aktivitäten bildete die Entwicklung von automatisierten/autonomen Fahrfunktionen [BRAESS & REICHART 95a], [BRAESS & REICHART 95b].

Ein aktuelles von der Europäischen Union gefördertes Projekt ist NETMOBIL ('New Transport System Concepts for Enhanced and Sustainable Personal Urban Mobility')⁶, bei dem nach neuen Realisierungsformen der Personenbeförderung (z.B. automatisierte Fahrzeuge oder erweiterte Fahrerassistenzsysteme) speziell im urbanen Bereich gesucht wird. Dazu ist vorgesehen, zusätzliche Infrastruktur wie Leitbaken oder Magneträgel einzusetzen.

2.1.3.1 Institut national de recherche en informatique et en automatique

Das 'Institut national de recherche en informatique et en automatique', kurz INRIA, beschäftigt sich im Rahmen des NETMOBIL-Projekts mit der Entwicklung von kleinen fahrerlosen Fahrzeugen, die im innerstädtischen Bereich eingesetzt werden können. Da zur Fahrzeugführung zusätzliche Infrastruktur vorgesehen ist, wird nicht detailliert auf diese autonomen Landfahrzeuge eingegangen, sondern es sei an dieser Stelle auf die ausführlichen Erläuterungen im Internet⁷ verwiesen.

In vorangegangenen Projekten beschäftigte man sich bei INRIA auch mit bordautonomen Landfahrzeugen. So wurden mehrere Elektrofahrzeuge (max. sechs) zu einem Zug zusammengekoppelt, wobei nur das erste Fahrzeug bemannt war. Mit Hilfe von Bildverarbeitungsverfahren wurde der Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug bestimmt und diesem in einem geschwindigkeitsabhängigen Abstand von ein bis fünf Metern gefolgt [DAVIET & PARENT 96].

In [LAUGIER ET AL. 96] wird ein manöverbasierter Ansatz zur autonomen Fahrzeugführung beschrieben, mit dem Spurwechsel bei Schrittgeschwindigkeit demonstriert werden konnten.

2.1.3.2 Universidad de Alcalá und Universidad Politécnica de Madrid

In [SOTELO ET AL. 02] werden die gemeinsamen Aktivitäten zweier spanischer Universitätsgruppen im Bereich der autonomen Straßenfahrzeugführung vorgestellt. Es wurde ein kleiner Lieferwagen vom Typ Citroën Berlingo als Versuchsträger aufgebaut. Gas, Bremse und Lenkung sind elektronisch ansteuerbar. An Sensorik verfügt das Fahrzeug über eine CCD-Kamera, über einen DGPS-Empfänger und über bereits im Fahrzeug serienmäßig verfügbare Meßaufnehmer wie etwa einem Geschwindigkeitssensor.

⁶<http://www.cordis.lu/eesd/ka4/home.html>

⁷<http://www.cybercars.org> und <http://www.inria.fr>

Auf einem Testgelände konnte bis jetzt autonomes, bildverarbeitungs-basiertes Spurfahren und ein DGPS-/Karten-basiertes Abbiegemanöver demonstriert werden. In Zukunft soll Kameras auch zur Abzweigvermessung und zusammen mit einem Radar zur Objekterkennung verwandt werden.

2.1.3.3 Universität di Parma

Nach PROMETHEUS wurden die Arbeiten an der Universität Parma auf dem Gebiet der automatischen Fahrzeugführung mittels Rechnersehen mit dem ARGO-Projekt fortgesetzt. Das Versuchsfahrzeug, ein Lancia Thema, wurde mit einem Paar monochromer Stereokameras ausgestattet. Die Lenkung kann elektronisch angesteuert werden.

Auf der medienwirksamen Langstreckenfahrt '*Mille Miglia in Automatico*' quer durch Italien im Jahre 1998 konnte mit dieser Hardware eine Strecke von etwa 2000km automatisch quergeregelt zurückgelegt werden. Gas und Bremse wurden durch den Fahrer betätigt (alle Angaben nach [BROGGI ET AL. 99]).

Zur Erkennung von Hindernissen, der Fahrspur und der Eigenlage des Fahrzeugs relativ zur eigenen Spur diente der an der Universität Parma entwickelte GOLD-Algorithmus ('Generic Obstacle and Lane Detection') [BERTOZZI ET AL. 97]. Für die Hinderniserkennung wird ein Stereoalgorithmus eingesetzt. Bei der Fahrspurerkennung 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 Fahrspurkrümmung wird das Fahrzeug quergeregelt [BERTOZZI ET AL. 98a]. Zur Steigerung der Robustheit wurde das Verfahren auf Pentium-Rechnern unter Nutzung der MMX⁸-Technologie umgesetzt [BERTOZZI ET AL. 98b].

2.1.3.4 Daimler-Benz⁹

Daimler-Benz war im Rahmen des PROMETHEUS-Programms Projektpartner der Universität der Bundeswehr München (UBM). Im Zuge dieser Zusammenarbeit wurden zwei S-Klasse Limousinen mit elektronisch ansteuerbaren Aktuatoren ausgerüstet. Eines der Fahrzeuge ging an die UBM und wurde zum 'Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen im Pkw' (VAMORS-P oder kurz VAMP) aufgerüstet (vgl. Abschnitt 2.2.2.2). Das andere Fahrzeug wurde von Daimler-Chrysler mit insgesamt 18 Kameras bestückt und erhielt den Namen VITA2 ('Vision Technology Application').

„An jeder Seite des Fahrzeugs befinden sich je zwei Einheiten für Rechnersehen mit je drei Kameras. Für den Vorausschau- und den Rückschaubereich ist das Fahrzeug mit je einer Plattform der UBM zum aktiven Sehen ausgestattet (z.B. [SCHIEHLEN & DICKMANN 94]). Im Vorausschaubereich verfügt VITA2 zusätzlich über

⁸ engl.: *Multi Media Extension*: Erweiterter Befehlssatz der Pentium-Prozessoren

⁹ seit 1998 Daimler-Chrysler

eine Stereokameraanordnung ... Wie VAMP demonstrierte VITA2 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)." [MAURER 00].

Weitere Aktivitäten bei Daimler-Benz auf diesem Gebiet können in den umfangreichen Zusammenfassungen in [ENKELMANN 97] und [MAURER 00] nachgelesen werden.

Schwerpunkt aktueller Arbeiten ist das Fahren im innerstädtischen Bereich. Dazu zählt das Stop&Go-Fahren ebenso wie das Erkennen von Verkehrsschildern, Fahrbahnmarkierungen und Fußgängern (siehe [GÖRZIG & FRANKE 98], [PAETZOLD & FRANKE 98], [GAVRILA & GIEBEL 02] und [HEINRICH 02]). All diese Funktionen sind in UTA ('Urban Traffic Assistant') integriert. [FRANKE ET AL. 98] geben einen Überblick über die Struktur dieses Systems und die Funktionen der Einzelkomponenten.

2.1.3.5 Dornier

Ein Projektpartner der UBM im Rahmen des PRIMUS-Programms ist die Firma Dornier, die seit mehr als 10 Jahren in der Entwicklung autonomer Fahrzeuge aktiv ist. In der aktuellen Projektphase PRIMUS-C wurde ein militärisches Kettenfahrzeug vom Typ Wiesel 2 aufgebaut und mit einem System zum Rechnersehen der UBM, bestehend aus einer Zwei-Achsen-Plattform und einer 3-Chip Farbkamera, ausgerüstet [LÜTZELER & BATEN 00]. Für die Hinderniserkennung steht eine 'Entfernungs-Bild-Kamera' (EBK) zur Verfügung, GPS und optische Kreisel dienen zur Navigation. Das Roboter-Wiesel kann entweder völlig autonom oder im 'Teleoperation'-Modus betrieben werden. Für den Fall der Fernsteuerung steht eine zweite Kamera zur Verfügung. Das Videobild dieser Kamera wird in den Leitstand übertragen, wo es ein Bediener auswerten und damit das Roboter-Wiesel fernsteuern kann.

In unwegsamem Gelände konnten autonom Geschwindigkeiten bis zu 25km/h erzielt werden. Dabei wurde die Geschwindigkeit den lokalen Geländegegebenheiten angepasst und bei Bedarf Hindernissen ausgewichen. Auf Straßen bzw. Wegen wurden Geschwindigkeiten von 50km/h erreicht. Die Erkennung und das Verfolgen eines Weges oder einer Geländekontur erfolgte mit dem Sichtsystem der UBM. Hindernisse wurden mit der EBK detektiert und, soweit es die Hindernisgröße zuließ, lokal umfahren, ansonsten wurde angehalten.

Sowohl für die lokale Ausweichplanung als auch für die globale Missionsplanung ist je ein eigenständiges Modul zuständig. Ein übergeordnetes 'Arbiter'-Modul¹⁰ wertet die Ergebnisse der beiden Planungsmodule aus und generiert abhängig von der aktuellen Situation und den aktuellen Fahrzuständen die Fahrkommandos für die Fahrzeugsteuerung.

Als Nutzlast trägt das Roboter-Wiesel einen ausfahrbaren Beobachtungsmasten mit einem in zwei Achsen beweglichen Kopf. Auf ihm sind verschiedene Sensoren zur Umfelderkennung, angefangen von einer Zoom-CCD-Kamera über einen augensicheren Laser-Range-Finder bis hin zu einer Wärmebildkamera, montiert (alle Angaben nach [SCHWARTZ 00]).

¹⁰ engl.: *Schiedsrichter*

2.1.3.6 Niedersächsisches Projekt 'Autonomes Fahren'

Ein nationales Konsortium, das mit öffentlichen und industriellen Fördermitteln autonome Straßenfahrzeuge entwickelte, war das niedersächsische Projekt 'Autonomes Fahren'. Teilnehmer an diesem von Volkswagen geleiteten Projekt waren die Firmen Bosch, Kasprich-IBEO, Witt, das Institut SICAN und die Technische Universität Braunschweig. Ziel dieses Projekts war es, einen Fahrroboter zu entwickeln, der anstelle eines Testfahrers die gesundheitsschädigenden Langzeiterprobungen von Fahrzeugen auf Testgeländen durchführen soll.

Der entwickelte Fahrroboter wird auf dem Fahrersitz montiert und betätigt die konventionellen Stellglieder (Gas, Bremse, Lenkung, Kupplung, Schaltung, etc.), ohne dass an diesen Modifikationen vorgenommen werden müssen [SCHWARZE ET AL. 98]. Zur Erfassung der Umwelt stehen ein Radar und zwei Videokameras zur Verfügung. Außerdem kommen vier Laserscanner für 360° Rundumsicht zum Einsatz. Je einer mit 270° an den beiden vorderen Ecken, aus Redundanzgründen einer mit 180° vorn in der Mitte des Fahrzeugs und einer mit 180° in der Mitte des Hecks. Für die Positionsbestimmung sind die Fahrzeuge mit DGPS und einem 'inertialen Navigationssystem' (INS) ausgerüstet [WEISSER ET AL. 98]. Aufgrund der modularen Anordnung der Sensoren und des Fahrroboters, können alle notwendigen Komponenten in wenigen Stunden in Testfahrzeuge eingerüstet werden.

Die Fahrspurerkennung ist redundant ausgelegt, d.h. neben der Bestimmung der Eigenlage relativ zur Fahrspur mit Hilfe von Rechnersehen wird die Position zusätzlich mit DGPS, INS und einer hochgenauen digitalen Karte bestimmt [GOLDBECK ET AL. 98]. Konzepte für die multisensorielle Erkennung und Verfolgung von Hindernissen werden von [STILLER ET AL. 98] vorgestellt. Bei der Bahnplanung und Regelung eingesetzte Verfahren können in [BECKER ET AL. 98] nachgelesen werden. Die Querregelung, bei der der Fahrroboter als Teil des Lenkaktuators betrachtet wird, ist in [SÖHNITZ & SCHWARZE 99] beschrieben.

Spezielles Augenmerk des Projekts 'Autonomes Fahren' lag auf der Analyse der Systemicherheit. Am Beispiel eines elektronischen Kopiloten, der den Fahrroboter bei Fehlfunktionen korrigiert, werden verschiedene Methoden aus dem Bereich der Systemsicherheit durchexerziert (alle Angaben nach [BINFET-KULL ET AL. 98]).

2.1.3.7 Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung

Am 'Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung' (IITB) wurden seit Ende der achtziger Jahre insgesamt drei Fahrzeuge aufgebaut. Dabei handelt es sich bei FhG-Cop Van ('Fraunhofer-Gesellschaft Copilot') um einen Mercedes-Benz 609D Kastenwagen und bei FhG-Cop Car um eine BMW 735L Limousine. Bei beiden Fahrzeugen sind die Standardaktuatoren elektronisch ansteuerbar [NAGEL ET AL. 95]. Einen guten Überblick über die am IITB entwickelten Wahrnehmungsfähigkeiten im Bereich der Fahrspurerkennung, der Hindernisdetektion und der Erkennung von Kreuzungen bietet [ENKELMANN 97]. Mit den FhG-Cop Fahrzeugen wurden die Funktionen:

- Fahrspurverfolgung auf Autobahnen und in der Innenstadt,
- Fahrerüberwachung und -warnung beim Annähern an Einmündungen und Haltelinien,
- Detektion von Einmündungen,
- Abbiegemanöver und
- Umfahren von Hindernissen

demonstriert [HEIMES 00]. FhG-Cop Car wird derzeit von [RISACK ET AL. 00] für die Erprobung eines Systems zur Spurhaltung und Hindernisdetektion auf Landstraßen und Autobahnen eingesetzt.

Ausführungen zu einem manöverbasierten Ansatz für die Fahrzeugführung finden sich in [NAGEL & ENKELMANN 91], [NAGEL 94] und [TÖLLE 96].

Jüngster Spross in der Familie der IITB-Versuchsfahrzeuge ist DARVIN ('Driver Assistance using Real-time Vision for Inercity Areas'), ein VW Passat Kombi. Mit DARVIN wurde ein System entwickelt, das den Fahrer im Innenstadtbereich von der Fahraufgabe entlastet. Der Fahrer muss vor einer Kreuzung nur durch Betätigen des Blinkers bekanntgeben, ob und in welche Richtung er an einer Kreuzung abbiegen möchte, die Fahraufgabe selbst wird vom Fahrzeug automatisch ausgeführt. DGPS und digitale Karten eines kommerziellen Navigationssystems sind die Grundlagen dieses Assistenzsystems. Mit den Informationen aus den Karten werden Geometriemodelle für einzelne Straßensegmente vorkonfiguriert und mit Hilfe der Bildverarbeitung verifiziert. Bevor dies allerdings erfolgen kann, ist eine anfängliche Initialisierungsphase, in der der Fahrer einen Abbiegevorgang manuell ausführen muss, nötig, damit die Position mittels DGPS bestimmt werden kann. Anschließend können die Straßenränder direkt ohne Detektionsphase im Bild verfolgt werden. Die bei diesem Verfahren notwendige Genauigkeit in der Ortung wird dadurch erreicht, dass die aus den DGPS-Signalen generierte Positionsschätzung durch bildbasierte Verfahren gestützt wird. Für die Bildverarbeitung stehen zwei divergent angeordnete Monochrom-Kameras zur Verfügung. Fahrversuche wurden im Innenstadtbereich von Karlsruhe durchgeführt (alle Angaben nach [HEIMES 00]).

2.1.3.8 Universität der Bundeswehr München

Das 'Institut für Systemdynamik und Flugmechanik' (ISF) der 'Universität der Bundeswehr München' (UBM) ist seit Ende der siebziger Jahre auf dem Gebiet der autonomen Landfahrzeuge aktiv. 1987 konnte mit dem 'Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen' (VAMORS, siehe Abschnitt 2.2.2.1) auf einem noch nicht dem Verkehr freigegebenen Teilstück der Autobahn A92 automatische Längs- und Querführung mittels Rechnersehen bis zu der durch die Bauart begrenzten Höchstgeschwindigkeit von 96km/h demonstriert werden [ZAPP 88].

Das von [DICKMANN & ZAPP 86] eingeführte Klothoidenmodell zur Fahrbahnmodellierung, welches sowohl horizontale als auch vertikale Krümmungen berücksichtigen kann, wurde von [MYSLIWETZ 90] für die robuste optische Erfassung des Fahrspurverlaufs und die Schätzung der Lage des Fahrzeugs relativ zur Fahrspur verwendet. Es ist inzwischen in industrielle Implementierungen übernommen worden (z.B. Bosch, Odetics/Iteris).

In den folgenden Jahren wurden die Arbeiten an autonomen Landfahrzeugen im Rahmen des PROMETHEUS-Projekts weitergeführt. So entwickelte [BRÜDIGAM 94] eine Reihe von Regelungen und Steuerung zum Spurfahren, zum Spurwechsel und zum Konvoifahren. Von [MÜLLER 96] wurde ein autonomes Abbiegemanöver realisiert.

Vollautomatische Längs- und Querführung im Straßenverkehr mit anderen Verkehrsteilnehmern wurde möglich, als auch Fremdfahrzeuge erkannt werden konnten [THOMANEK 96].

Bei den Abschlusspräsentationen des PROMETHEUS-Projektes im Herbst 1994 in Paris konnte mit VAMP ('Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen im Pkw', siehe Abschnitt 2.2.2.2) wie mit dem Schwesterfahrzeug VITA2 von Daimler-Benz auf der A1 vom Flughafen Charles-de-Gaulle nach Lille automatische Längs- und Querführung im fließenden Straßenverkehr vorgeführt werden [DICKMANN ET AL. 94].

1995 wurde im Rahmen eines Konsortiumstreffen des CLEOPATRA-Projekts ('Clusters of Embedded Parallel Time Critical Applications') im dänischen Odense mit VAMP eine Langstreckenfahrt unternommen, bei der von den 1758 experimentell zurückgelegten Kilometern etwa 95 Prozent autonom gefahren wurden [MAURER 00].

Im Rahmen eines Drittmittelprojektes wurde ein HACC-System ('Hybrides ACC') entwickelt und im Herbst 1999 vorgeführt [RIEDER 00], [MAURER 00], [HOFMANN ET AL. 01]. Die Erkennung von Fremdfahrzeugen erfolgt dabei mittels Radar und Videodaten. Der ebenfalls mit Bildverarbeitung bestimmte Fahrspurverlauf dient für die Zuordnung, ob sich ein Fremdfahrzeug in der eigenen Spur befindet oder nicht.

Im Herbst 2000 wurde im Rahmen des deutsch-amerikanischen AUTONAV-Programms Bildverarbeitungshardware VFE200 ('Visual Front End') der Firma Sarnoff ins EMS-System integriert. VFE200 wertet die Bilder zweier paralleler Stereokameras aus und generiert eine Disparitätenkarte. Mit diesem Verfahren und den im EMS-System vorhandenen 4D-Ansatz war es möglich, sowohl positive als auch negative Hindernisse auf Feldwegen und im freien Gelände zu erkennen und vor diesen anzuhalten. Die Fahrversuche wurden mit VAMORS auf dem Gelände der UBM durchgeführt [SIEDERSBERGER ET AL. 01].

Ein vorläufiger Abschluss der Arbeiten des ISF auf dem Gebiet der autonomen Landfahrzeuge fand im Oktober 2001 statt. Bei der Abschlusspräsentation des IFF-Projektes wurde mit VAMORS eine zusammenhängende autonome Mission sowohl auf befestigten Wegen als auch im Gelände demonstriert. Die Mission beinhaltete Komponenten wie Spurfahren, Abbiegen, den Übergang vom Straßenfahren ins Geländefahren, dessen Pendant vom Gelände- ins Straßenfahren, das Wegpunktnavigieren und die Reaktion auf Hindernisse. Wie schon bei [LÜTZELER 02], [GREGOR 02] und [PELLKOFER 03] so sind die Ergebnisse dieser Demonstration auch Inhalt dieser Arbeit.

2.2 Versuchsträger

Aufgrund der mittlerweile geringen technologischen Hürden beim Aufbau von Versuchsträgern im Bereich autonomer Landfahrzeuge hat deren Zahl in den letzten Jahren stetig zugenommen. Eine vollständige Auflistung aller aktuellen Versuchsträger auf diesem Gebiet ist daher in einem überschaubaren Umfang nicht möglich.

Versuchsfahrzeuge sind aber für die Erlangung fundierter Ergebnisse erwiesenermaßen wichtig, um neue Konzepte, Verfahren usw. nicht nur in Simulationen, sondern auch in Feldversuchen zu verifizieren. Die erzielte Ergebnisse lassen sich auch nur miteinander vergleichen und bewerten, wenn eine Gegenüberstellung der bei den Versuchen eingesetzten Fahrzeuge, deren Sensorik und Aktuatorik etc. erfolgt. Der 'Stand der Technik' ist somit auch an den Versuchsfahrzeugen abzulesen.

Die folgende Übersicht bietet eine Auswahl an Versuchsfahrzeugen, die in letzter Zeit für die Gewinnung neuer Forschungsergebnisse benutzt wurden. Die beiden Versuchsfahrzeuge des ISF werden in Abschnitt 2.2.2 gesondert vorgestellt.

2.2.1 Übersicht

Aufgrund der Vielfalt an Landfahrzeugen (Pkw's, Lkw's, Quad's, Geländewägen, Traktoren, Baumaschinen, Panzern, Sonderfahrzeugen, Kleinrobotern etc.) gibt es auch eine große Bandbreite an autonomen Versuchsfahrzeugen. Die folgende Tabelle 2.1 bietet eine Auswahl an autonomen Landfahrzeugen, die als Technikträger für unterschiedlichste Anwendungen dienen. Es wurden allerdings nur Fahrzeuge berücksichtigt, deren Bauart es erlaubt, Personen oder größere Lasten zu befördern. Zu jedem Fahrzeug sind dessen Bauart, die Institution, die das Fahrzeug betreibt, und eine Internetseite, wo Detailinformationen abgerufen werden können, angegeben.

2.2.2 Versuchsfahrzeuge des ISF: VaMoRs und VaMP

Am ISF wurde von Anfang an versucht, die Tragfähigkeit von neuen Ansätzen in Versuchsträgern nachzuweisen. Im Bereich der autonomen Landfahrzeuge wurden dazu zwei Versuchsfahrzeuge aufgebaut, deren Komponenten mangels kommerzieller Verfügbarkeit (z.B. Kameraplattformen) teils selbst entwickelt wurden. Bei den Versuchsfahrzeugen handelt es sich zum einen um einen leichten Lastkraftwagen und zum anderen um einen Personenkraftwagen, die beide während all ihrer Betriebsjahre verschiedene Ausrüstungsstände aufwiesen (vgl. Abschnitt 3.1). Die aktuelle Ausstattung an Meßtechnik, Rechenanlagen und sonstigen Ausrüstungskomponenten wurde im Rahmen dieser Arbeit in die Fahrzeuge eingerüstet und entspricht dem EMS-Vision Hardwarebedarf (vgl. Abschnitt 3.2).

2.2.2.1 VaMoRs

Das 'Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen' (VAMoRs, Abbildung 2.1) ist eines der dienstältesten autonomen Landfahrzeuge weltweit. Als Basisfahrzeug

Tabelle 2.1: Versuchsträger im Bereich autonomer Landfahrzeuge

Versuchsfahrzeug	Fahrzeug-Typ	betreibende Institution	Internet-Link
AGRO-NAV	Traktoren	Geo-Tec Electronics GmbH	http://www.geo-tec.de
ANU-Landcruiser	Geländewagen	Australian National University	http://syseng.anu.edu.au/rst/car
ARGO	Pkw	Università di Parma	http://millemiglia.ce.unipr.it/argo/english/index.html
ARSKA	Quad	Helsinki University of Technology	http://www.automation.hut.fi/research/robotics/iav/arska.html
Autopia	Pkw	Instituto de Automatica Industrial Madrid	http://www.iai.csic.es/autopia
Cybercars	Sonderfahrzeuge zur Personenbeförderung	Institut national de recherche on informatique et en automatique	http://www.cybercars.org
Fhg-Cop, DARVIN	Lkw, Pkw	Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung	http://21www.ira.uka.de/darvin
dBuggy GSR	Geländebuggy, Panzer	SPAWAR System Center San Diego	http://www.nosc.mil/robots/land
NAVLAB's	Pkw's, Busse, Geländewagen	Carnegie Mellon University (C. Thorpe)	http://ri.cmu.edu/labs/lab_28.html
NIST-HMMWV, XUV	Geländewagen, geländegängiges Sonderfahrzeug	National Institute for Standards and Technology	http://www.isd.mel.nist.gov/research_areas/mobility
OSU-Cars	Pkw's	Ohio State University	http://eewww.eng.ohio-state.edu/citr/demo97/osu_av.html
Polar Bel	Quad	University of Alberta	http://ee.ualberta/~arvp/robots.html
RoboJeep	Geländewagen	TNO Physics and Electronics Laboratory	http://www.tno.nl/instit/fel/year00/multi_eng.html#robo
Terregator	geländegängiges Sonderfahrzeug	Carnegie Mellon University (H. Moravec)	http://ri.cmu.edu/labs/lab_12.html
VAMORS, VAMP	Lkw, Pkw	Universität der Bundeswehr München	http://www.unibw.muenchen.de/campus/lrt/lrt13

dient eine Mercedes-Benz Kastenwagen vom Typ 508D (Baujahr 1983) mit Servolenkung und 4-Gang Automatikgetriebe.

Dieses Fahrzeug dient bereits seit 1985 als Versuchsplattform für diverse Systeme zur Fahrzeugsteuerung mit Rechnersehen, die am ISF entwickelt wurden (siehe Abschnitt 3.1). Wichtige Zusatzeinrichtungen, wie die elektronisch ansteuerbaren Aktuatoren, für den Betrieb als 'autonomes Landfahrzeug' haben sich dabei kaum geändert. Einen Überblick über die Einbauorte der wichtigsten Aktuatoren, Sensoren und die Platzierung der Rechneranlagen in VAMORS bietet Abbildung 2.3.



Abbildung 2.1: Versuchsfahrzeug VAMoRS

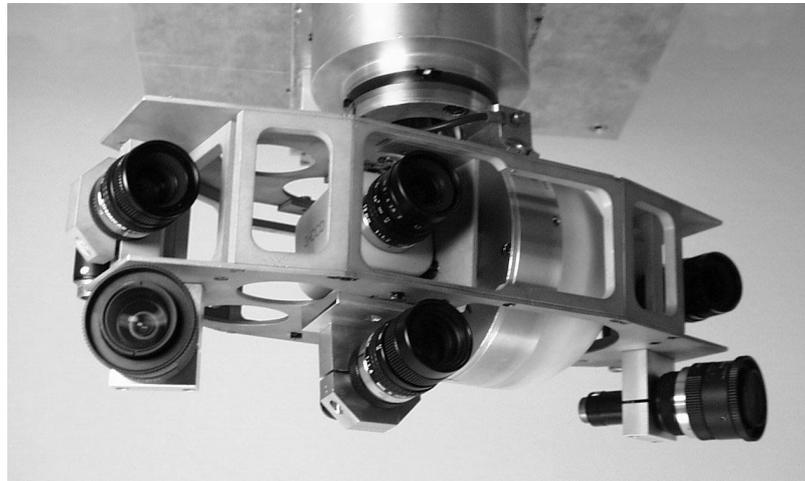


Abbildung 2.2: VAMoRS: Zwei-Achsen-Kameraplattform (MarVEye-Konfiguration mit zusätzlichem Stereokamerapaar)

Lenkung (1) und Gas (3) werden in VAMoRS mittels Schrittmotoren und Zahnriemen angesteuert. Bei der Bremse (2) wird mit einem Hydraulikaggregat Bremsdruck erzeugt, der über ein Regelventil und einen nachgerüsteten Kolben im Hauptbremszylinder auf

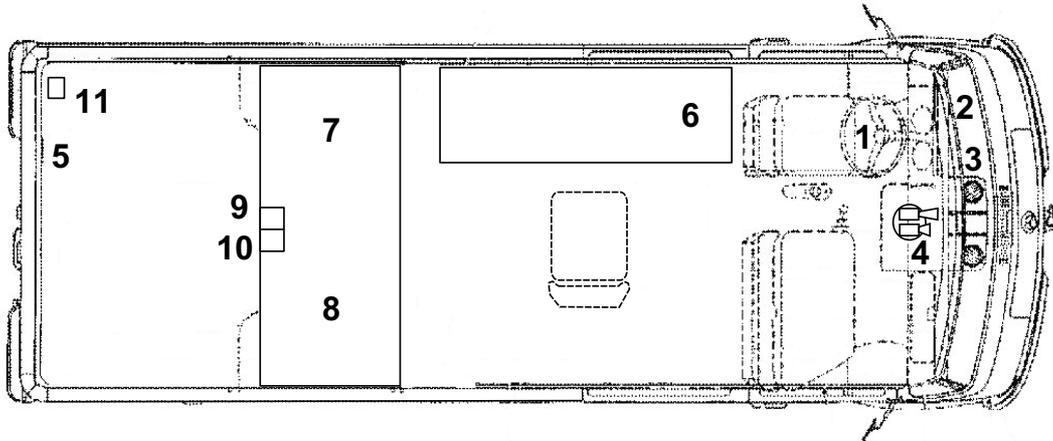


Abbildung 2.3: VAMORS: Einbauorte der wichtigsten Zusatzkomponenten



Abbildung 2.4: VAMORS: Innenraum



Abbildung 2.5: VAMORS: Fahrersitz

die Bremsanlage des Fahrzeugs gegeben wird. Die am ISF entwickelte Zwei-Achsen-Kameraplattform (Abbildung 2.2) befindet sich mittig am oberen Rand der Windschutzscheibe (4). Ziffer (5) markiert den potentiellen Einbauort einer rückwärtigen Kameraplattform. Rechner für die Ansteuerung der Kameraplattformen und des Fahrzeugs sind in Rechnerregalen in 19"-Technologie untergebracht (6), (7). Ebenfalls in 19"-Racks sind die Rechner und Peripheriegeräte zur Sensordatenauswertung und im Speziellen zur Bildverarbeitung verbaut (8). Ein Inertialsensorblock bestehend aus je drei orthogonalen Beschleunigungssensoren (9) und Winkelratengebern (10) ist so nahe am Fahrzeugschwerpunkt montiert, wie es die Bauform und die Ausstattung des Fahrzeugs zulassen. Eine GPS-Antenne mit DGPS-Modul befindet sich auf dem Dach des Fahrzeugs an der linken hinteren Ecke (11).

In Abbildung 2.1 ist auf dem Dach des Versuchsfahrzeugs ein Wärmetauscher zu sehen. Dieser ist notwendig, um zum einen die von den Rechneranlagen erzeugte Abwärme nach außen zu führen, zum anderen dient er zur Kühlung des Stromaggregats (3-Zylinder Dieselmotor, 10kW-Generatorleistung).

Abbildung 2.4 zeigt den Arbeitsplatz des Entwicklers und Abb. 2.5 das Cockpit des Sicherheitsfahrers. Mit dem Terminal neben dem Fahrersitz kann der Sicherheitsfahrer die wichtigsten Komponenten des autonomen Systems überwachen und (de-)aktivieren. Der Entwickler kann dagegen mit seinen beiden Terminals auf das komplette System einwirken und es überwachen.

2.2.2.2 VaMP

Beim 'Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen im Pkw' (VaMP, Abbildung 2.6) handelt es sich um eine Mercedes-Benz S-Klasse Limousine vom Typ 500 SEL (Baujahr 1992). Das Fahrzeug verfügt über einen 8-Zylinder Motor mit 5l Hubraum und ein 5-stufiges Automatikgetriebe. Zur Erzeugung der für die Rechneranlagen, Sensoren etc. notwendigen elektrischen Leistung wurde eine zusätzliche 24V-Lichtmaschine eingebaut. Neben der Innenraumklimatisierung verfügt VaMP über eine eigene Klimaanlage für den Kofferraum, um auch dort den Einbau von thermisch empfindlichen Rechnern zu ermöglichen.



Abbildung 2.6: Versuchsfahrzeug VaMP

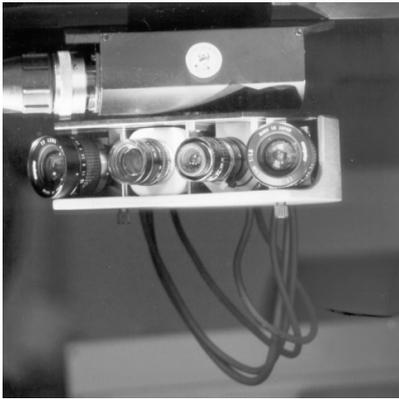


Abbildung 2.7: VAMP: Einachsige-Kameraplattform (MarVEye-Anordnung)



Abbildung 2.8: VAMP: Kofferraum

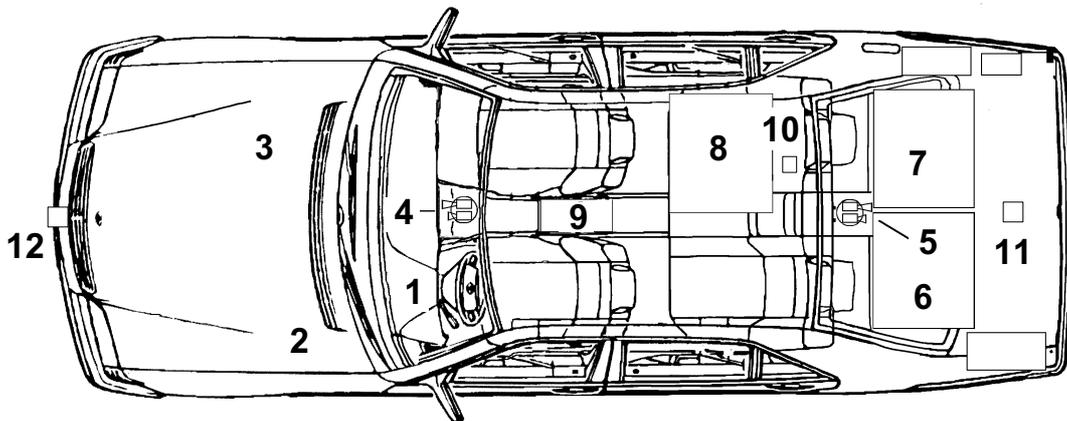


Abbildung 2.9: VAMP: Zusatzeinrichtungen fürs 'autonome Fahren'



Abbildung 2.10: VAMP: Fahrersitz



Abbildung 2.11: VAMP: Rückbank

VAMP besitzt nahezu die identische Zusatzausstattung für den autonomen Betrieb wie VAMORS. Bei der Lenkung (1) handelt es sich um eine Versuchslenkanlage aus der Daimler-Benz Forschungswerkstatt. Die Bremse (2) wurde mit einem Booster, wie er mittlerweile in ESP-Bremssystemen üblich ist, ausgestattet. Das Gas (3) ist in diesem Fahrzeug bereits serienmäßig als by-wire System ausgelegt und kann über CAN-Bus ('Control Area Network') angesprochen werden. Wie VAMORS so verfügt auch VAMP über aktive Kameraplattformen ((4) und (5)), die aktuell nur in der Gierachse drehbar ausgelegt sind (Abbildung 2.7). Die Rechner für die Ansteuerung der Kameraplattformen und des Fahrzeugs ((6) und (7)) befinden sich in 19"-Racks im Kofferraum des Fahrzeugs (Abbildung 2.8). Die Computer zur Umweltwahrnehmung sind in einem 19"-Rechnerschrank hinter dem Beifahrersitz untergebracht (8). Dazu wurde die Rückbank ausgebaut und durch einen Einzelsitz auf der linken Seite ersetzt (Abbildung 2.11). In der Nähe des Fahrzeugschwerpunkts wurden in der Mittelkonsole drei orthogonale Beschleunigungssensoren (9) verbaut. Die drei Winkelratensensoren (10) befinden sich im Bereich des rechten Rücksitzes. Wie beim Serienfahrzeug, so ist auch bei VAMP die GPS-Antenne auf dem Kofferraumdeckel montiert (11). Ein Radarsystem ist im vorderen Stoßfänger untergebracht (12).

Die Terminals zur Bedienung des Versuchsfahrzeugs VAMP sind sowohl für den Entwickler (Abbildung 2.11) als auch für den Sicherheitsfahrer (Abbildung 2.10) die selben wie in VAMORS.

Kapitel 3

Das EMS-Vision System

Die beiden Versuchsfahrzeuge VAMORS und VAMP (siehe 2.2.2) des 'Instituts für Systemdynamik und Flugmechanik' (ISF) der 'Universität der Bundeswehr München' (UBM) dienen als Experimentalplattformen für die Entwicklung des 'Erwartungsbasierten Multi-fokalen Sakkadischen Sehens' (EMS-Vision). Bei EMS-Vision handelt es sich um ein System zur Wahrnehmung der Umwelt in Echtzeit, welches auf dem 4D-Ansatz zum maschinellen Sehen basiert [DICKMANN 87a]. Das EMS-Vision System wird vornehmlich zur Führung von autonomen Landfahrzeugen eingesetzt, aber auch Anwendungen im Luftfahrtbereich wurden damit realisiert [FÜRST].

EMS-Vision steht aber für mehr, als der Name zunächst vermuten lässt. Die Gesamtsystemarchitektur ist zum einen so ausgelegt, dass nicht nur bildgebende Sensoren, sondern auch nach anderen physikalischen Prinzipien arbeitende Messaufnehmer (z.B. Radar) integriert werden können, wobei der Schwerpunkt bei der Bildverarbeitung liegt. Zum anderen sind im EMS-Vision System auch Komponenten zur Situationsanalyse, Wissensverwaltung, Aktionsauswahl und Verhaltensgenerierung - typische Merkmale eines autonomen Systems - vorhanden.

In der Reihe von Systemen zur autonomen Mobilität mittels maschinellem Echtzeitsehen, die am ISF entwickelt wurden, stellt EMS-Vision die dritte Generation dar. Funktionsumfang, verwendete Hardware und Besonderheiten der Vorläufer-Systeme werden im folgenden kurz zusammengefasst. Aufbauend auf den mit diesen Systemen erworbenen Erkenntnissen wurden die in den darauffolgenden Abschnitten beschriebenen zentralen Konzepte des neuen EMS-Systems entwickelt.

3.1 Vorangegangene Entwicklungen am ISF

Bei der folgenden Betrachtung der am ISF entwickelten Systemarchitekturen zur Bewegungssteuerung mittels Rechnersehen wird nur auf diejenigen eingegangen, welche in den beiden Versuchsfahrzeugen VAMORS und VAMP zum Einsatz kamen. Über die

Führung von Straßenfahrzeugen hinausgehende Anwendungsfälle im Bereich der Luftfahrt [EBERL 87], [SCHELL 92], [WERNER 97], der Raumfahrt [FAGERER 96] oder der Indoor-Robotik [HOCK 94] werden zwar im weiteren nicht näher beleuchtet, deren Erkenntnisse und Ergebnisse flossen aber ebenfalls in die Entwicklung des EMS-Vision Systems ein.

3.1.1 Vorläufer-Systeme

3.1.1.1 BVV Architekturen (1984 - 1991)

Als 1987 VAMORS als erstes Straßenfahrzeug auf einem noch nicht dem Verkehr freigegebenen Teilstück der Autobahn A92 sowohl längs- als auch quergeführt bis zu der durch die Bauart begrenzten Höchstgeschwindigkeit von 96km/h völlig autonom fuhr, war neben einem Fahrzeugrechner auch ein Bildverarbeitungssystem vom Typ BVV2¹ im Einsatz [ZAPP 88]. Dabei handelt es sich um ein vom Institut für Messtechnik der UniBwM entwickeltes Rechnersystem mit bis zu 15 lose gekoppelten Prozessoren vom Typ INTEL 8086. Wie das Vorgängermodell BVV1 ist auch das BVV2 speziell für die Belange der Echtzeitbildverarbeitung unter Verwendung räumlich/zeitlicher Modelle konzipiert und realisiert worden [HAAS 82], [GRAEFE 84].

Seinen ersten Einsatz hatte BVV1 1982, als es gelang, einen auf einem Elektrowagen einachsrig gelagerten Stab (inverses Pendel) allein durch die Auswertung von Bildfolgen einer den Stab beobachtenden Kamera und einer passenden, totzeitberücksichtigenden Regelung zu balancieren [MEISSNER 82].

Für die komplexere Aufgabe der visuellen Wahrnehmung von realen Straßenszenen wurde das BVV2 entwickelt. Neben der Verarbeitung der Videosignale von einer Weitwinkel- und einer Telekamera übernahm das BVV2 via eines zwischengeschalteten Subsystems auch die Ansteuerung der Zweiachsenplattform, auf welcher die Kameras montiert waren. Bedient wurde das BVV2 mittels eines eigenen Terminals.

Über einen IEC-Bus war das BVV2 mit dem Fahrzeugführungsrechner, einem IBM-IC (Industrieversion eines IBM-AT02 mit einem INTEL 80286 16-bit Mikroprozessor) verbunden, der über eigene Tastatur und Monitor verfügte. Die parallele Schnittstelle des Fahrzeugführungsrechners diente zur Ankopplung des Fahrzeug-Subsystems. Beim Fahrzeug-Subsystem handelt es sich um eine speziell entwickelte Servosteuerung, die zum einen das Einlesen konventioneller Sensorsignale wie Geschwindigkeit und Lenkwinkel ermöglicht und die zum anderen alle Leistungselektronik-Komponenten zur Ansteuerung der Aktuatoren (Gas, Bremse und Lenkung) enthält [ZINKL 86]. Für die Regelkreise mit Bildverarbeitung im Messzweig konnte so eine Zykluszeit von 100ms erreicht werden [ZAPP 88].

3.1.1.2 TIP-Bus Architekturen (1991 - 1996)

Als immer mehr Rechenleistung zur Echtzeit-Bildverarbeitung benötigt wurde, erfolgte der Umstieg auf Transputersysteme. Diese konnten als eine der wenigen damals verfügbaren Rechnersysteme die benötigte Rechenleistung bereitstellen. Außerdem ermöglichte

¹Bildvorverarbeitungssystem (BVV)

ihre parallele Architektur eine flexible und an die jeweiligen Gegebenheiten angepasste Rechnerkonfiguration. Einzelne Transputer konnten zu Clustern beliebiger Größe kombiniert werden, wodurch die Rechenleistung den jeweiligen Anforderungen angepasst werden konnte. Die Zykluszeiten konnten durch die Verwendung von Transputern auf $80ms$ gesenkt werden, obwohl die Bildverarbeitungsalgorithmen erweitert wurden [VON HOLT 93].

Zunächst wurden die Bildverarbeitungsalgorithmen auf ein Transputercluster mit 45 Transputerknoten vom Typ T8xx² und T2xx³ verlagert. Die Kamerasignale wurden von Transputer-Framegrabbern (MFG⁴ oder CFG⁵) digitalisiert und über einen ebenfalls in Transputer-Technologie realisierten Bildverarbeitungs-Bus ('Transputer Image Processing Bus', TIP-Bus) den angebotenen Rechnerknoten zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt [PARSYTEC 92], [MÜLLER 96].

Nachdem die Schnittstelle zum Fahrzeug-Subsystem auf Transputer-Link (RS422-Schnittstelle) umgestellt war, konnte das Fahrzeug auch von einem Transputersystem aus angesteuert werden [MÜLLER 94]. Damit wurde es möglich, die Algorithmen der Fahrzeugführung ebenfalls auf das Transputercluster zu verlagern, was wegen der Echtzeitfähigkeit von Transputersystemen speziell für die Fahrzeug-Regelung Vorteile brachte.

Der weiterhin mitgeführte PC, der bisher als Fahrzeugführungsrechner diente, wurde nur noch als Hostrechner benötigt, über den die Ein-/Ausgaben zwischen Bediener und Transputersystem abgewickelt wurden und der das Laden von Programmen auf das Transputersystem sowie eine Datensicherung ermöglichte [BRÜDIGAM 94].

Die Algorithmen zur Plattformsteuerung wurden zunächst - wie schon die Algorithmen der Bildverarbeitung und der Fahrzeugführung - auf das zentrale Transputercluster verlagert, wobei das Plattform-Subsystem über eine parallele Schnittstelle angebunden war [MÜLLER 96]. Die darauffolgende Generation von Plattform-Subsystemen basierte ebenfalls auf Transputertechnologie. Diese Subsystem-Varianten bestanden aus einem kleinen, eigenständigen Transputernetz, auf dem nun die Algorithmik zur Plattformsteuerung platziert wurde. In diese Plattform-Transputersysteme wurde - wie schon bei den vorherigen Plattform-Subsystemen - die gesamte Elektronik zur Ansteuerung der Plattformmechanik integriert. Die Anbindung ans zentrale Transputercluster erfolgte nun über einen Transputer-Link (RS422).

Mit diesem auf Transputertechnologie basierenden System zur autonomen Fahrzeugführung konnten mit VAMORS Fahrfunktionen wie der Spurwechsel oder das Konvoi-Fahren demonstriert werden [BRÜDIGAM 94]. [MÜLLER 96] realisierte in seiner Arbeit ein vollautonomes Abbiegemanöver in eine Querstraße.

Parallel zur Umrüstung des Versuchsfahrzeugs VAMORS auf Transputer wurde auch das zweite Experimentalfahrzeug VAMP aufgebaut [DICKMANN ET AL. 94], [MAURER 00].

²32-bit Prozessor mit Floating Point Unit

³16-bit Prozessor

⁴MFG: 'Monochrome Frame Grabber'

⁵CFG: 'Color Frame Grabber'

Wie schon bei VAMORS wurde ein Transputer-basiertes TIP-Bus Bildverarbeitungssystem installiert. Ca. 60 Transputerknoten waren im Einsatz um die Bildverarbeitungsaufgaben der Straßen- und Fremdfahrzeugwahrnehmung in einem Autobahnscenario zu bearbeiten. Je nach Anforderungsprofil an die Bildverarbeitungskomponenten konnten Zykluszeiten von $40ms$ bzw. $80ms$ erreicht werden.

Zur Steuerung der Kamera-Plattformen für die vordere und hintere Hemisphäre wurde wie in VAMORS ein eigenes Transputer-Subsystem verwendet. Dieser Ansatz wurde in VAMP auch auf die Fahrzeugführung erweitert und ein eigenes Fahrzeug-Subsystem aufgebaut, welches auf Transputertechnologie basierte.

Das Fahrzeug-Transputersystem wurde speziell für VAMP und das Schwesterfahrzeug VITA2 von Daimler-Benz entwickelt [HEMA 93]. Über je eine RS422-Schnittstelle war das Fahrzeug-Subsystem mit TIP-Bus Bildverarbeitungssystem und mit einem Host-PC zur Ein-/Ausgabe verbunden. Aufgabe des Fahrzeugrechners war neben der Ausführung der Algorithmen zur Fahrzeugführung das Einlesen der Daten von Inertialsensoren und konventionellen Messgebern (Bremsdruck, Lenkwinkel, etc.) sowie das Ansteuern der Aktuatoren (Gas, Bremse und Lenkung), wozu die benötigte Elektronik wie A/D-Wandler und Leistungselektronik-Komponenten mit in das Subsystem integriert wurden.

Mit diesem auf Transputern basierenden System fuhr VAMP bei der Abschlussdemonstration des EUREKA-Verbundprojektes PROMETHEUS im Herbst 1994 in Paris autonom im dreispurigen Autobahnverkehr. Das System ermöglichte es, die Fahrspur wie auch andere Fahrzeuge in Echtzeit zu erkennen und damit das Versuchsfahrzeug sowohl in der Längs- als auch in der Querbewegung automatisch zu steuern. Sogar vom System vorgeschlagene und vom Bediener freigegebene automatische Spurwechsel wurden demonstriert [DICKMANN ET AL. 94].

Im nächsten Entwicklungsschritt kamen im Bildverarbeitungssystem von VAMP zur Steigerung der Rechenleistung 'Motorola PowerPC's' (MPC) vom Typ 601 statt der Transputer zum Einsatz. Damit konnte die Rechenleistung pro Rechenknoten etwa um den Faktor 10 gesteigert und gleichzeitig die Zahl der Prozessoren reduziert werden, wodurch die Zykluszeit generell auf $40ms$ gesenkt wurde [VON HOLT & THOMANEK 96], [MAURER ET AL. 96]. Jeder MPC ersetzte fünf Transputerknoten des Vorgängersystems. Für die Kommunikation der MPC's mit dem TIP-Bus standen weiterhin Transputer zur Verfügung, so dass ein hybrides Rechnersystem entstand.

Die Subsysteme für Plattform und Fahrzeug blieben von diesen Änderungen unberührt. Sie waren nach wie vor über je eine RS422-Schnittstelle mit dem Bildverarbeitungssystem verbunden.

Das wohl beeindruckendste Experiment mit dieser Evolutionsstufe der TIP-Bus Systeme war die Langstreckenfahrt von München nach Odense (Dänemark) im November 1995, die sowohl mit automatischer Quer- als auch mit automatischer Längsführung durchgeführt wurde. Wie in [MAURER 00] nachzulesen ist, betrug die 'experimentell zurückgelegte Strecke' $1758km$, wovon etwa 95 Prozent autonom⁶ zurückgelegt wurden.

⁶Der Spurwechsel wurde nach wie vor vom Bediener getriggert.

3.1.2 Diskussion der Ergebnisse

Trotz der beachtlichen Ergebnisse, die mit den spezialisierten Systemen zur autonomen Mobilität erreicht werden konnten, war diese Rechnertechnologie nicht mehr zukunftsweisend. Dazu trug zum einen bei, dass die Folgeprozessoren nicht mehr pinkompatibel zu ihren Vorgängern waren, zum anderen entwickelte sich diese Prozessortechnologie langsamer als andere Rechnerarchitekturen.

Bedingt durch die Transputer-Hardware war zwar eine parallele und somit echtzeitfähige Abarbeitung unterschiedlicher Aufgaben möglich, dies wurde jedoch um den Preis einer aufwendigeren Koordination und Kommunikation zwischen den Prozessen, welche auf verschiedenen Rechnerknoten verteilten waren, erkauft. Letztlich führte dies zu einer losen Kopplung aller im System befindlichen Einzelmodule und zu einer statischen Prozesskonfiguration. Speziell bei der Handhabung komplexer Szenarien (siehe [MÜLLER 96]) wurden diese Nachteile deutlich und es zeigte sich, dass ein höherer Grad an Flexibilität und eine engere Verkopplung der einzelnen Module erforderlich war.

Die erzielten Ergebnisse bestätigten aber auch eindrucksvoll, wie effizient der 4D-Ansatz zum maschinellen Echtzeitsehen eingesetzt werden kann. Die eigenständigen Implementierungen für spezielle Aufgaben sollten allerdings aufgelöst und, wie in [DICKMANN 97] vorgeschlagen wird, durch einen verallgemeinerten Ansatz zur Ermittlung von Objektdaten aus Videobildfolgen ersetzt werden.

Die bis zu diesem Zeitpunkt zur Gewinnung der Videobildfolgen eingesetzte Anordnung von zwei monochromen Kameras mit unterschiedlicher Brennweite (bifokal) zeigte allerdings Defizite, wenn überholende Fahrzeuge frühzeitig in die eigene Fahrspur einscherten, wenn im Baustellenbereichen weiße und gelbe Spurmarkierungen aufgebracht waren oder wenn die Geschwindigkeitsdifferenz zu einem vorausfahrenden Fahrzeug zu groß war. Diese Schwachpunkte führten zur Konzeption eines 'elektronischen Fahrzeugauges', auch MARVEYE ('Multi-focal Active Reactive Vehicle Eye') genannt [DICKMANN 95]. Zentrale Punkte sind dabei die Steigerung der möglichen Vorausschau durch eine dritte, höhere Auflösungsebene, die Verfügbarkeit eines Farbsignals und die Erweiterung des Gesichtsfeldes durch eine divergente Stereoanordnung für den Nahbereich auf über 100°.

Alle gewonnen Erkenntnisse trugen ab 1996 zur Entwicklung des neuen EMS-Vision Systems bei. Die Beschreibung des gesamten Systems würde an dieser Stelle zu weit führen, deshalb sei hier auf eine Reihe von Arbeiten verwiesen, die im Zuge der Entwicklung des EMS-Systems entstanden sind. So wird in [MAURER 00] die Systemarchitektur für ein autonomes Fahrzeug auf funktionaler Ebene diskutiert. [RIEDER 00] beschreibt, wie eine zentrale dynamische Wissensbasis auf einem verteilten Rechnersystem aufgebaut werden kann. Der Einsatz der MARVEYE-Konfiguration sowie eine mögliche Implementation eines allgemeinen Wahrnehmungsprozesses, beispielhaft an der Fahrbahnerkennung erläutert, können in [LÜTZELER 02] nachgelesen werden. Die Verwendung dieses allgemeinen Wahrnehmungsprozesses für die Landmarkenerkennung ist ebenso Inhalt der Arbeit von [GREGOR 02] wie die für die Missionsdurchführung benötigten Fähigkeiten.

Im weiteren wird speziell auf die Themenbereiche des EMS-Systems eingegangen, welche für die Fahrzeugführung relevant sind.

3.2 Hardware-Konzept

Aufgrund der Tatsache, dass die vormalig verwendeten Transputer bzw. PowerPC's nicht mehr unterstützt wurden und diese zudem pro Rechenknoten eine sehr geringe Rechenleistung im Vergleich zu neueren Prozessoren zur Verfügung stellten, musste für das neu zu entwickelnde EMS-Vision System passende Rechnerhardware gefunden werden. In [RIEDER 00] ist detailliert nachzulesen, welche Rechner-Systeme miteinander verglichen wurden und wie letztendlich die Entscheidung zu Gunsten der Intel-PC's fiel.

Ein wesentlicher Grund, der für die PC-Lösung sprach, war die einfache Anbindung der Subsysteme für Kameraplattform und Fahrzeug. Wie schon beim Fahrzeug-Subsystem des Versuchsfahrzeuges VAMP sollte generell ein kleines Transputercluster zwischen die Fahrzeugelektronik (Leistungselektronik für die Ansteuerung der Aktuatoren, A/D-Wandler zum Einlesen von Sensorsignalen, etc.) und das neu zu konzipierende EMS-Kernsystem (vernetzte PC's) geschaltet werden. Dies hat den Vorteil, dass alle echtzeitkritischen Regelkreise auf dieses Transputersystem verlagert werden können, wo die notwendigen Echtzeitbedingungen für stabile Fahrzeugregelkreise mit unterschiedlichen Zykluszeiten definitiv eingehalten werden. Die Anbindung eines Transputerclusters erfordert lediglich eine RS422-Schnittstelle.

„Auch die Plattformen zur aktiven Blickrichtungssteuerung basierten zum damaligen Zeitpunkt ausschließlich auf Transputerclustern mit RS422-Schnittstelle. Diese Plattformen sollten als eingebettete Systeme weiter genutzt werden. Gleichzeitig wurde an der Entwicklung kostengünstigerer Plattformen auf Basis von Industrie-PC's gearbeitet. Auch diese sollten als eingebettete Systeme funktionieren und über einen CAN-Bus mit dem Kernsystem verbunden werden.“ [RIEDER 00]

Das entstandene EMS-Kernsystem ist in der Anzahl der vernetzten Rechner frei skalierbar. Derzeit besteht es aus zwei bis vier Rechnern mit je zwei Prozessoren vom Typ Pentium II oder Pentium III ($333\text{MHz} - 850\text{MHz}$), von denen einer als Verhaltensgenerierungs-PC und die restlichen als Bildverarbeitungs-PC's genutzt werden. Abbildung 3.1 zeigt die EMS-Hardwarearchitektur der Versuchsfahrzeuge VAMP und VAMORS.

Für den Datenaustausch zwischen den Rechnern in Echtzeit sind diese durch ein SCI-Netz ('Scalable Coherent Interface', [GIACOMINI ET AL. 98]) miteinander verbunden. Der nicht ins SCI-Netz integrierte Rechner (Gateway-PC) dient lediglich zur konsistenten Software-Verwaltung. Über Fast-Ethernet (100BaseT) kann von allen anderen Systemrechnern auf die Systemsoftware zugegriffen werden, die auf dem Gateway-PC zentral gehalten wird. Über den 10BaseT Ethernet-Anschluss des Gateway-PC's kann eine Verbindung zu einem externen Netzwerk hergestellt werden, um z.B. neue Systemsoftware aufzuspielen.

Alle Bildverarbeitungs-PC's sind mit entsprechender Hardware (Frame-Grabbern) für das Digitalisieren der analogen Videoströme ausgerüstet. Sämtliche Bildverarbeitungs-komponenten werden hardwaremäßig über ein systemweites V-Sync Signal synchronisiert.

Die MARVEYE-Kamerakonfiguration ist im Versuchsfahrzeug VAMORS auf einer Zweiachsen-Kameraplattform montiert. Im Experimentalfahrzeug VAMP befindet sie sich

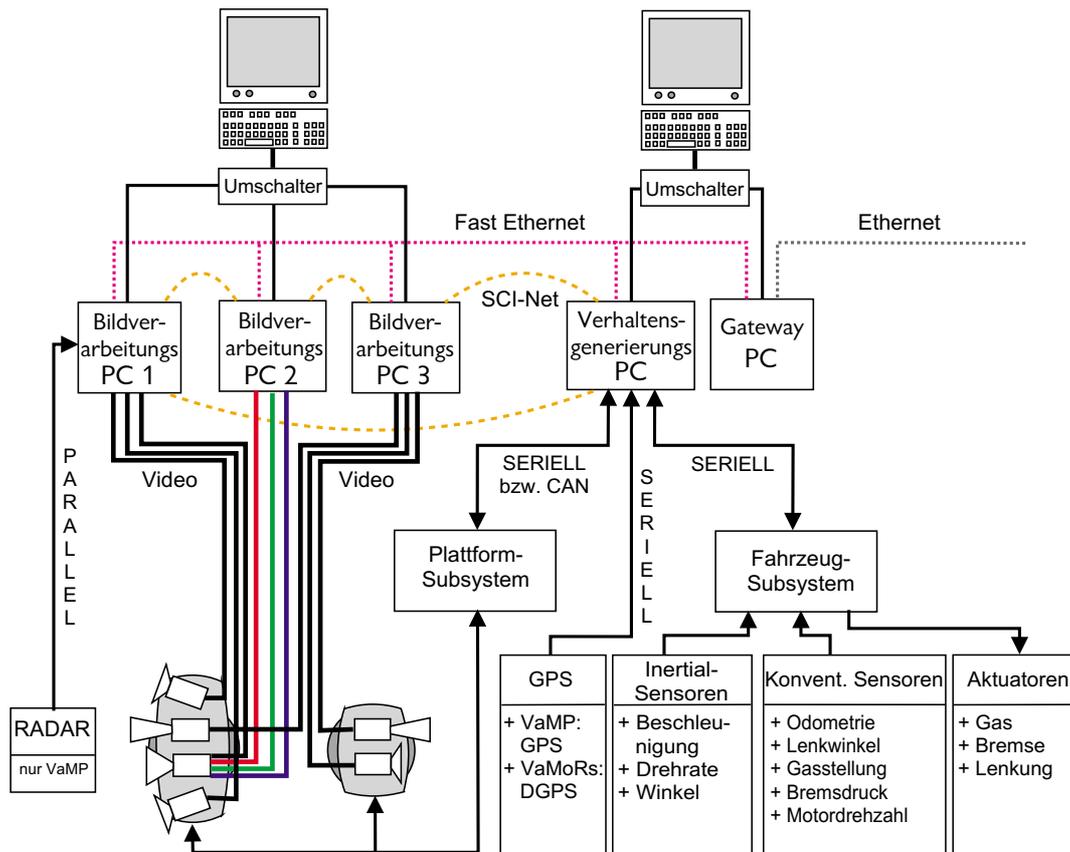


Abbildung 3.1: EMS-Hardwarearchitektur der Versuchsfahrzeuge

auf einer um die Gierachse drehbaren Plattform. Zusätzlich verfügt VAMP über eine Einachsen-Plattform mit Kameras zur Überwachung der hinteren Hemisphäre.

Die auf den Plattformen montierten Winkel- und Drehratensensoren werden vom Plattform-Subsystem verwandt, um die Plattform zu regeln. Je nach Ausführung des Subsystems (Transputercluster oder Industrie-PC) erfolgt die Anbindung an den Verhaltensgenerierungs-PC über eine serielle RS422-Schnittstelle oder mittels CAN-Bus (ISO11898-Standard).

Mit dem Verhaltensgenerierungs-PC ist auch das Fahrzeug-Subsystem via einer RS422-Schnittstelle verbunden. Das aus einem kleinen Transputercluster bestehende Fahrzeug-Subsystem ist neben der Ausführung aller echtzeitkritischen Fahrzeugregelungen auch für die Ansteuerung der Aktuatoren (Gas, Bremse, Lenkung) und das Einlesen von Sensordaten, wie die von Inertial- oder Odometriesensoren, zuständig. Wichtig ist, dass die Subsysteme via des Verhaltensgenerierungs-PC's mit den übrigen Systemkomponenten synchronisiert sind.

Für die Bestimmung der globalen Position ist ein C/A-Code GPS-Empfänger vorgesehen, dessen Anbindung an den Verhaltensgenerierungs-PC über eine RS232-Schnittstelle erfolgt.

Im Experimentalfahrzeug VAMORS ist zusätzlich noch ein Receiver für den Empfang von DGPS-Signalen vorhanden.

Das Versuchsfahrzeug VAMP verfügt weiterhin über ein $77GHz$ Radar mit einer Sendeleistung von $3mW$, woraus sich ein vermessbarer Bereich von $2m$ bis $155m$ ergibt [SÄGER ET AL. 98]. Das Radar ist über eine parallele Schnittstelle (gemäß IEEE1284) direkt mit einem Bildverarbeitungs-PC verbunden, um die Kommunikationszeiten so gering wie möglich zu halten.

Bedient wird das gesamte System lediglich über ein Terminal (Monitor, Tastatur, Maus), das über einen Umschalter mit dem Verhaltensgenerierungs-PC verbunden ist. Das zweite Terminal, an welches die Bildverarbeitungs-PC's angeschlossen sind, dient lediglich zur Visualisierung der auf diesen Rechnern vorhandenen digitalisierten Videoströme.

Ein in Abbildung 3.1 nicht eingezeichnetes RAID-System dient zur zeitsynchronen Aufzeichnung von digitalisierten Videoströmen und Fahrzeugdaten.

Als Betriebssystem für die in der EMS-Vision Hardwarearchitektur verwandten Intel-PC's wurde WindowsNT gewählt. Welche Gründe für diese Wahl sprachen und welche Alternativen geprüft wurden, kann in [RIEDER 00] nachgelesen werden.

Mit der EMS-Hardwarearchitektur wurde ein flexibles, verteiltes Hardware-Konzept für autonome Versuchsfahrzeuge realisiert, mit dessen Hilfe Funktionalitäten autonomer Systeme, im speziellen von autonomen Landfahrzeugen, verifiziert werden können. Zur Steigerung der System-Rechenleistung muss lediglich ein PC des Kernsystems durch einen leistungsfähigeren ersetzt werden, der vorab mit der notwendigen Hardware (FrameGrabber, SCI-Interface, etc.) und der Basissoftware ausgerüstet wird. Die EMS-Vision System-Software muss nicht angepasst werden (vgl. Kapitel 3.4). Das EMS-Vision Hardware-Konzept wurde in den beiden Versuchsfahrzeugen VAMORS und VAMP einheitlich umgesetzt. Detailinformationen zur Hardware und zum Aufbau der Experimentalfahrzeuge findet man in Abschnitt 2.2.2.

3.3 Funktionale Systemarchitektur

Die mit der EMS-Hardware realisierbaren Funktionalitäten eines autonomen Systems zur Bewegungssteuerung können auf vielfältige Weise beschrieben werden. Hier wird für die Darstellung der funktionalen Zusammenhänge und Abläufe im EMS-Vision System eine hierarchische Beschreibungsweise gewählt.

In [MAURER 00] wird eine funktionale Systemarchitektur vorgeschlagen, die sich an den Arbeiten von [RASMUSSEN 83] zur Modellierung menschlichen Verhaltens orientiert. [RASMUSSEN 83] unterscheidet drei kognitive Verhaltensebenen, die fertigkeitbasierte Ebene, die regelbasierte Ebene und die wissensbasierte Ebene. Diese drei Ebenen menschlichen Verhaltens unterscheiden sich hinsichtlich ihres Grades der Abstraktion, ihrer Repräsentationsformen und ihres Zeithorizonts.

Das 'Drei-Ebenen-Modell' nach [RASMUSSEN 83] „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.“ [MAURER 00] weist in seiner Arbeit aber auch darauf hin, dass es relevante Unterschiede zwischen Mensch und technischem System gibt, wie z.B. den unterschiedlichen Zeitbedarf bei der Informationsverarbeitung, die nicht übersehen werden dürfen.

„In Erweiterung zu Rasmussens Schema wird die fertigkeitbasierte Ebene im vorgestellten Architekturansatz unterteilt in eine *hardware-spezifische Ebene* und eine *4D-Ebene*. 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.“ [MAURER 00]

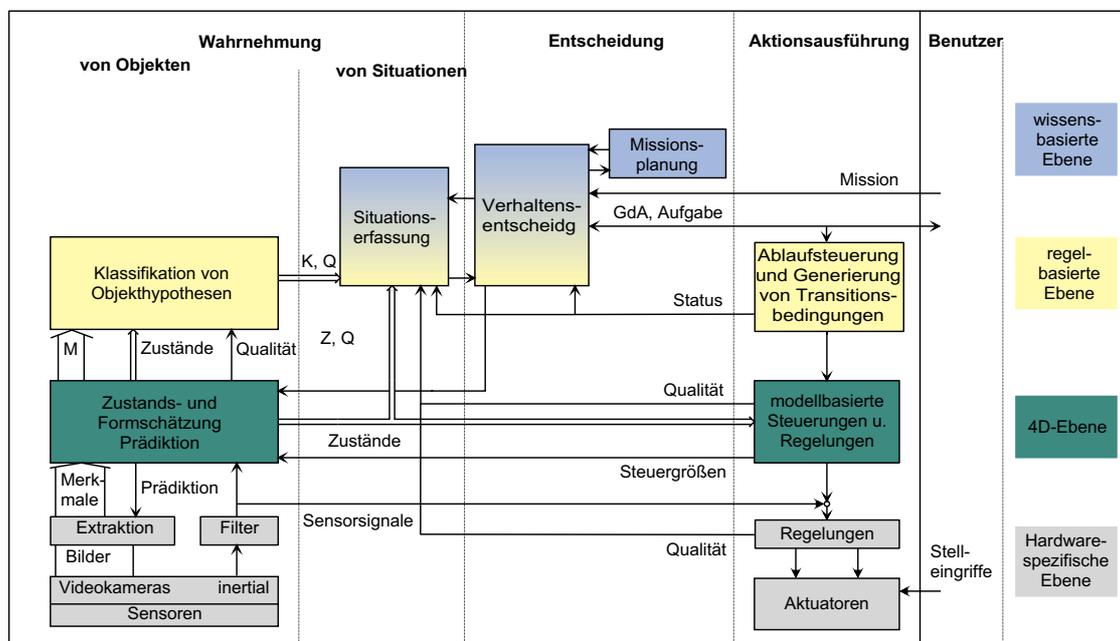


Abbildung 3.2: Funktionale Systemarchitektur (in Anlehnung an [MAURER 00]) - GdA: Grad der Autonomie; K: Klasse, der ein physikalisches Objekt zugeordnet wurde; M: Merkmale; Q: Qualität; Z: Zustände;

Abbildung 3.2 zeigt die funktionalen Zusammenhänge innerhalb der EMS-Vision Systemarchitektur. Neben der Einteilung in unterschiedliche Hierarchieebenen ist auch eine Untergliederung der verschiedenen Aufgaben eines autonomen Systems in Aufgabengebiete wie Wahrnehmung, Entscheidung, Ausführung und Interaktion mit dem Benutzer sinnvoll. In ihrer Gesamtheit ergibt sich eine funktionale Systemarchitektur, die alle Voraussetzungen erfüllt, die von [ANTSACLIS & PASSINO 93] an ein 'intelligentes Führungssystem' gestellt werden.

Hardware-spezifische Ebene: An unterster Stelle der hierarchischen Systemarchitektur sind alle hardware-spezifischen Module zur gleichnamigen Ebene zusammengefasst. „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.“ [MAURER 00]. Im einzelnen bedeutet dies, dass im Bereich der Wahrnehmung die Daten der eingesetzten Sensoren passenden Signalverarbeitungsprozeduren unterzogen werden. Die so vorverarbeiteten Sensorsignale dienen zum einen höheren Ebenen als Eingangssignale, zum anderen werden einige ausgewählte Signale in Regler der hardware-spezifischen Ebene zurückgekoppelt, um schnelle Stabilisierungsregelungen zu realisieren. Es ergeben sich Zykluszeiten von $1ms$ bis zu $10ms$. Über die Bedienelemente der Aktuatoren hat der Bediener in dieser Hierarchieebene die Möglichkeit des Eingriffs, um beispielsweise in Notsituationen die Kontrolle übernehmen zu können.

4D-Ebene: Als nächste Ebene wird in [MAURER 00] die 4D-Ebene eingeführt. Wie in der fertigkeitbasierten Ebene gemäß der Modellierung menschlichen Verhaltens nach [RASMUSSEN 83] nehmen auch in der 4D-Ebene interne Modelle eine zentrale Stellung ein. Es werden entsprechend dem 4D-Ansatz nach [DICKMANN 87a] räumlich/zeitliche Modelle verwandt. Diese werden in Verbindung mit rekursiven Schätzverfahren im Bereich der Wahrnehmung zur Bestimmung der Relativlage zu aufgabenrelevanten Objekten der Umgebung, zur Formschätzung oder zur Ermittlung von Eigenzustandsgrößen des autonomen Systems benutzt. Aufgrund der überwiegend auf Videostreamen gemäß der PAL-Norm mit $25Hz$ basierenden Informationsverarbeitung im Bereich der Wahrnehmung hat sich in der gesamten 4D-Ebene eine Zykluszeit von $40ms$ etabliert. Bei der Ausführung von Aktionen in der 4D-Ebene dienen die gewonnenen Zustandsgrößen zusammen mit den internen Modellen zur Generierung sowohl von Vorsteuertrajektorien als auch von Sollverläufen für Führungsgrößen der Regler. Regler, welche trotz nicht modellierter Störungen die Solltrajektorien einhalten, sind obligatorisch.

Regelbasierte Ebene: Die Zusammenschau der in der 4D-Ebene gewonnenen Zustandsgrößen mit den Zielvorgaben des autonomen Systems erfolgt in der regelbasierten Ebene. Es stehen dazu Regeln zur Verfügung, die meist in der Form von 'WENN..., DANN...' Gesetzen formuliert sind. Mit Hilfe dieser Regeln soll es einem technischen System möglich sein, Verhalten zu generieren, das dem regelbasierten Verhalten des Menschen entspricht. Das zur Verfügung stehende Regelwerk wird im Bereich der Wahrnehmung verwandt, um Objekthypothesen aufzustellen, um Objekte zu klassifizieren oder um aus den Zustandsgrößen der 4D-Ebene eine abstrahierte Beschreibung der Situation abzuleiten. Die Situation wird hinsichtlich der Umstände analysiert, welche für die Ausführung der aktuellen und zukünftigen Aufgaben relevant

sind. Im Bereich der Entscheidungsfindung werden aufgrund der in der regelbasierten Ebene zur Verfügung stehenden Situationsbeschreibung, der Zustandsbeschreibung der 4D-Ebene und der Zielvorgaben Verhaltensmodi ausgewählt, die geeignet erscheinen, die gestellten Aufgaben erfolgreich zu erfüllen. Die für die Verhaltensgenerierung zuständigen Systemkomponenten in der regelbasierten Ebene haben die Funktion, regelbasiert passende Regelungen und Steuerungen der 4D-Ebene auszuwählen und zu aktivieren. Anders als bei den unteren Ebenen kann hier keine feste Zykluszeit mehr angegeben werden, da unverhofft Ereignisse eintreten können, auf die sofort reagiert werden muss. Es können aber auch Phasen eintreten, in denen sich über mehrer Sekunden die Situation nicht ändert.

Wissensbasierte Ebene: „In der wissensbasierten Ebene sind diejenigen Komponenten angeordnet, die auf Hintergrundwissen, das z.B. in Form digitaler Karten vorliegt, zurückgreifen.“ [GREGOR 02]. Das Hintergrundwissen ist entweder fest vorgegeben oder kann erlernt bzw. angepasst werden. So können beispielsweise Karten aufgrund der wahrgenommenen Umwelt aktualisiert werden. Unter Verwendung dieses Hintergrundwissens werden in dieser Ebene die mittel- und langfristigen Pläne sowie die Regelbasis für die regelbasierte Ebene generiert. Die aufgrund von Zielen erstellten Pläne sind ein zentrales Konzept der wissensbasierten Ebene, um erfolgreich agieren zu können. Wie auch schon in der regelbasierten Ebene kann auch hier keine feste Zykluszeit mehr angegeben werden, da unvorhergesehene Ereignisse ein sofortiges Umplanen nötig machen können. Die Zeitintervalle liegen aber für gewöhnlich über denen der regelbasierten Ebene.

Durch die Einteilung in unterschiedliche Beschreibungsebenen entsteht eine hierarchische Systemarchitektur. Gemäß [MESAROVIC ET AL. 70] weist die vorgestellte EMS-Systemarchitektur eine 'Hierarchie von Beschreibungsebenen' auf. Wie bei der Modellierung menschlichen Verhaltens nach [RASMUSSEN 83] in Form des 'Drei-Ebenen-Modells' werden auch bei technischen Systemen, welche eine 'Hierarchie der Beschreibungsebenen' aufweisen, in den einzelnen Ebenen unterschiedliche Methoden zur Repräsentation und Verarbeitung von Wissen eingesetzt. Besonders deutlich unterscheiden sich in dieser Hinsicht die beiden unteren regelungstechnisch geprägten Ebenen der funktionalen EMS-Systemarchitektur von den oberen, in denen Methoden aus der Informatik eingesetzt werden. Eine Reihe von Repräsentationsformen und -methoden für die einzelnen Beschreibungsebenen aus der Informatik und der Regelungstechnik sind in [MAURER 00] aufgelistet.

Die Umsetzung dieses Prinzips der unterschiedlichen, auf die jeweilige Beschreibungsebene angepassten Repräsentationsformen erfolgt in Form einer zentralen Wissensbasis für das EMS-Vision System und kann detailliert in [RIEDER 00] nachgelesen werden (siehe auch Abschnitt 3.5).

3.4 Software-Struktur

Die in den einzelnen Hierarchieebenen angesiedelten Funktionalitäten können auch an einzelnen Software-Prozessen festgemacht werden. Die Implementierung in Form von eigenständigen Prozessen ergab sich im Zuge des Umstiegs auf die EMS-Hardware aus den Forderungen an eine neue Software-Architektur. So sollten wie bei den vorherigen Systemen zusammengehörige Funktionalitäten (z.B. die eines Wahrnehmungs- oder eines Fahrzeugführungs-Experten) in eigenen Software-Modulen umgesetzt werden. Die Prozesse werden auf dem jeweils passenden Rechner des verteilten EMS-Vision Kernsystems platziert. Dadurch ergibt sich eine Prozessverteilung wie in Abbildung 3.3 skizziert. Die Prozesskonfiguration ist dabei nicht fixiert. Für unterschiedliche Aufgaben können auch bei laufendem Betrieb beliebige Prozesse gestartet oder terminiert werden.

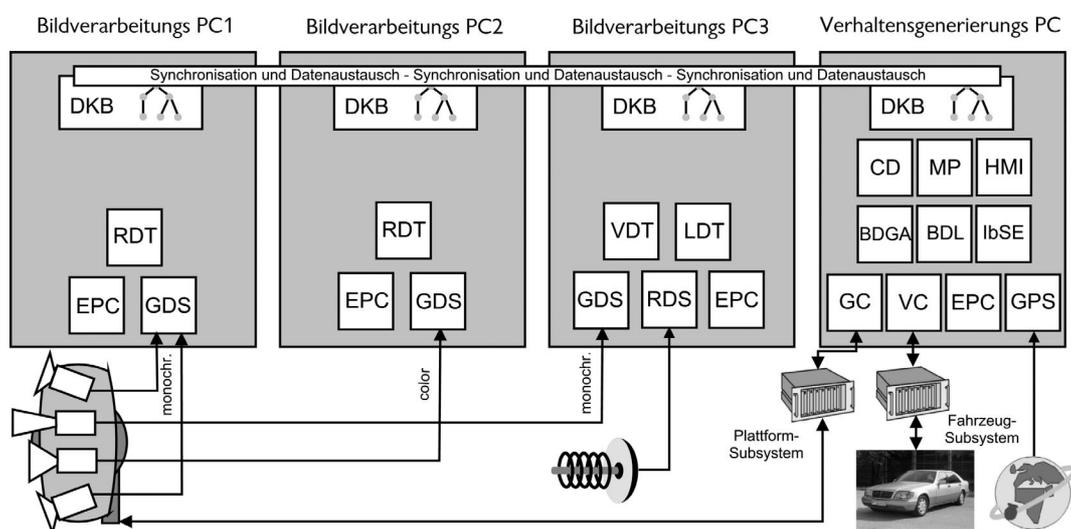


Abbildung 3.3: EMS-Prozessverteilung (nach [RIEDER 00]) -

BDGA: Behavior Decision for Gaze and Attention; BDL: Behavior Decision for Locomotion; CD: Central Decision; DKB: Dynamic Knowledge Base; EPC: Embedded PC Daemon; GC: Gaze Control; GDS: Grab Device Server; GPS: Global Position System; HMI: Human Machine Interface; IbSE: Inertially based State Estimation; LDT: Landmark Detection and Tracking; MP: Mission Planning; RDS: Radar Device Server; RDT: Road Detection and Tracking; VC: Vehicle Control; VDT: Vehicle Detection and Tracking

Auf allen Rechnern läuft jeweils eine Instanz der dynamischen Wissensbasis (DKB) und ein Prozess zur Ansteuerung des PC's als eingebettetes System. „Dieser Embedded PC-Service (EPC) ermöglicht das Starten und Terminieren von Prozessen über das Netzwerk, so dass nur der Verhaltensgenerierungs-PC, an dem die Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) angelagert ist, eine Tastatur und Maus benötigt.

Die Prozesse auf den Bildverarbeitungsrechnern, wie Fahrzeugerkennung (VDT), die Straßenerkennung (RDT) und die Landmarkenerkennung (LDT) dienen der Schätzung von Zustandsgrößen, die mit den entsprechenden Objekten verknüpft sind. Dazu bedienen sie sich der Sensordaten, die über die Prozesse Grab Device Server (GDS) und Radar Device Server (RDS) ins System eingespeist werden.” [RIEDER 00]

Der Verhaltensgenerierungs-PC ist für die Interaktion mit dem Benutzer (HMI), die Planung von Missionen (MP) und die Steuerung der Aktuatorik (VC, GC) zuständig. Die Auswahl von Verhaltensweisen wird von einer hierarchisch organisierten Gruppe von Entscheidungsprozessen mit der zentralen Entscheidungsinstanz (CD) an der Spitze, der Entscheidungsinstanz für die Fortbewegung (BDL) und der Entscheidungsinstanz für die Blickrichtung (BDGA) koordiniert. Außerdem werden auf diesem Rechner Sensordaten vom Fahrzeug und vom Global Positioning System (GPS) in einem eigenen Prozess zur inertial basierten Zustandsschätzung (IbSE) fusioniert.

Die Software-Struktur mit einzelnen Prozessen (Multi-Prozess-System) auf einem verteilten Rechnersystem hat zur Folge, dass eine starke Entkopplung der Prozesse entsteht. Mittels einer gemeinsamen Wissensrepräsentation soll dieses Manko ausgeglichen und eine stärkere Verknüpfung der einzelnen Systemkomponenten erreicht werden.

3.5 Zentrale Wissensrepräsentation

Als eine Konsequenz aus dem EMS-Hardwarekonzept und der EMS-Softwarestruktur sowie aus der Analyse vorausgegangener Systemarchitekturen wurde für das EMS-Vision System eine zentrale Wissensrepräsentation gefordert. Sämtliches statisches und dynamisches Wissen soll bei Bedarf im gesamten System verfügbar sein. Hierfür ist eine zentrale Wissensbasis vorgesehen, die sowohl das bestmögliche Abbild der Umwelt und der darin enthaltenen Objekte und Subjekte⁷ als auch Informationen über den eigenen Systemzustand und die verfügbaren Ressourcen enthält. Jedes Systemmodul soll die Möglichkeit besitzen, die von ihm benötigten Informationen, sofern diese im System vorhanden sind, von der zentralen Wissensbasis abrufen zu können. Sinnvollerweise werden für das vorhandene Wissen, abhängig davon, in welchem Abstraktionsgrad es vorliegt oder ob es statischer bzw. dynamischer Natur ist, unterschiedliche Repräsentationsformen verwandt.

In [RIEDER 00] ist eine erste Version der zentralen Wissensbasis beschrieben. Sie enthält drei separate Datenbasen, die dynamisches Wissen unterschiedlicher Detaillierungstiefe beinhalten. Die einzelnen Datenbasen unterscheiden sich durch die gewählten Repräsentationsformen. In Abbildung 3.4 ist die zentrale Wissensrepräsentation in einer um den Missionsplan erweiterten Form (vgl. [GREGOR 02]) schematisch skizziert.

⁷Eine detaillierte Unterscheidung zwischen Subjekt und Objekt wird in [DICKMANN 89] gegeben.

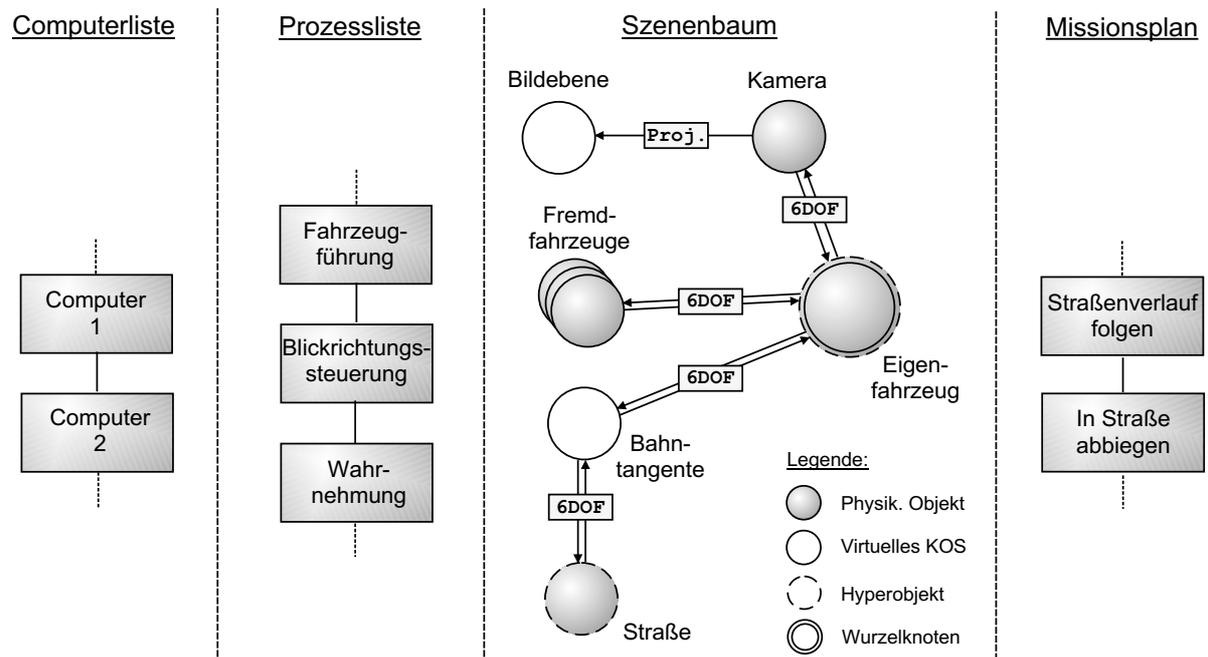


Abbildung 3.4: Zentrale Wissensbasis (in Anlehnung an [GREGOR 02])

Computerliste: Die Computer-Objekte in der Computerliste symbolisieren je einen Rechner des EMS-Kernsystems. Die einzelnen Listeneinträge stellen Informationen über den jeweiligen Computer, wie die generell und aktuell verfügbaren Hardware-Ressourcen oder die momentane Rechnerauslastung, zur Verfügung.

Prozessliste: Für gewöhnlich ist ein Prozess (im Sinne der Informatik, vgl. auch Abschnitt 3.4) Experte für ein oder mehrere Objekte des Szenenbaums oder für bestimmte Systemfähigkeiten. Um seine Aufgaben erfüllen zu können, benötigt ein jeder Prozess bestimmte Systemressourcen wie spezielle Hardware, notwendige Prozessorleistung und Speicherbedarf. Dieser für den jeweiligen Prozess spezifische Ressourcenbedarf ist im zum jeweiligen Prozess gehörenden Element der Prozessliste abgelegt.

Für jeden Prozess gibt es einen Repräsentanten in der Prozessliste, der wie alle anderen Prozess-Objekte eine identische Struktur aufweist. Über die gemeinsame Schnittstelle der Prozess-Objekte kann der prozessspezifische Ressourcenbedarf abgefragt werden. Außerdem stellt diese Schnittstelle weitere Funktionen zur Prozessverwaltung zur Verfügung, die eine einheitliche Behandlung unterschiedlicher Prozesstypen (Wahrnehmungs-, Entscheidungsprozesse usw.) ermöglichen (siehe [GREGOR 02]). Die Prozess-Objekte werden zudem dazu benutzt, weitere prozessspezifische Informationen in Form einer Punkt-zu-Punkt Kommunikation zwischen einzelnen Prozessen auszutauschen.

Szenenbaum: Alle physikalischen Objekte einer Szene werden im Szenenbaum repräsentiert. Der Begriff des Szenenbaums leitet sich von der in der Computergraphik weitverbreiteten Technik der attribuierten relationalen Graphen ab, wo Zusammenhänge zwischen Objekten in einer baumartigen Struktur dargestellt werden [DICKMANN 97].

Die Knoten im Szenenbaum repräsentieren entweder ein physikalisches Objekt, dem jeweils ein Koordinatensystem (KOS) zugeordnet ist, oder ein virtuelles Objekt (= virtuelles KOS). Eine Übersicht der verwendeten Koordinatensysteme gibt [SIEDERSBERGER 01]. Physikalische Objekte sind beispielsweise Fremdfahrzeuge oder Kameras. Die Bahntangente hingegen ist kein physikalisches Objekt, sondern wird nur durch ein virtuelles KOS repräsentiert. Alle Knoten können über Form- und Dynamikmodelle verfügen und stellen Zugriffsfunktionen auf die Daten zur Verfügung. In Abbildung 3.4 sind die verschiedenen Szenenbaum-Knoten durch unterschiedliche Textur kenntlich gemacht. Eine besondere Stellung nimmt der gesondert gekennzeichnete Wurzelknoten ein, der die Basis der baumartigen Struktur bildet. Mit Hyperobjekten können physikalische Teilobjekte (z.B. Räder, Karosserie, Sensoren) zu einer logischen Einheit wie dem Eigenfahrzeug gruppiert werden (vgl. Abschnitt 4.1). Auch die Straße stellt ein Hyperobjekt dar, welches sich aus den Teilobjekten Fahrstreifen, Fahrbahnmarkierung, Leitpfosten usw. zusammensetzt. Es ist auch denkbar, dass bei erweiterter Erkennungsleistung Fremdfahrzeuge als Hyperobjekte modelliert werden, die aus Teilobjekten wie Rädern, Stoßstangen oder Nummernschildern bestehen.

Die Kanten zwischen den Szenenbaum-Knoten repräsentieren die Relativlage der Knoten zueinander. Die allgemeine Form der Relativlage ist durch 6 Freiheitsgrade (6 Degrees of Freedom, 6DOF), drei translatorische Verschiebungen entlang der Koordinatenachsen und drei Rotationen um diese Achsen, gegeben. Mit Hilfe von Homogenen Transformations Matrizen (HTM⁸) können die Relativlagen zwischen den Knoten formal durch HTM's beschrieben werden, wobei die 6DOF's, welche die Relativlagen wiedergeben, zur Erstellung der HTM's benutzt werden. HTM's bieten den Vorteil, dass physikalische Größen einfach durch Matrizenmultiplikationen von einem KOS in ein anderes KOS umgerechnet werden können. Durch das generalisierte Verarbeitungsschema lassen sich Transformationen (z.B. Verschiebungen, Verdrehungen, Skalierungen, ...) zwischen beliebigen Knoten effizient berechnen und mehrere Transformationsschritte können zu einer Transformationsmatrix zusammengefasst werden. Eine Einschränkung ergibt sich allerdings bei der perspektivischen Projektion (Proj.), falls diese auch mit einer Homogenen Transformations Matrix beschrieben werden soll. Diese Transformation ist nur unidirektional möglich, da die perspektivische Projektion nicht umkehrbar ist.

⁸Eine Einführung in Homogene Koordinaten wird in [PAUL 81] und [SIEDERSBERGER 01] gegeben.

Missionsplan: „Der Missionsplan enthält die Beschreibung der aktuellen Mission; er ist als sequentielle Liste von Missionselementen angelegt.“ [GREGOR 02]. Die Missionselemente enthalten neben Aufgaben für einzelne Experten auch Verweise auf erwartete, für die Mission relevante Objekte.

Alle Elemente der vier Datenbasen können durch einen eindeutigen Bezeichner identifiziert werden. Die einzelnen Datenbasen werden zu einer zentralen dynamischen Wissensrepräsentation der DKB⁹ (**D**ynamic **K**nowledge **B**ase) zusammengefasst.

Jeder Prozess des EMS-Vision Systems speist seine Daten in diese zentrale Datenbasis ein und empfängt von ihr alle Informationen, die von ihm als relevant gekennzeichnet wurden. Hierzu hält ein jeder Prozess eine lokale Kopie der von ihm angeforderten Daten aus der gemeinsamen Datenbasis. Damit diese Daten in einem verteilten Rechnersystem problemlos ausgetauscht werden können, ist es notwendig, die Daten zu synchronisieren und über die Rechengrenzen hinweg zu kommunizieren. Welche Verfahren hierzu bei der Implementierung der DKB angewandt wurden, kann in [RIEDER 00] nachgelesen werden. Letztendlich erhält man eine konsistente Verwaltung von Daten jeglichen Abstraktionsgrades im gesamten EMS-Vision System.

Mit der systemweiten, konsistenten Wissensverwaltung in Form der DKB wurde eine wichtige Voraussetzung für die weitere Entwicklung eines autonomen Systems geschaffen. So können neue Konzepte einerseits mit der bestehenden Ausbaustufe der DKB realisiert werden (Clustern von Szenenbaum-Objekten, Kapitel 4). Andererseits lässt sich die DKB beliebig erweitern, wenn es Neuerungen (Fähigkeitenkonzept, Kapitel 6) im Rahmen der Systemweiterentwicklung erfordern.

⁹[RIEDER 00] bezeichnet die zentrale Datenbasis als DOB (Dynamische Objektdatenbasis). Hier soll jedoch der erweiterte Begriff der dynamischen Wissensbasis (DKB) verwandt werden, da, wie sich im Laufe der Arbeit zeigen wird, die zentrale Datenbasis weit mehr Informationen als reines Wissen über physikalische Objekte verwaltet.

Kapitel 4

Repräsentation des Eigenfahrzeugs

Ein Szenenbaum, so wie er in Abschnitt 3.5 vorgestellt wird, ist eine sehr effiziente Darstellungsform zur formalen Beschreibung der gegenwärtigen Szene auf dem Abstraktionsniveau von Zustandsgrößen. Alle wahrgenommenen Objekte der Szene sind als Knoten im Szenenbaum repräsentiert. Die Relativlagen zwischen einzelnen Objekten werden im Szenenbaum durch die Kanten zwischen den Szenenbaum-Knoten ausgedrückt. Die Knoten selbst enthalten Größen wie Formparameter des jeweiligen Objekts, die keiner Relativbeziehung zu anderen Objekten zuzuordnen sind.

Objekte können zum einen physisch vorhandene und voneinander separierbare Einheiten in der Umwelt wie Verkehrsschilder, Fußgänger, Räder, Sensoren usw. sein. Zum anderen werden auch virtuelle Koordinatensysteme (virtuelle KOS), welche zur detaillierten Beschreibung eines Sachverhalts eingeführt werden, wie physikalische Objekte behandelt und im Szenenbaum mit einem eigenen Knoten repräsentiert. Zur Unterscheidung, um welche Art von Objekten es sich handelt, sind die zugehörigen Szenenbaum-Knoten in Abbildung 3.4 und 4.1 mit unterschiedlicher Textur versehen.

Physikalische Objekte ihrerseits können aus mehreren Teilobjekten bestehen. Derart zusammengesetzte Objekte werden als Hyperobjekte bezeichnet. Hyperobjekte bieten den Vorteil, dass Nutzer, die sich nur für das durch das Hyperobjekt repräsentierte physikalische Gesamt-Objekt z.B. die Straße interessieren, nicht den genauen Aufbau des Hyperobjektes kennen müssen.

Eine spezielle Klasse von Objekten stellen die *Subjekte* dar. Gemäß [DICKMANN 89] heben sich Subjekte von gewöhnlichen Objekten dadurch ab, dass sie in der Lage sind, auf sich und auf die Beziehung zu anderen Objekten unmittelbar Einfluss zu nehmen, indem sie ihre Aktivitäten entsprechend ihren Zielen selbstständig planen und ausführen.

Sowohl Lebewesen als auch autonome Agenten sind derartige Subjekte. Wird die Szene aus der Sicht eines autonomen Agenten interpretiert und handelt es sich bei diesem um ein Fahrzeug, so spricht man vom 'Eigenfahrzeug'. Über das Eigenfahrzeug sind in der Regel eine Fülle von Detailinformationen vorhanden. Es kann deshalb in viele Teilobjekte zerlegt werden. Im Szenenbaum der Abbildung 3.4 ist das Eigenfahrzeug nur als Hyperobjekt

dargestellt. Im Folgenden wird auf das Eigenfahrzeug mit all seinen Teilobjekten näher eingegangen und es wird beschrieben, wie auf die Zustandgrößen der einzelnen Teilobjekte zugegriffen werden kann (Abschnitt 4.1). Außerdem wird der Fahrschlauch neu eingeführt (Abschnitt 4.2).

4.1 Das Eigenfahrzeug im Szenenbaum

Das Hyperobjekt Eigenfahrzeug aus Abbildung 3.4 wird für eine feinere Auflösung und eine detailliertere Darstellung durch einen Satz von Teilobjekten, welche das Eigenfahrzeug beschreiben, ersetzt. Es ergibt sich ein eigener Teilszenenbaum für das Hyperobjekt Eigenfahrzeug. Dabei ist unwesentlich, um welchen Fahrzeugtyp es sich beim Eigenfahrzeug handelt. Hier wird exemplarisch ein möglicher Teilszenenbaum für ein autonomes Kraftfahrzeug (Abbildung 4.1) vorgestellt.

4.1.1 Teilszenenbaum 'Eigenfahrzeug'

Ausgehend von einer egozentrierten Beschreibung der Szene, in der das Eigenfahrzeug im Zentrum steht, wird als Wurzelknoten des Szenenbaums die Basis des Eigenfahrzeugs eingeführt. Mit diesem Szenenknoten ist ein Koordinatensystem verbunden, dessen Ursprung die Projektion des Fahrzeugschwerpunkts auf die Fahrwegoberfläche ist. Die x -Achse ergibt sich auf analoge Weise, indem die Fahrzeuglängsachse auf den Fahrweg projiziert wird. Wie die x -Achse liegt die y -Achse in der Ebene des Fahrwegs und zeigt nach rechts. Die z -Achse weist nach unten.

Das mit der Eigenfahrzeug-Basis korrespondierende Achsenkreuz, wie auch alle im weiteren angeführten Koordinatensysteme, können im Detail in [SIEDERSBERGER 01] nachgelesen werden. An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass allen Koordinatensystemen die Luftfahrtnorm [LN9300 90] zugrundeliegt. Das heißt, dass der Ursprung eines jeden Achsenkreuzes in einem ausgezeichneten aber frei wählbaren Punkt liegt, die x -Achse in Richtung der Hauptausdehnung bzw. Hauptbewegungsrichtung zeigt und die z -Achse generell nach unten weist. Die y -Achse ist so orientiert, dass sie das Achsenkreuz zu einem rechtshändigen, orthogonalen Koordinatensystem vervollständigt. Alle über die Definition der Koordinatensysteme hinausgehenden Konventionen und Begriffe sind der Kraftfahrzeugnorm [ISO8855 94] entnommen.

Dadurch dass der Ursprung des Basis-Koordinatensystems auf der lokalen Fahrwegoberfläche gewählt ist, werden in diesem Bezugssystem keine Vertikalbewegungen berücksichtigt. Es ergibt sich eine Entkopplung der Horizontal- von der Vertikaldynamik. Für die Beschreibung der Horizontalbewegung (Längs- bzw. Querdynamik) gibt es eine Fülle von einfachen Modellen [MITSCHKE 82], [MITSCHKE 90], [AMMON 97], die dem Szenenknoten der Eigenfahrzeug-Basis zugeordnet werden. Als ein Beispiel für ein derartig einfaches Horizontaldynamikmodell sei das 'Einspur-Modell' genannt, das auf

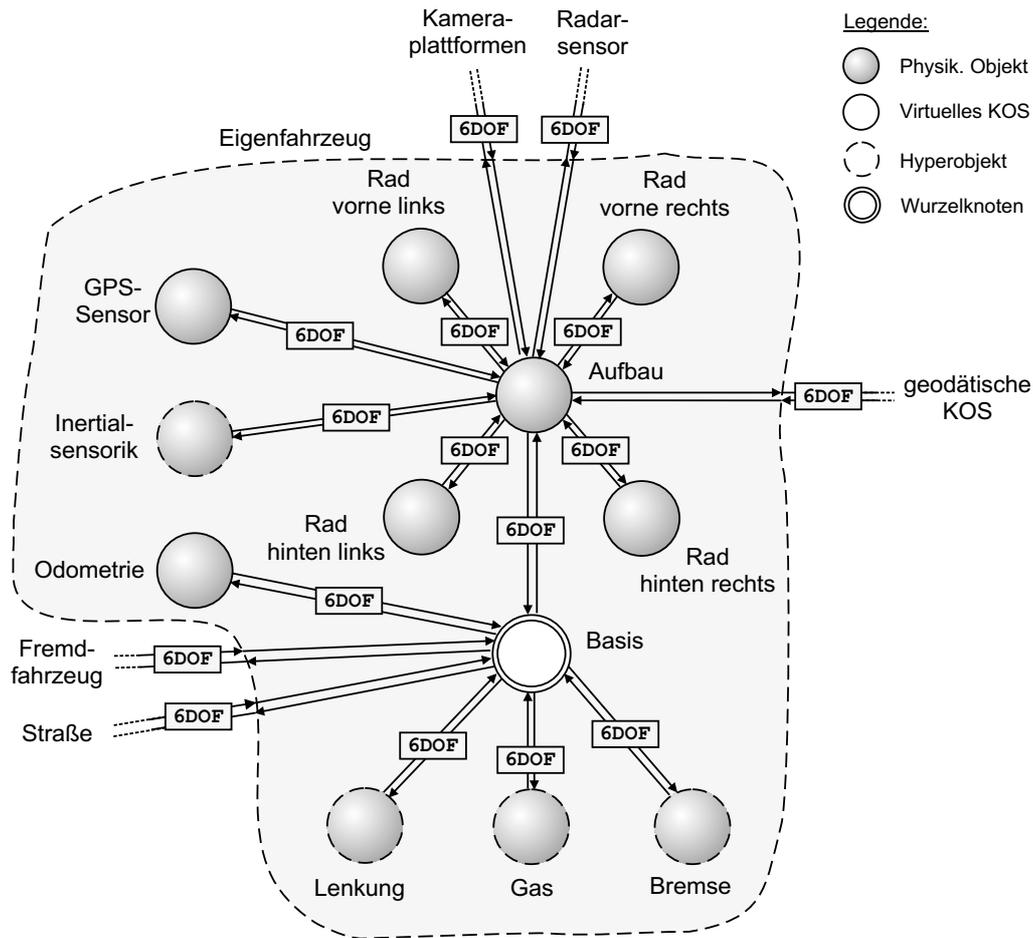


Abbildung 4.1: Repräsentation des Eigenfahrzeugs im Szenenbaum

[RIEKERT & SCHUNK 40] zurückgeht. Alle zur Beschreibung der Längs- bzw. der Querdynamik benötigten Relativgrößen zu relevanten Objekten der Szene (z.B. Fremdfahrzeuge, Straße) können in einfacher Weise dem Szenenbaum entnommen werden, da, wie in Abbildung 4.1 ersichtlich ist, die Fremdfahrzeuge und die Straße relativ zur Eigenfahrzeug-Basis beschrieben werden. Als Formmodell der Eigenfahrzeug-Basis wird ein Quader verwendet, der das gesamte Fahrzeug einhüllt und somit die Maximalabmessungen wiedergibt. Ist es aus fahrdynamischen Gründen notwendig, Auswirkungen vertikaldynamischer Effekte auf das Fahrverhalten zu berücksichtigen oder werden anderweitig vertikaldynamische Zustandsgrößen wie etwa der Nickwinkel benötigt, so ist es notwendig, auch diese Bewegungen zu modellieren. Dazu wird ein zusätzlicher Knoten in den Szenenbaum eingeführt, der speziell Form und Dynamik des Aufbaus (Karosserie) beschreibt. Der Ursprung des zugehörigen Aufbau-Koordinatensystems liegt im Schwerpunkt des Eigenfahrzeugs. Die x -Achse entspricht der Fahrzeuglängsachse, die z -Achse weist nach unten und die y -Achse steht senkrecht zu den beiden anderen Achsen und zeigt somit in Fahrtrichtung blickend

nach rechts. Der Fahrzeug-Aufbau verfügt generell über sechs Freiheitsgrade (6DOF) gegenüber der Fahrzeug-Basis, jedoch sind nur drei Freiheitsgrade (Wanken, Nicken und Huben) von Bedeutung. Zu deren Bestimmung werden entsprechende Aufbauschwingungsmodelle verwendet, wie sie in [MITSCHKE 97] oder [RILL 94] aufgeführt sind. Andere Effekte wie translatorische Verschiebungen des Aufbaus in x - und y -Richtung gegenüber der Fahrzeug-Basis sind gering und werden deshalb vernachlässigt. Bei der Beschreibung der Form kommen sehr präzise geometrische Modelle zum Einsatz, welche die Topologie der Karosserie so gut wie möglich wiedergeben.

Der Fahrzeug-Aufbau wird zum einen durch Fahrwegunebenheiten und zum anderen durch fahrzeugeigene Anregungen wie Bremsen oder Gasgeben in Schwingungen versetzt. Der Kontakt zum Untergrund wird über die Räder hergestellt, die ihrerseits mit der Karosserie über Feder-/Dämpferelemente verbunden sind. Eine Analyse der Aufbaudynamik kann daher nicht ohne die Einbeziehung der Räder und der zugehörigen Feder-/Dämpfereigenschaften erfolgen. Jedem Rad wird ein Koordinatensystem zugeordnet, dessen Ursprung in der Radmitte liegt. Die x -Achse weist in Rollrichtung des Rades, die y -Achse entspricht der Drehachse und ist in Rollrichtung gesehen nach rechts orientiert. Die z -Achse komplettiert das orthogonale Rechtssystem und zeigt gemäß der Luftfahrtnorm nach unten. Im Szenenbaum sind die einzelnen Räder als Teilobjekte des gesamten Eigenfahrzeugs dargestellt und als zu den einzelnen Rad-Koordinatensystemen äquivalente Szenenknoten repräsentiert. Die Relativlagen der Szenenknoten der Räder sind mit bis zu sechs Freiheitsgraden (6DOF) bezüglich des Aufbau-Szenenknotens, dessen Koordinatensystem-Ursprung im Fahrzeugschwerpunkt verankert ist, einstellbar. Je detaillierter die Modelle zur Beschreibung der Raddynamik sind, desto mehr Phänomene wie Sturzwinkel oder Spurverschiebung beim Einfedern des Rades werden zusätzlich zur statischen Einbaulage der Räder, zum Radhub oder zu einem eventuell vorhandenen Lenkwinkel von den 6DOF's aufgenommen. Das Formmodell ist bei Rädern denkbar einfach.

Bei am Fahrzeug-Aufbau, sozusagen 'strap-down', montierten Sensoren ist die Einbaulage von Bedeutung, damit die von ihnen gelieferten Messwerte richtig interpretiert werden können. Ein GPS-Sensor, ein Radar-Sensor und die Inertialsensorik werden deshalb als Teilobjekte des Eigenfahrzeugs mit je einem eigenen Knoten im erweiterten Szenenbaum gemäß Abbildung 4.1 repräsentiert. Dabei können einige Sensorsysteme wie die Inertialsensorik aus mehreren Einzelsensoren bestehen, welche wiederum durch separate, unterlagerte Szenenknoten repräsentiert werden. Da die Lage der Sensoren relativ zum Fahrzeugschwerpunkt angegeben wird, werden die Sensor-Knoten im Szenenbaum an den Aufbau-Knoten angehängt. Mit Hilfe der dabei zu besetzenden sechs Freiheitsgrade kann der Einbauort und die Ausrichtung der Sensoren relativ zum Aufbau-Koordinatensystem angegeben werden. Sensorsignale können somit unter Verwendung der aus den 6DOF's gewonnenen Homogenen Transformations Matrizen (HTM, vgl. Abschnitt 3.5) vom jeweiligen Sensor-Koordinatensystem ins Aufbau-Koordinatensystem transformiert werden. Die Achsen eines Sensor-Koordinatensystems können beliebig z.B. entlang der Empfindlichkeitsrichtungen des Sensors ausgerichtet sein. Eine Formmodellierung ist bei dieser Art von Sensoren nicht notwendig.

Neben den Sensorsystemen verfügt das Eigenfahrzeug über Aktuatorssysteme (Gas, Bremse, Lenkung). Auch diese werden im Teilszenenbaum des Eigenfahrzeugs durch je einen eigenen Szenenknoten repräsentiert. Bei den Aktuatorobjekten handelt es sich um Hyperobjekte, da ein Aktuatorssystem neben dem eigentlichen Stellglied in den meisten Fällen noch über eine schnelle, unterlagerte Aktuatorregelung und für deren Realisierung auch über Sensoren verfügt. Das heißt, der Aktuator selbst besteht aus mehreren Teilobjekten, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll.

Der hier dargestellte Teilszenenbaum für das Eigenfahrzeug stellt nur eine mögliche Aufteilung in verschiedene Teilobjekte dar. Es sind beliebig andere Variationen denkbar. Anhand der Erläuterungen zum Eigenfahrzeug-Teilszenenbaum gemäß Abbildung 4.1 sollte lediglich gezeigt werden, wie ein Hyperobjekt in Teilobjekte aufgelöst werden kann und wie sich dadurch eine komplette Zustandsgrößen-Beschreibung des Eigenfahrzeugs ergibt.

4.1.2 Zugriff auf Größen des Eigenfahrzeugs

Prinzipiell sind alle Informationen des Eigenfahrzeug-Teilszenenbaums frei verfügbar. In den seltensten Fällen werden aber alle zur Verfügung stehenden Zustandsgrößen des Eigenfahrzeugs von den Nutzern des Szenenbaums benötigt, mit Ausnahme des Eigenfahrzeug-Experten. Meistens reichen Ausschnitte aus dem Eigenfahrzeug-Teilszenenbaum.

Ein Minimum an Informationen über das Eigenfahrzeug bekommt man, wenn nur die beiden zentralen Szenenknoten Eigenfahrzeug-Basis und -Aufbau betrachtet werden. In dieser Konstellation stehen Information über Form und Dynamik des Eigenfahrzeugs zur Verfügung, jedoch keine expliziten Sensorsignale etc.. Mit diesem Ausschnitt aus dem Teilszenenbaum des Eigenfahrzeugs ist es aber bereits möglich, durch den gesamten Szenenbaum zu 'routen', d.h. eine gesamte Homogene Transformations Matrix (HTM) zwischen zwei beliebigen Szenenknoten zu bestimmen, um beispielsweise einen Punkt der Straße in die Bildebene zu transformieren (vgl. Abb. 3.4). Die Bestimmung dieser Gesamt-HTM erfolgt durch Multiplikation aller im Pfad zwischen den ausgewählten Szenenknoten liegenden HTM's, wozu auch die HTM's relativ zu den beiden Eigenfahrzeug-Knoten Basis und Aufbau benötigt werden.

Im Hyperobjekt des Eigenfahrzeugs stehen für den Zugriff auf den Teilszenenbaum Funktionen zur Verfügung, die auf unterschiedlichen Detaillierungsniveaus Informationen des Eigenfahrzeugs anbieten. Der Nutzer muss nicht den genauen Aufbau des Eigenfahrzeug-Teilszenenbaums kennen, sondern verwendet nur die für seine Anwendung passenden Zugriffsfunktionen des Hyperobjekts. Die eigentliche Aufteilung in Teilobjekte bleibt verborgen, da die benötigten Informationen in den Funktionen des Hyperobjekts gekapselt sind. Hierdurch erfährt der Nutzer auch, welche Informationen vom Hyperknoten, in diesem Fall vom Eigenfahrzeug, bereitgestellt werden.

Gespeist werden die einzelnen Knoten des Eigenfahrzeug-Teilszenenbaums durch den Eigenfahrzeug-Experten. Dieser setzt alle Zustandsgrößen zum jeweils aktuellen Zeitpunkt, die dann im System verteilt werden.

Die Verwendung von Hyperobjekten ist nicht auf das Eigenfahrzeug begrenzt, sondern kann auch bei Fremdfahrzeugen, bei Straßen oder bei dem im Anschluss vorgestellten Fahrschlauch angewandt werden, um diese durch einzelnen Teilobjekte genauer zu beschreiben.

4.2 Der Fahrschlauch

Beim Fahrschlauch handelt es sich um ein virtuelles Objekt das nicht unmittelbar dem Eigenfahrzeug zuzurechnen ist, jedoch im Wesentlichen aus Fahrzeugdaten generiert wird. Umschließt man das Fahrzeug mit einem Quader und verfolgt die Bewegung des umhüllenden Körpers über die Zeit, so erhält man auf der Fahrwegoberfläche einen Streifen, der durch die Fahrzeughöhe zum Fahrschlauch vervollständigt wird (Abbildung 4.2). Mit dem Fahrschlauch kann aber nicht nur der bereits befahrene, sondern, was von weitaus größerer Bedeutung ist, auch der zukünftige Teil des Fahrwegs beschrieben werden, indem ausgehend vom aktuellen Fahrzeugzustand und mit einem Fahrzeugmodell die Bahn des Fahrzeugs in die Zukunft prädiziert wird. Zur Prädiktion des Fahrschlauchs werden Größen wie Fahrgeschwindigkeit, Gierrate, Lenkwinkel und, falls vorhanden, die Signale von Raddrehzahlsensoren verwendet.

Verwendung findet der Fahrschlauch u.a. in Adaptive Cruise Control (ACC) Systemen [SÄGER ET AL. 98], [BOSCH 02] oder bei der Steuerung des Frontlichts (Adaptive Front Lighting Systems (AFS) oder Adaptive Light Control (ALC)) [LABAHN & BOEHLAU 01], [DUBROVIN ET AL. 00]. In letzt genannter Anwendung wird der Fahrschlauch dazu benutzt, den zukünftig vom Fahrzeug befahrenen Bereich auszuleuchten. Dazu wird der von den Scheinwerfern erzeugte Lichtkegel entsprechend dem Fahrschlauch ausgerichtet, es wird quasi in die Kurve geleuchtet. Bei ACC-Systemen dient der Fahrschlauch für die Zuordnung, ob auf ein vorausfahrendes Fahrzeug reagiert werden muss. Dazu wird überprüft, ob sich ein erkanntes Fahrzeug innerhalb oder außerhalb des Fahrschlauchs befindet.

Speziell bei ACC-Systemen geht man davon aus, dass der Fahrschlauch mit der aktuell befahrenen Fahrspur der Straße übereinstimmt und somit eine Zuordnung von Fremdfahrzeugen relativ zum Fahrschlauch einer Zuordnung relativ zur eigenen Fahrspur gleichzusetzen ist. Dies setzt allerdings voraus, dass sich das Eigenfahrzeug (unabhängig davon, ob autonom oder von einem Fahrer gesteuert) auch in Zukunft so wie zum aktuellen Zeitpunkt verhält, z.B. dass weiterhin der Fahrspur gefolgt wird. Wird das Fahrverhalten grundlegend geändert, so sind Aussagen über den Fahrschlauch nur bedingt möglich. Besonders bei dynamischen Fahrmanövern wie dem Spurwechsel zeigen sich Defizite des Fahrschlauchs. Aber auch unter der Annahme, dass das eigene Fahrverhalten nicht gravierend geändert wird, werden Aussagen über den Fahrschlauch umso unsicherer, je weiter man vorausschaut. Dies ist durch die Tatsache bedingt, dass aus aktuellen Zustandsgrößen der in Zukunft vom Fahrzeug überfahrene Bereich prädiziert werden soll.

Um exaktere Aussagen auch in weiter Vorausschauentfernung treffen zu können, wurden einige Verfahren entwickelt, welche die Bestimmung des Fahrschlauchs robuster ermöglichen.

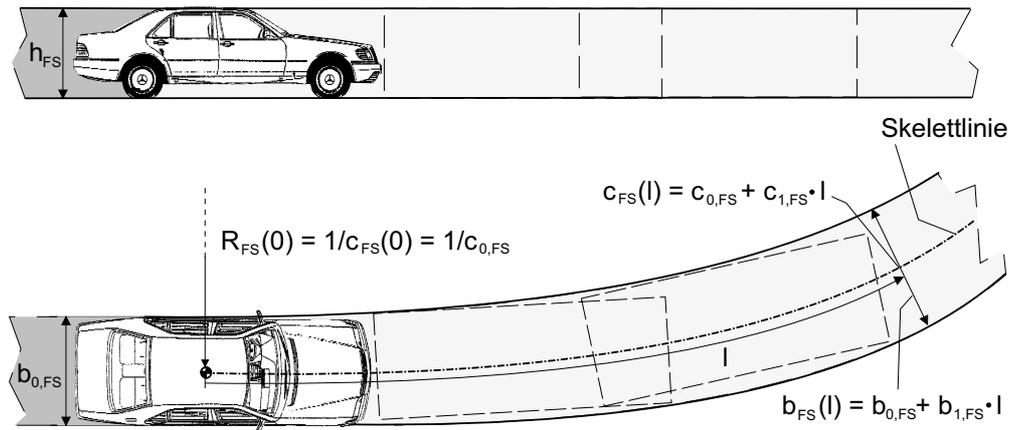


Abbildung 4.2: Fahrschlauch

ten. In [SCHRAUT 00] wird mit Hilfe von digitalen Karten und der Bestimmung der globalen Eigenposition aus GPS-Daten die globale Position eines vom ACC-System erkannten Fremdfahrzeugs errechnet. Die so bestimmte Position des Fremdfahrzeugs wird in die sehr präzise Karte übertragen und es erfolgt eine Zuordnung, ob dieses Fahrzeug innerhalb oder außerhalb der in der Karte eingezeichneten eigenen Fahrspur liegt. [HOFMANN ET AL. 01] schlagen vor, direkt die von einem visuellen Wahrnehmungsmodul erkannte eigene Fahrspur statt des Fahrschlauchs zu verwenden.

In beiden Fällen wird vorausgesetzt, dass sich zum einen das Fahrzeug auf einer Straße mit klar voneinander unterscheidbaren Fahrspuren befindet, mit deren Hilfe der Fahrschlauch stabilisiert werden kann, und dass zum anderen der Bewegungszustand des Fahrzeugs annähernd gleich bleibt, d.h. es wird einer angenommenen Solltrajektorie, beispielsweise einer von der Skelettlinie der eigenen Fahrspur abgeleiteten, gefolgt.

Alle Annahmen implizieren, dass das aktuell gezeigte Verhalten auch in Zukunft zutreffen wird. Es ist zugegebenermaßen bei einem menschlichen Fahrer außerordentlich schwierig zu entscheiden, wann dieser sein Verhalten ändert und eine neue Fahrhandlung ausführt. Bei einem autonomen Fahrzeug hingegen ist Wissen über zukünftige Fahrhandlungen verfügbar, da vom autonomen System alle Aufgaben zur Generierung von Verhalten angefangen von der Planung, über die Entscheidungsfindung bis hin zur Ausführung selbst durchgeführt werden. Dies ermöglicht die Festlegung, wie lange die aktuelle Fahrhandlung noch ausgeführt wird, d.h. wie lange die vorgegebenen Solltrajektorie noch gültig ist. Ab dem Punkt, an dem von der aktuellen auf die nächste Fahrhandlung gewechselt wird, kann mit einer an die nächste Fahrhandlung angepassten Solltrajektorie fortgefahren werden.

Wie ein Fahrschlauch für ein autonomes Fahrzeug aufgebaut sein kann und wie dieser in einen Szenenbaum gemäß Kapitel 4.1 zu integrieren ist, wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.2.1 Modell des Fahrschlauchs

Der Fahrschlauch wird, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, als ein Band mit der Höhe des Eigenfahrzeugs beschrieben. Der Verlauf des auf der Fahrgewegoberfläche liegenden Streifens gibt an, welche Bereiche vom Fahrzeug in Zukunft überfahren werden. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass sich die Fahrhandlung nicht ändert. Der Verlauf des Fahrschlauchs wird durch die Skelettlinie beschrieben. Die Skelettlinie gibt die Bahn des Fahrzeugschwerpunkts wieder und ist bezüglich eines Koordinatensystems definiert, dessen Ursprung der auf die lokale Fahrgewegoberfläche projizierte Fahrzeugschwerpunkt ist. Die x -Achse dieses Fahrschlauch-Koordinatensystems ist die Projektion des Fahrzeuggeschwindigkeitsvektors auf die Fahrgewegoberfläche. In den Fällen, in denen der Schwimmwinkel zwischen Fahrzeuginnenachse und Geschwindigkeitsvektor vernachlässigt werden kann, entspricht die x -Achse des Fahrschlauch-Koordinatensystems der Fahrzeuginnenachse. Die y -Achse des Fahrschlauch-Koordinatensystems weist nach rechts und die z -Achse gemäß [LN9300 90] nach unten. Entlang der Bahnkurve des Schwerpunkts wird ein das Fahrzeug umhüllender Quader verschoben, woraus sich der Fahrschlauch ergibt. Die Skelettlinie des Fahrschlauchs wird mit Hilfe einer Klothoide modelliert.

Eine Klothoide ist eine Kurve mit linearer Krümmungsänderung. Mit Hilfe einer Klothoide ist es möglich, den Übergang zwischen zwei Kurven mit unterschiedlichen Krümmungen, z.B. zwischen einer Geraden und einem Kreisbogen, zu beschreiben. Gerade und Kreisbogen sind zwei Spezialfälle einer Klothoide ($c_1 = 0$). Parametrisiert wird eine Klothoide durch die Krümmung c_0 und die konstante Krümmungsänderung c_1 . Die Krümmung $c(l)$ entlang der Bogenlänge l berechnet sich gemäß:

$$c(l) = c_0 + c_1 \cdot l \quad \text{mit} \quad c_0 = c(0) \quad \text{und} \quad c_1 = \frac{dc(l)}{dl} \quad (4.1)$$

Generell ist die Krümmung der Kehrwert vom Radius $c(l) = 1/r(l)$. Gemäß Abbildung 4.3 können die Ortskoordinaten (x, y) im kartesischen Klothoiden-Koordinatensystem am Ort $l = L$ durch Integration von trigonometrischen Beziehungen, welche den von der Lauflänge l abhängigen Tangentenwinkel $\chi(l)$ als Argument haben, bestimmt werden:

$$x(L) = \int_0^L \cos(\chi(l)) dl \quad (4.2)$$

$$y(L) = \int_0^L \sin(\chi(l)) dl \quad (4.3)$$

mit:

$$\chi(L) = \int_0^L c(l) dl = \left(c_0 + \frac{c_1 \cdot L}{2} \right) \cdot L \quad (4.4)$$

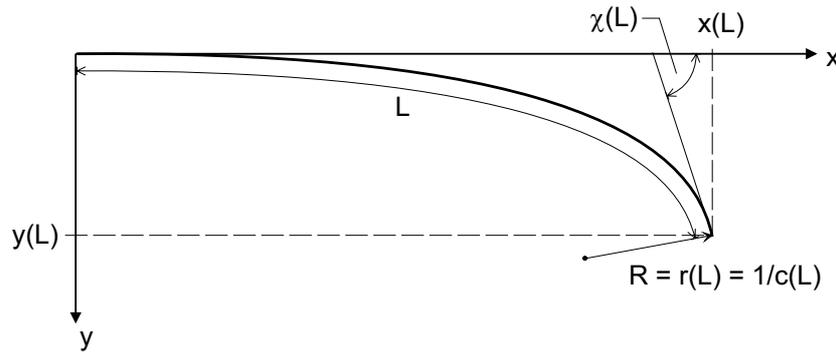


Abbildung 4.3: Klothoide

Weitere Einzelheiten zu Klothoiden finden sich in [KASPER ET AL. 68].

Neben der Krümmung $c_{FS}(l)$ des Fahrschlauchs gemäß Gleichung 4.1 sind Höhe und Breite weitere den Fahrschlauch charakterisierende Parameter. Die Höhe h_{FS} des Fahrschlauchs entspricht der Fahrzeughöhe. Die Breite b_{FS} des Fahrschlauchs kann weitestgehend mit der Fahrzeugbreite gleichgesetzt werden. Es kann jedoch in manchen Situationen günstig sein, den Fahrschlauch nach vorne hin aufweiten zu lassen, um beispielsweise bei Kurvenfahrt die durch den Fahrzeugaufbau größere überstrichene Grundfläche zu berücksichtigen. Dies wird durch eine lauffängenabhängige Breitenparametrisierung möglich. Analog zu Gl. 4.1 ergibt sich für $b_{FS}(l)$:

$$b_{FS}(l) = b_{0,FS} + b_{1,FS} \cdot l \quad (4.5)$$

$b_{0,FS}$ entspricht der Fahrzeugbreite und $b_{1,FS}$ der Breitenänderung über die Lauflänge l . Wird keine Aufweitung gewünscht, so ist $b_{1,FS}$ gleich Null zu setzen.

Durch Verwendung von Klothoiden zur Beschreibung des Fahrschlauchs wird dieser durch die Parameter $c_{0,FS}$, $c_{1,FS}$, $b_{0,FS}$, $b_{1,FS}$ und h_{FS} charakterisiert. Die Fahrschlauchparameter sind über die gesamte Lauflänge konstant. In der Praxis ist die gültige Lauflänge durch verschiedene Faktoren begrenzt.

Im Falle, dass der Fahrschlauch nur unter Verwendung von aktuellen Fahrzeugdaten bestimmt wird, ist die Vorausschauentfernung von der Güte der verwendeten Fahrzeugdaten abhängig.

Wird der Fahrschlauch auf Straßen mit markierten Fahrspuren durch Fahrspurparameter, die von einer visuellen Fahrspurwahrnehmung stammen können, gestützt, so kann die Lauflänge des Fahrschlauchs an die Vorausschauweite der visuellen Wahrnehmung angepasst werden.

Ändert sich innerhalb des vorläufigen Maximalbereichs der Lauflänge das Fahrverhalten grundlegend (z.B. Übergang vom Spurfolgen in den Spurwechsel), so ist der Fahrschlauch mit den aktuellen Parametern nur noch bis zu dem Punkt gültig, an dem mit

der Ausführung der neuen Fahrhandlung begonnen wird. Die Lauflänge wird wie die anderen Fahrschlauchparameter dynamisch den aktuellen Gegebenheiten angepasst.

Mit Informationen über einen Wechsel des Fahrverhaltens oder eine sich ändernde Fahrspur, kann nicht nur die Lauflänge des aktuellen Fahrschlauchs eingegrenzt werden, sondern es kann ein weiterer, an die neu auszuführende Fahrhandlung angepasster Fahrschlauch mit zugehörigen Parametern bestimmt und an den bestehenden Fahrschlauch angefügt werden. Es ergibt sich eine Segmentierung des gesamten Fahrschlauchs gemäß Abbildung 4.4. Statt des gesamten Fahrschlauchs wird jedem Segment ein eigenes Koordinatensystem zugeordnet. Das Koordinatensystem des ersten Segments ist die Basis aller weiteren Fahrschlauchsegmente. Im Fall, dass keine gravierende Änderung des Fahrverhaltens zu erwarten ist, besteht der Fahrschlauch nur aus dem ersten Segment mit den zugehörigen Parametern.

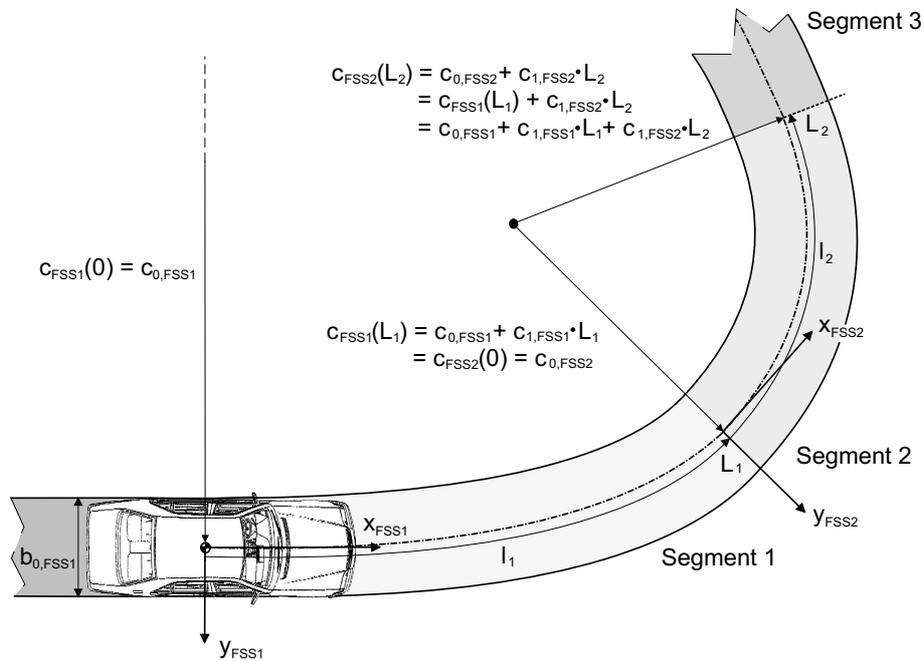


Abbildung 4.4: Fahrschlauchsegmente

Die Zahl der Segmente wird dynamisch an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst, wobei darauf zu achten ist, dass die Krümmung an den Übergangsstellen stetig verläuft. Voraussetzung für eine Segmentzahl größer als eins ist, dass das zukünftige Fahrverhalten bekannt ist.

Diese Forderungen sind bei einem autonomen Fahrzeug erfüllt. Der Fahrschlauch kann herangezogen werden, den zu befahrenden Fahrweg auf Hindernisfreiheit zu überprüfen, unabhängig davon, in welcher Domäne (Autobahn oder freies Gelände) das Fahrzeug unterwegs ist. Mit dem Fahrschlauch steht somit eine flexible Beschreibungsform des zu befahrenden Fahrwegs zur Verfügung.

4.2.2 Repräsentation des Fahrschlauchs im Szenenbaum

Da die vom Fahrschlauch zur Verfügung gestellten Informationen mit Zustandsdaten der Straße oder ähnlichen gleichzusetzen sind, ist der Fahrschlauch in den Szenenbaum zu integrieren. Es ist naheliegend, den Fahrschlauch im Szenenbaum gemäß Abbildung 4.1 an den Basis-Knoten des Eigenfahrzeugs zu hängen, da sich das mit diesem Knoten verbundene Koordinatensystem nur um den Schwimmwinkel vom Koordinatensystem des ersten Fahrschlauchsegments unterscheidet. Es ergibt sich der in Abbildung 4.5 dargestellte Szenenbaum, der um den Fahrschlauch erweitert ist.

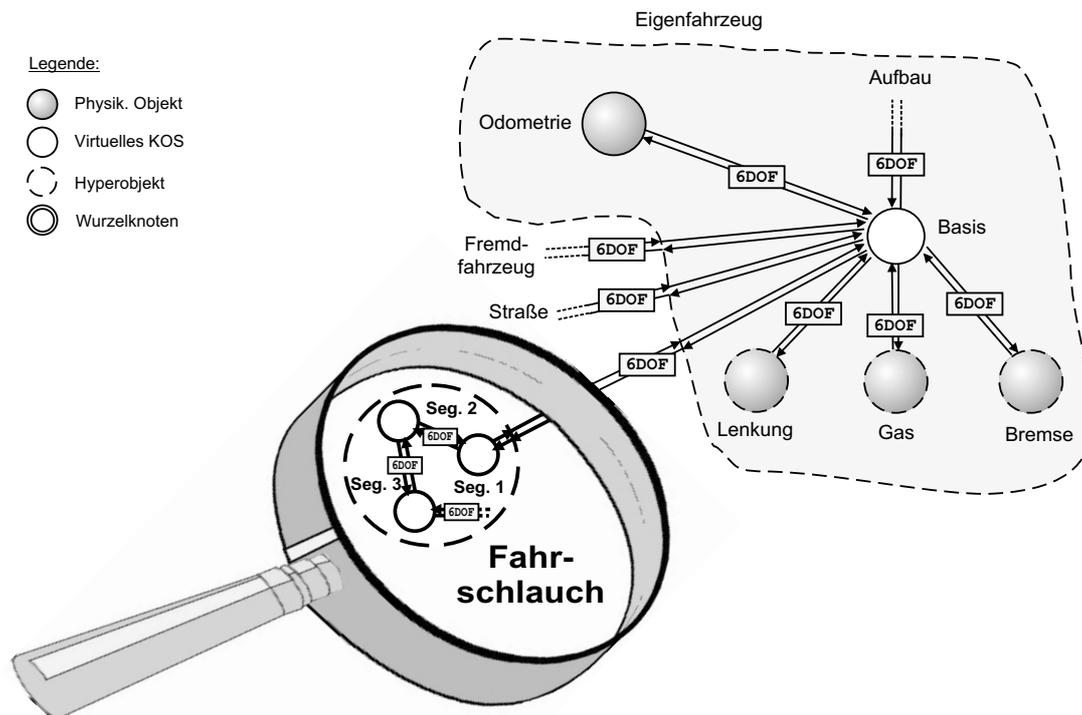


Abbildung 4.5: Szenenbaum mit Fahrschlauch

Da es sich beim Fahrschlauch zum einen um ein virtuelles Objekt handelt und da er zum anderen aus den Fahrschlauchsegmenten besteht, die von ihm zu einem Objekt zusammengefasst werden, wird der Fahrschlauch als virtuelles Hyperobjekt an die Eigenfahrzeug-Basis gehängt. Wie in Abbildung 4.5 zu sehen, ist der Fahrschlauch mit seinen Segmenten kein Teil des Eigenfahrzeugs. Dadurch dass der Fahrschlauch bezüglich der Eigenfahrzeug-Basis eingehängt ist, existiert der Fahrschlauch auch nur dann, wenn auch ein Eigenfahrzeug im Szenenbaum vorhanden ist. Von den sechs möglichen Freiheitsgraden zwischen Eigenfahrzeug-Basis und Fahrschlauch ist nur der die Drehung um die z -Achse beschreibende Winkel besetzt, der dem Fahrzeug-Schwimmwinkel entspricht.

Im Detailausschnitt der Abbildung 4.5 ist zu sehen, wie sich das Hyperobjekt Fahrschlauch aus verschiedenen Teilobjekten, den Fahrschlauchsegmenten, zusammensetzt. Die Objektknoten der Segmente werden in einer Reihe aneinandergelagert, wobei von den sechs möglichen Relativlagen zueinander unter der Annahme, dass alle Segmente in einer Ebene liegen, nur drei besetzt sind. Die Lage eines Segments bezüglich seines Vorgänger-Segments berechnet sich gemäß der Formeln 4.2 bis 4.4 mit den Parametern des vorangehenden Segments. Durch die Bewegung des Eigenfahrzeugs ändern sich die Relativlagen der einzelnen Segmente zueinander und müssen daher ständig neu berechnet werden. Zur Beschreibung der Form eines jeden einzelnen Fahrschlauchsegments sind noch die Höhe h_{FSSi} und die Breite $b_{FSSi}(l)$ nötig.

Durch die Beschreibung des Fahrschlauchs als Hyperknoten im Szenenbaum stellt sich dieser mit all seinen Segmenten dem Nutzer als ein Objekt dar. Dem Nutzer bleibt verborgen, ob der aktuelle Fahrschlauch aus einem oder mehreren Segmenten besteht. Über den Fahrschlauch-Hyperknoten sind aber alle Parameter des Fahrschlauchs verfügbar. Außerdem können in diesem Hyperknoten Funktionen angelagert werden, wie beispielsweise die Überprüfung, ob sich ein Punkt im Fahrschlauch befindet oder nicht. So muss nicht jeder Nutzer, der diese Information benötigt, die Berechnung selbst durchführen.

Auch der Fahrschlauch mit seinen Segmenten lässt sich einfach in den Szenenbaum integrieren, wodurch eine sehr detaillierte Repräsentation des Eigenfahrzeugs entsprechend Abschnitt 4.1 um ein nicht unmittelbar dem Eigenfahrzeug zugehöriges aber dennoch von Fahrzeugdaten getriebenes virtuelles Hyperobjekt ergänzt wird.

Kapitel 5

Inertiale/visuelle Eigenzustandsschätzung

Die Wahrnehmung der Umwelt ist eine Grundvoraussetzung für einen autonomen Agenten, damit sich dieser selbstständig fortbewegen kann. Die interne Repräsentation der physikalischen Welt, in der sich der autonome Agent bewegt, ist elementar und kann mit Hilfe des in Abschnitt 3.5 vorgestellten Szenenbaums erfolgen.

Handelt es sich bei einem autonomen Agenten um ein Kraftfahrzeug, so besteht die Aufgabe der Umweltwahrnehmung darin, den Fahrweg (Straßen von Autobahnen bis zu Feldwegen, Fahrspuren, ...), andere Vehrkehrsteilnehmer (Fahrzeuge, Radfahrer, Fußgänger, ...), alle übrigen bewegte Objekte (Tiere, bewegte Hindernisse, ...), stationäre Objekte (positive und negative Hindernisse, Verkehrsschilder, Landmarken, ...) und die Umweltbedingungen (Witterung, Untergrundbeschaffenheit, ...) wahrzunehmen. Zu diesen Themen gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen¹.

Aber nicht nur Wissen über die Umwelt sondern auch Informationen über interne Größen des Eigenfahrzeugs sind für die Fortbewegung eines autonomen Kraftfahrzeugs notwendig. Wie in Kapitel 4 dargestellt, lässt sich mit Hilfe des Szenenbaums eine detaillierte, physikalische Darstellung des Eigenfahrzeugs aufbauen. Erst wenn eigenfahrzeugtypische Zustandsgrößen wie der Schwimmwinkel erfasst und repräsentiert werden, kann adäquat beispielsweise auf (sich abzeichnende) instabile fahrdynamische Zustände reagiert werden. Ebenso sind die eigenen Zustandsgrößen Grundlage für jedwede Entscheidung, die vom autonomen Agenten zu treffen ist.

Wie beim Menschen so basiert auch bei autonomen technischen Systemen die Bestimmung systemdynamischer Zustandsgrößen primär auf speziellen Sensoren. Beim Menschen sind dies die Rezeptoren des Gleichgewichtsorgans (Vestibularsystem) im Innenohr. Das Vestibularsystem, dessen Funktionsweise seit etwa 1875 bekannt ist [MACH 01], besteht aus

¹Eine Auswahl an Arbeiten zum Thema 'Umfeldwahrnehmung', die am ISF durchgeführt wurden: [WÜNSCHE 87], [MYSLIWETZ 90], [SCHICK 92], [KINZEL 94], [BEHRINGER 96], [THOMANEK 96], [RIEDER 00], [LÜTZELER 02], [HOFMANN]

Linearbeschleunigungssensoren, den Otolithen, und Winkelgeschwindigkeitssensoren, den Bogengängen, die zusammen ein 'strap-down' Inertialmesssystem bilden. Mit Hilfe dieser Inertialsensoren können sämtliche Bewegungen in allen sechs möglichen Freiheitsgraden erfasst werden.

Neben den Inertialsensoren im Innenohr verwendet der Mensch andere sensorische Eingänge wie den visuellen Kanal, um die vom Vestibularsystem gelieferten Lageinformationen zu stützen. Es können dadurch so unterschiedliche Aufgaben wie die Stabilisierung der Blickrichtung, die Haltungskontrolle oder die Orientierung im Raum bewältigt werden.

Die dem menschlichen Vestibularsystem nachempfundenen technischen Inertialsysteme sind für spezielle Aufgaben z.B. im Bereich der Navigation ausgelegt. Diese Inertialsensoren haben ihren Ursprung Anfang des 20. Jahrhunderts. Der die Nordrichtung anzeigende Kreiselkompass auf einer frei gelagerten Plattform kann wohl als der Beginn von inertialen Navigationssystemen betrachtet werden. Eines der ersten einsatzfähige Instrument wurde 1913 von Hermann Anschütz mit Unterstützung durch Max Schuler und Albert Einstein entwickelt und auf dem Schiff 'Imperator' installiert und getestet [ENGMANN 00].

Das Konzept der inertialen Plattformsysteme wurde stetig weiterentwickelt und mündete in komplexen Trägheitsnavigationsplattformen, bei denen orthogonal zueinander angeordnete Beschleunigungssensoren auf einer stabilisierten, kardanisch gelagerten Plattform angebracht sind. Die Plattform wird ständig automatisch auf die örtliche Vertikale ausgerichtet, d.h. sie behält ihre Lage in Richtung des lokalen Erdschwerevektors bei. Die Auslenkung der Inertialplattform wird mittels Winkelgeschwindigkeitssensoren bestimmt, deren Signale Elektromotoren zur Ausrichtung und Stabilisierung der Plattform dienen. Durch die stabilisierte Plattform erhält man eine inertielle Referenz, bezüglich derer die Lage und Orientierung bestimmen werden kann. Durch Aufintegrieren der Signale der Beschleunigungssensoren können die horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten und in einer zweiten Integrationsstufe die aktuelle Position ausgehend von einer bekannten Anfangsposition berechnet werden. Diese Systeme wurden in erster Linie für Anwendungen im Bereich der Schiff- sowie der Luft- und Raumfahrt entwickelt, wo sie für Navigations- und Stabilisierungsaufgaben eingesetzt werden. Bei plattformgestützten Inertialsystemen handelt es sich um hochkomplexe elektromechanische Instrumente, die sehr aufwendig in der Handhabung sind.

Seit den sechziger Jahren sind mit zunehmender Rechenleistung bei Mikrocomputern auch technische 'strap-down' Inertialsysteme verfügbar. Bei diesen Systemen sind ähnlich wie beim Menschen die Sensoren fest mit dem bewegten Körper verbunden. Die Bestimmung der Lage und Position ist bei diesen Systemen allerdings mit erhöhtem Rechenaufwand verbunden, da die Sensorsignale umfangreichen Transformationsoperationen unterzogen werden müssen. Im Zuge des Fortschritts im Bereich der Mikroelektronik ist dies aber kein begrenzender Faktor mehr.

Aufgrund der Einfachheit des mechanischen Aufbaus von 'strap-down' Inertialsystemen sind diese mittlerweile für viele Anwendungen attraktiv geworden. Sie werden nicht mehr

vordringlich im Rahmen von Navigationsanwendungen zur Ermittlung der aktuellen Position sondern auch für die Bestimmung der lokalen Lage und Orientierung im Raum eingesetzt, wie etwa bei mobilen Robotern (Gehmaschinen, Krabblern etc.) oder anderen (semi-)autonomen Fahrzeugen. Aber auch im klassischen Maschinenbau oder in der Automobilindustrie [VON HINÜBER & JANOCHA 95] haben inertielle 'strap-down' Messsysteme Einzug gehalten.

Technische Inertialsysteme besitzen trotz ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten einen entscheidenden Nachteil. Aufgrund der physikalischen Effekte, welche den Inertialsensoren zu Grunde liegen, weisen diese ein ausgeprägtes Driftverhalten auf. Mit großem technischen Aufwand (Temperaturkompensation, Minimierung von Reibung, ...) wird versucht, das Driften zu minimieren, was allerdings die Kosten in die Höhe treibt. Ein anderer Ansatz, das Driften zu kompensieren, ist bei Vorhandensein eines visuellen Sensors die im folgenden Abschnitt beschriebene Fusion inertialer und visueller Größen.

5.1 Konzept zur inertialen/visuellen Eigenzustandsschätzung

Inertielle Sensorsysteme, welche von der Wirkung her dem menschlichen Gleichgewichtsorgan nachempfunden sind, eignen sich in Kombination mit an die jeweilige Applikation angepassten Dynamikmodellen zur Bestimmung systemtypischer Zustandsgrößen. Signale von Inertialsensoren, welche neben den erwarteten Nutzsignalsanteilen auch stochastische Störungen enthalten, stehen nahezu verzugsfrei und mit hoher Verfügbarkeit bereit. Wegen der bereits angesprochenen Neigung zur Drift bei ungestützter Integration von Inertialdaten ist allerdings eine niederfrequente Stabilisierung notwendig.

Ähnlich wie beim Menschen kann diese Stabilisierung über den visuellen Kanal erfolgen. Neben dem Gleichgewichtssinn kann der Mensch seine Lage im Raum auch über den Gesichtssinn bestimmen. Hierzu ist Hintergrundwissen notwendig, damit die eigene Lage oder Orientierung anhand von bekannten Merkmalen wie senkrechten Gebäudelinien oder dem Horizont bestimmt werden kann. Derartige visuelle Informationen stehen zwar nicht ständig, im (quasi-)stationären Fall dafür aber in ausreichender Güte zur Verfügung.

Dieser Ansatz, visuelle und inertielle Informationen zu fusionieren, wurde bereits von [SCHELL 92] und [WERNER 97] verfolgt, um im Bereich der Luftfahrt automatisches Fliegen zu realisieren. Bei autonomen Landfahrzeugen werden Inertialsensoren hauptsächlich in Trägheitsnavigationssystemen eingesetzt, um z.B. den kurzzeitigen Ausfall von GPS-Daten bei der Positionsbestimmung überbrücken zu können [FLETCHER ET AL. 01], [XIANG & LOOK 02], wobei es sich hier um hochwertige und somit teure Messgeräte handelt. Für die Bestimmung der Orientierung eines Landfahrzeugs bezüglich der Achsen eines örtlich orientierten Bezugssystems sind die für die inertielle Trägheitsnavigation optimierten Inertialsensoren meistens zu teuer. Billigere Sensoren weisen aber in der Regel schlechteres Driftverhalten auf und werden deshalb kaum eingesetzt.

Die Lage und Orientierung eines Fahrzeugs bezüglich eines örtlich begrenzten, lokalen Bezugssystems wird deshalb oft mit Hilfe anderer Sensoren bestimmt. [BEHRINGER 96] und [THOMANEK 96] nutzen den visuellen Kanal in Verbindungen mit einem dynamischen Schwingungsmodell, welches z.B. auf einem System zweiter Ordnung beruht, um den Nickwinkel zwischen Fahrbahn und der Längsachse eines Kraftfahrzeugs zu bestimmen. Einen ähnlichen Weg beschreiten [YAO & CHELLAPPA 95], die jedoch ein detailliertes Vertikaldynamik-Modell eines Kraftfahrzeugs verwenden.

Da demnach auch bei einem technischen System wie etwa einem Kraftfahrzeug die Lage und Orientierung sowohl mittels Inertialsensoren als auch auf visuellem Wege ermittelt werden kann, wird das vom Menschen her bekannte Prinzip aufgegriffen, inertielle mit visuellen Informationen zu fusionieren. Es resultiert eine verbesserte Lage- und Positionsbestimmung, da die Vorteile der jeweiligen Methoden eines Wahrnehmungszweiges genutzt werden. In Abbildung 5.1 ist schematisch dargestellt, aus welchen Komponenten der inertielle bzw. der visuelle Zweig bestehen und wie diese letztendlich fusioniert werden.

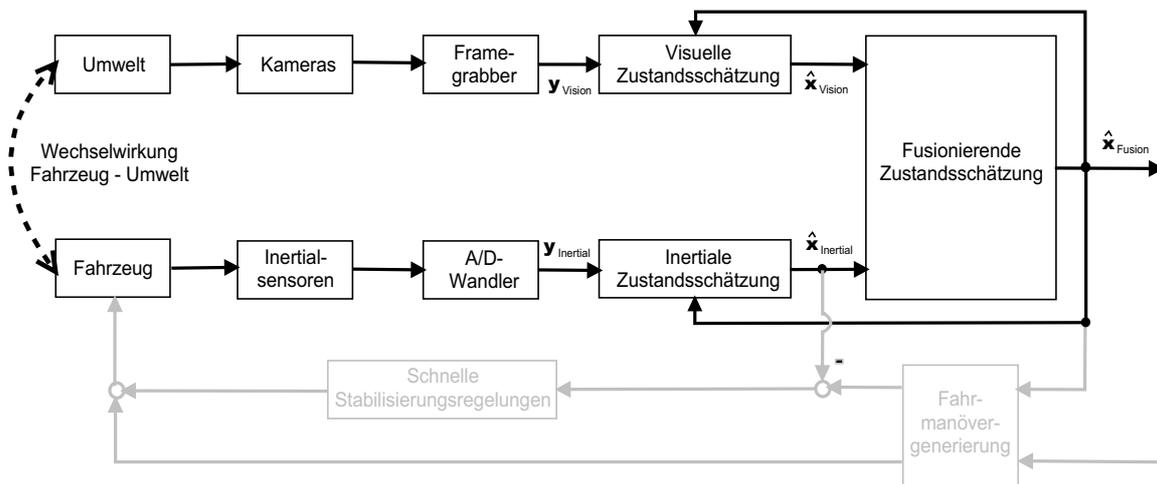


Abbildung 5.1: Prinzip der inertialen/visuellen Zustandsschätzung

Die beiden in Abbildung 5.1 dargestellten Zweige haben grundlegend unterschiedliche Charakteristiken, erfüllen aber beide den gleichen Zweck, nämlich die Lage und Orientierung im Raum und speziell in diesem Fall die Lage und Orientierung eines Kraftfahrzeugs zu ermitteln. Verknüpft werden die Daten der beiden Kanäle mittels einer Datenfusion, durch die es möglich ist, die Vorzüge der unterschiedlichen Verfahren miteinander zu kombinieren.

Beim inertialen Kanal mit seinen typischen Sensoren (Beschleunigungs- bzw. Winkelratensensoren) stehen Messwerte nahezu ständig und verzögerungsfrei zur Verfügung und können deshalb für eine schnelle inertielle Zustandsschätzung herangezogen werden. Die sich aus dieser Zustandsschätzung ergebenden Zustandsgrößen $\hat{\mathbf{x}}_{Inertial}$ werden

u.a. als Rückkoppelgrößen für Stabilisierungsregelkreise verwendet, so wie es im unteren Teil der Abbildung 5.1 angedeutet ist. Allerdings unterliegen die von der inertialen Zustandsschätzung gelieferten Größen einer gewissen Drift. Diese gilt es zu kompensieren. Hierzu wird parallel zum inertialen Kanal ein visueller Zweig angelegt, mit Hilfe dessen ebenfalls interessierende Zustandsgrößen bestimmt werden, die im Vektor $\hat{\mathbf{x}}_{Vision}$ zusammengefasst sind. Ausgehend von bekannten optischen Merkmalen wie beispielsweise senkrechten oder horizontalen Objektkanten werden die jeweiligen Zustandsgrößen visuell ermittelt. Im Gegensatz zum inertialen Kanal sind die Zustandsgrößen des visuellen Kanals zum einen nicht ständig berechenbar, da die benötigten Merkmale nicht immer vorhanden sind. Zum anderen ist die Dynamik der visuellen Zustandsschätzung nicht so hoch wie die der inertialen, so dass nur Änderungen der Zustandsgrößen bis etwa $2,5Hz$ genügend genau bestimmt werden können.

Wie die inertial geschätzten Zustandsgrößen $\hat{\mathbf{x}}_{Inertial}$ werden auch die visuell geschätzten $\hat{\mathbf{x}}_{Vision}$ der Datenfusion zugeführt. Die Größen des inertialen und visuellen Kanals dienen dabei der fusionierenden Zustandsschätzung als Eingangsgrößen. Somit werden die Vorteile der inertialen Schätzung, nämlich die hohe Verfügbarkeit und Dynamik, mit den Vorzügen (hohe Genauigkeit im (quasi-)stationären Fall) des visuellen Kanals vereint. Die sich aus der Datenfusion ergebenden fusionierten Zustandsgrößen $\hat{\mathbf{x}}_{Fusion}$ werden der inertialen als auch der visuellen Zustandsschätzung für Korrekturzwecke zur Verfügung gestellt. Außerdem können die fusionierten Zustandsgrößen zum Aufbau einer systeminternen Informationsrepräsentation beispielsweise in Form eines Szenenbaums gemäß Abschnitt 4.1 dienen. Sie stehen somit anderen Anwendungen wie etwa der in Abbildung 5.1 angedeutete Fahrmanövergenerierung zur Verfügung.

Sowohl innerhalb der einzelnen Wahrnehmungskanäle als auch im Rahmen der Datenfusion wird jeweils für die Zustandsschätzung das Kalman-Filter verwendet.

5.2 Multisensorielle Zustandsschätzung mittels Kalman-Filter

Für die Beobachtung der nicht immer direkt zugänglichen Zustandsgrößen $\mathbf{x}(t)$ eines dynamischen Systems dient der Kalman-Filteralgorithmus [KALMAN 60]. Es handelt sich dabei um eine rekursive Methode, die unter Berücksichtigung von System- und Messmodellen sowie stochastischer Störprozesse, anhand der bekannten Eingangsgrößen $\mathbf{u}(t)$ und den gemessenen Ausgangsgrößen, die zum Messvektor $\mathbf{y}(t)$ zusammengefasst sind, eine optimale Schätzung $\hat{\mathbf{x}}(t)$ des Systemzustands durchführt. Voraussetzung für die Nutzung des Kalman-Filters ist die Existenz eines System- und Messmodells, welche das dynamische System beschreiben, und die Kenntnis über statistische Eigenschaften der Störgrößen des Systems $\nu_Q(t)$ und der Messung $\nu_R(t)$. Da jedoch System- und Messmodell häufig nur in nichtlineare Form gemäß der Gleichungen 5.1 und 5.2 vorliegen, wird das erweiterte Kalman-Filter (vgl. [GELB 74] oder [MAYBECK 82]) verwendet.

$$\text{Systemgleichung: } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) + \boldsymbol{\nu}_Q(t) \quad (5.1)$$

$$\text{Messgleichung: } \mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t)) + \boldsymbol{\nu}_R(t) \quad (5.2)$$

Weitere Optimierungen des (erweiterten) Kalman-Filters ergeben sich durch die Einführung der $\mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{U}^T$ -Zerlegung der Schätzfehlerkovarianzmatrix (siehe [BIERMAN 77]) und der sequentiellen Messwertverarbeitung (vgl. [GELB 74]).

Derart optimierte Kalman-Filter Algorithmen wurden von [WÜNSCHE 87] und [MYSLIWETZ 90] zur visuellen Zustandsschätzung verwendet. [WERNER 97] nutzte solche Algorithmen zur inertialen Zustandsschätzung.

Da Messgrößen in einem verteilten Rechnersystem nicht immer zeitsynchron zur Verfügung stehen, wird in [RIEDER 00] als auch in [KAILATH ET AL. 00] eine Vorgehensweise vorgeschlagen, bei der unter Nutzung des Systemmodells die Behandlung verspätet eintreffender Messdaten möglich ist. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass alle Messungen unmittelbar bei Eintreffen zur Innovation herangezogen werden, wodurch zu jedem Zeitpunkt stets das bestmögliche Wissen über den Zustandsvektor zur Verfügung steht. Diese Form der Messwerteinspeisung ist außerdem robust in Bezug auf fehlende Messinformationen einzelner Sensoren.

5.3 Dynamische Teilsysteme eines Kraftfahrzeugs

Neben dem im vorherigen Abschnitt dargestellten Kalman-Filter sind zur inertialen, visuellen und fusionierenden Zustandsschätzung, wie sie in Abbildung 5.1 dargestellt sind, auch entsprechend detaillierte Systemmodelle nötig. Da es sich bei den zu untersuchenden Systemen um Kraftfahrzeuge handelt, deren dynamische Zustandsgrößen ermittelt werden sollen, werden Modelle benötigt, welche die Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen beschreiben. Dazu werden entweder mittels einer theoretischen Herleitung oder durch eine experimentelle Systemanalyse (Identifikation) Modelle unterschiedlicher Detaillierungstiefe entwickelt.

Da Fahrzeugdynamik-Modelle nahezu in jedem Bereich der Kraftfahrzeugtechnik benötigt werden, richtet sich schon seit langer Zeit entsprechendes Interesse auf die Modellierung von Kraftfahrzeugen [RIEKERT & SCHUNK 40], [MITSCHKE 68], was letztendlich zu einer großen Auswahl an Fachliteratur [AMMON 97], [RILL 94] und [ZOMOTOR 91] mit den Standardwerken [MITSCHKE 82], [MITSCHKE 90] und [MITSCHKE 97] führte.

Die Dynamik von Kraftfahrzeugen, läßt sich in drei Bereiche (Längs-, Quer- und Vertikaldynamik) unterteilen. Hubbewegungen von Aufbau und Rädern, sowie das Wanken und das Nicken werden zur Vertikaldynamik zusammengefasst. Das Pendant zur Vertikaldynamik, die Horizontaldynamik, wird ihrerseits in zwei Bereiche, die Längsdynamik, welche

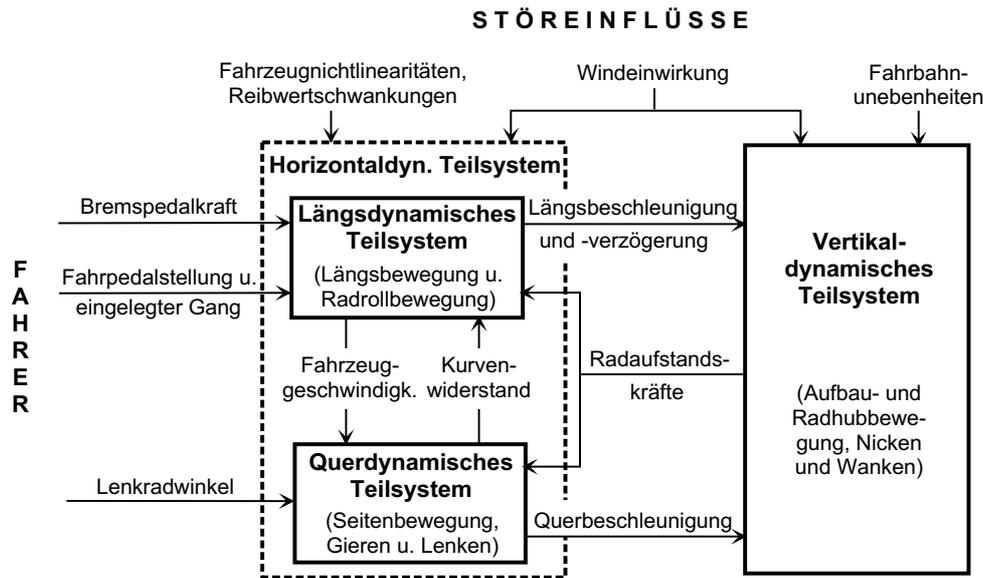


Abbildung 5.2: Blockstruktur der Kraftfahrzeugdynamik (nach [ROPPENECKER 94])

die Fahrzeuglängsbewegung sowie die Radrollbewegungen umschreibt, und die Querdynamik, welche für die Seitenbewegung, das Gieren und die Lenkbewegung der Räder steht, aufgeteilt (siehe Abbildung 5.2 und [ROPPENECKER 94]).

Je nach Detaillierungsgrad sind die drei Teilsysteme der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik mehr oder weniger miteinander verkoppelt (vgl. Abbildung 5.2). Jeder Autofahrer weiß aus Erfahrung, „dass die Reaktion auf Lenkbewegungen bei hoher Geschwindigkeit heftiger ausfällt als bei geringer Geschwindigkeit, also die querdynamische Fahrzeugbewegung offenbar über die Geschwindigkeit von der längsdynamischen Bewegung beeinflusst wird. In umgekehrter Richtung wirken die Längskomponenten der Reifenseitenkräfte, die erfahrungsgemäß dafür sorgen, dass das Fahrzeug in der Kurve langsamer wird; sie werden in ihrer Summe als Kurvenwiderstand bezeichnet. Auch ist ohne Schwierigkeit zu beobachten, dass ein Fahrzeug beim Beschleunigen oder Bremsen eine Nickbewegung und beim Einbiegen in eine Kurve - also beim Auftreten einer Querbeschleunigung - eine Wankbewegung vollführt. Demzufolge wirken die horizontaldynamischen Teilsysteme über ihre Beschleunigungen auf die Vertikaldynamik, die ihrerseits über die mit der Aufbaubewegung geänderten Radaufstandskräfte - und damit entsprechend geänderten Längs- und Seitenkräften an den Reifen - zurückwirkt.“ [ROPPENECKER 94].

Abweichend von der in der Straßenfahrzeugnorm [ISO8855 94] vorgeschlagenen Orientierung der zur Beschreibung des Fahrverhaltens zu verwendenden Koordinatensysteme werden diese hier entsprechend der Luftfahrtnorm [LN9300 90] ausgerichtet. Der grundlegende Unterschied liegt darin, dass die z -Achse der Koordinatensysteme gemäß der Luftfahrtnorm nach unten gerichtet ist, wohingegen die z -Achse in der Fahrzeugnorm nach oben orientiert ist, was bei gleichbleibender Ausrichtung der x -Achse eine Umorientierung der y -Achse zur Folge hat. Dadurch ergeben sich auch Auswirkungen auf die Orientierung

der Winkel, die Drehrichtungen usw.. In [SIEDERSBERGER 01] werden die an die Luftfahrt-norm angepassten Koordinatensysteme ausführlich diskutiert, wobei die Bezeichnungen nach [ISO8855 94] weitgehend beibehalten werden.

5.4 Realisierung der inertialen/visuellen Zustandsschätzung am Beispiel der Nickdynamik

In den vorherigen Abschnitten wurden ein Konzept zur inertialen/visuellen Eigenzustandsschätzung erarbeitet sowie einige ebenso notwendige wie grundlegende Verfahren und Methoden vorgestellt. Anhand der Implementierung einer Nickdynamikschätzung, die im Rahmen der Entwicklung von EMS-Vision vorgenommen wurde, soll exemplarisch gezeigt werden, wie eine inertielle/visuelle Eigenzustandsschätzung realisiert werden kann.

Neben dem bekannten Unterschied zwischen inertialer und visueller Zustandsschätzung (vgl. Abbildung 5.1) hinsichtlich der Verfügbarkeit der Messwerte, ist ein weiterer wesentlicher Unterschied die Zeitdauer, die für die Signalverarbeitung und Zustandsschätzung benötigt wird. Diese plus weitere charakteristische Unterschiede zwischen inertialem und visuellem Kanal werden im Folgenden dargestellt. Außerdem wird auf die Besonderheiten der fusionierenden Zustandsschätzung eingegangen und gezeigt, welche Rückwirkungen sich für den inertialen bzw. visuellen Kanal aus den Ergebnisse der fusionierenden Zustandsschätzung ergeben.

5.4.1 Problematik der Nickdynamikschätzung bei Landfahrzeugen

Die Schätzung der Nickdynamik bei Landfahrzeug gestaltet sich schwieriger als es in Luftfahrtanwendungen, wie sie in [SCHELL 92] oder [WERNER 97] beschrieben sind, der Fall ist. Zur Verdeutlichung dieser Problematik dient Abbildung 5.3.

Der inertielle Nickwinkel θ der Fahrzeuglängsachse bezüglich einer geodätischen Grundebene besteht im Gegensatz zu Luftfahrtanwendungen bei Landfahrzeugen aus zwei Komponenten. Ein niederfrequenter Anteil γ beschreibt die Steigung bzw. das Gefälle der Straße. Der wesentlich höherfrequente Nickwinkel θ_{Fzg} repräsentiert, wie das Fahrzeug und hier im Speziellen die Fahrzeugkarosserie gegebenüber der Straßenoberfläche nickt.

Im Grunde genommen besteht der Fahrzeugnickwinkel θ_{Fzg} nochmals aus zwei Anteilen. Einer hochfrequenten Komponente, die sich aus Nickbewegungen aufgrund von Fahrbahnebenheiten oder Bremsen bzw. Beschleunigen ergibt. Der niederfrequente Anteil des Fahrzeugnickwinkels θ_{Fzg} resultiert daraus, dass sich während der Fahrt die Masse des Fahrzeugs ändern kann, z.B. wegen des Benzinverbrauchs oder einer Verschiebung der Ladung. Es ändert sich somit die Lage der Karosserie gegenüber der Straßenoberfläche, was aber hier wegen des geringen Effekts vernachlässigt werden kann.

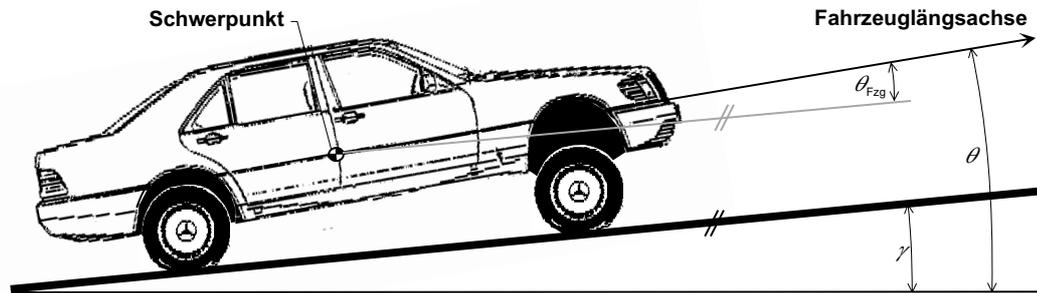


Abbildung 5.3: Nickwinkelproblematik bei Landfahrzeugen

Die Bestimmung des Fahrzeugnickenwinkels θ_{Fzg} , der sich aufgrund von Beschleunigungs- bzw. Bremsnicken ergibt oder von Bodenunebenheiten herrührt, ist Gegenstand der folgenden Betrachtungen.

5.4.2 Inertiale Nickdynamikschätzung

Die Ermittlung des inertialen Nickwinkels θ und dessen Komponenten γ bzw. $\theta_{Fzg,Inertial}$ ² geht einher mit der Bestimmung weiterer inertialer Größen und wird daher gemeinsam betrachtet. Auf die Nickdynamik betreffende Besonderheiten wird gesondert hingewiesen.

Da die inertielle Zustandsschätzung, wie in Abbildung 5.1 angedeutet ist, u.a. Rückkoppelgrößen für schnelle Stabilisierungsregelkreise beispielsweise im Rahmen der Fahrzeugregelung liefert, ist es sinnvoll, die inertielle Zustandsschätzung mit der gleichen Zykluszeit wie die Regelungen zu betreiben. Werte von nicht mehr als $10ms$ haben sich als ein akzeptabler Kompromiss erwiesen.

Derart kleine Zykluszeiten können aber im Rahmen von Echtzeitanwendungen auf konventionellen PC's nur mit zusätzlichem Aufwand erreicht werden. Aufgrund dessen empfiehlt es sich, die inertielle Zustandsschätzung ebenfalls auf ein schnelles, eingebettetes Rechnersystem, welches auch für Regelungszwecke genutzt werden kann, auszulagern (vgl. 'Fahrzeug-Subsystem' in Abb. 3.1).

Zur Beschreibung der Dynamik eines Fahrzeugs bezüglich eines inertialen Bezugssystems, z.B. eines geodätischen Koordinatensystems, sind keine detaillierten Modelle notwendig. Es wird deshalb auf das in [WERNER 97] vorgestellte GLOBAL-Modell zurückgegriffen, das sich bereits im Rahmen von HIL-Simulationen (Hardware-In-the-Loop) nicht nur für

²Zur besseren Unterscheidung wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Fahrzeugnickenwinkel mit $\theta_{Fzg,Inertial}$ bezeichnet, wenn er ausschließlich aufgrund der Signale von Inertialsensoren bestimmt wurde. $\theta_{Fzg,Vision}$ bezeichnet den auf visuellem Wege ermittelten Fahrzeugnickenwinkel und $\theta_{Fzg,Fusion}$ steht für den fusionierten Fahrzeugnickenwinkel.

Luftfahrtanwendungen bewährt hat. Beim GLOBAL-Modell handelt es sich um die verallgemeinerte Darstellung der Dynamik eines starren Körpers, welche die Bewegungen des Körpers in sechs Freiheitsgraden bezüglich eines am Erdschwerevektor ausgerichteten Bezugssystems beschreibt. Übertragen auf die Kraftfahrzeuganwendung bedeutet dies, dass das Fahrzeug, im Speziellen aber der Fahrzeugaufbau als Starrkörper modelliert und dessen Orientierung bezüglich eines mitgeführten geodätischen Koordinatensystems bestimmt wird.

Die Systemgleichungen lauten gemäß [WERNER 97]:

$$\begin{aligned}
 \dot{a}_x &= 0 \\
 \dot{v}_x &= a_x \\
 \dot{a}_y &= 0 \\
 \dot{v}_y &= a_y \\
 \dot{a}_z &= 0 \\
 \dot{v}_z &= a_z \\
 \dot{\omega}_x &= 0 \\
 \dot{\omega}_y &= 0 \\
 \dot{\omega}_z &= 0 \\
 \dot{\phi} &= \omega_x + \omega_y \cdot \tan\theta \cdot \sin\phi + \omega_z \cdot \tan\theta \cdot \cos\phi \\
 \dot{\theta} &= \omega_y \cdot \cos\phi - \omega_z \cdot \sin\phi \\
 \dot{\psi} &= \frac{\omega_z \cdot \cos\phi + \omega_y \cdot \sin\phi}{\cos\theta}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Die Bedeutung der einzelnen Variablen kann der folgenden Tabelle 5.1 entnommen werden.

Tabelle 5.1: Variablen zur Beschreibung des Zustands eines starren Körpers

Formelzeichen	Physikalische Bedeutung	Einheit
a_x	Beschleunigung bezüglich der aufbaufesten x -Achse	$\frac{m}{s^2}$
v_x	Geschwindigkeit bezüglich der aufbaufesten x -Achse	$\frac{m}{s}$
a_y	Beschleunigung bezüglich der aufbaufesten y -Achse	$\frac{m}{s^2}$
v_y	Geschwindigkeit bezüglich der aufbaufesten y -Achse	$\frac{m}{s}$

Formelzeichen	Physikalische Bedeutung	Einheit
a_z	Beschleunigung bezüglich der aufbaufesten z -Achse	$\frac{m}{s^2}$
v_z	Geschwindigkeit bezüglich der aufbaufesten z -Achse	$\frac{m}{s}$
ω_x	Drehgeschwindigkeitskomponente bezüglich der aufbaufesten x -Achse	$\frac{rad}{s}$
ω_y	Drehgeschwindigkeitskomponente bezüglich der aufbaufesten y -Achse	$\frac{rad}{s}$
ω_z	Drehgeschwindigkeitskomponente bezüglich der aufbaufesten z -Achse	$\frac{rad}{s}$
ϕ	Eulerwinkel, Wankwinkel bezüglich der aufbaufesten x -Achse	rad
θ	Eulerwinkel, Nickwinkel bezüglich der y -Zwischenachse	rad
ψ	Eulerwinkel, Gierwinkel bezüglich der geodätischen z -Achse	rad

Die Fahrzeugnickrate $\dot{\theta}_{Fzg,Inertial}$ ist gemäß Abbildung 5.3 die Differenz aus der inertialen Nickwinkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}$ ($= \omega_y$) und der Änderung des Fahrbahnlängsneigungswinkel $\dot{\gamma}$.

$$\dot{\theta}_{Fzg,Inertial} = \omega_y - \dot{\gamma} \quad (5.4)$$

wobei γ der durch Tiefpassfilterung gewonnene niederfrequente Anteil des inertialen Nickwinkels θ ist. Ergebnisse zur Ermittlung von γ im Zuge der inertialen Zustandsschätzung finden sich in Abschnitt 9.3.1.

Für bestimmte Anwendungen, die unmittelbar Größen der inertialen Eigenzustandsschätzung nutzen, wie etwa schnelle Stabilisierungsregelkreise (z.B. ESP), ist die Detaillierungstiefe des verwendeten Starrkörper-Modells ausreichend. Auch für Anwendungen wie etwa eine zusätzliche Vorsteuerungskomponenten, welche einen Geschwindigkeitsregler im Bereich von Steigungen unterstützt, ist der gewonnene Fahrbahnlängsneigungswinkel γ völlig ausreichend.

Betrachtet man allerdings die Komponenten des inertialen Nickwinkels θ über der Zeit, so erkennt man, dass sowohl der Fahrbahnlängsneigungswinkel γ als auch der Fahrzeugnickwinkel $\theta_{Fzg,Inertial}$ abhängig vom Frequenzbereich mehr oder wenig starkes Driftverhalten aufweisen. Dieses Driften gilt es mit Hilfe des visuellen Kanals zu kompensieren.

5.4.3 Visuelle Nickdynamikschätzung

Vorbild für die visuelle Kompensation driftbehafteter inertialer Größen ist die Strategie des Menschen, seine Lage im Raum neben dem Gleichgewichtssinn auch anhand von

visuellen Merkmalen zu bestimmen. Derartige Merkmale sind z.B. senkrechte und waagrechte Häuserkanten oder ganze physikalische Objekte wie Pfeiler, deren Ausrichtungen man aufgrund von Erfahrung, aus Bauplänen usw. kennt. Aufgrund der Tatsache, dass zur Lage- bzw. Positionsbestimmung besagte Merkmale im Kamerabild vorhanden sein müssen, kann die visuelle Eigenzustandsschätzung nicht ständig, sondern nur in den Fällen ausgeführt werden, in denen die Merkmale im Kamerabild vorhanden sind.

Aufgrund der im Vergleich zum inertialen Kanal geringen Dynamik des visuellen Kanals kann die Lage bzw. Position in (quasi-)stationären Zuständen mit genügender Güte bestimmt werden. Dies bedeutet aber auch, dass einfache Dynamikmodelle für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung ausreichend sind.

Welche Dynamikmodelle zur Bestimmung der Orientierung und Position relativ zu bestimmten physikalischen Objekten verwendet oder welche Bildverarbeitungsverfahren dazu eingesetzt werden, kann in einschlägiger Literatur nachgelesen werden. So ist in [BEHRINGER 96] und [LÜTZELER 02] beschrieben, wie die Lage und Orientierung eines Fahrzeugs relativ zur Straße aus visuellen Informationen ermittelt werden kann. [GREGOR 02] stellt vor, wie die globale Position eines autonomen Fahrzeugs anhand von bekannten Landmarken bestimmt wird.

Im Hinblick auf die Stabilisierung des auf inertialem Wege bestimmten Fahrzeugnickwinkels $\theta_{Fzg,Inertial}$ ist an dieser Stelle von besonderem Interesse, welches Nickdynamikmodell im Rahmen der visuellen Ermittlung des Fahrzeugnickwinkels zum Einsatz kommt. Die von U. Hofmann realisierte visuelle Fahrzeugnickwinkelschätzung nutzt wie schon [BEHRINGER 96] einen Oszillator zweiter Ordnung als Nickdynamikmodell. Unter Verwendung dieses Modells wird der Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und der Tangentialebene des lokalen Straßenabschnitts (vgl. Abb. 5.3) auf visuellem Wege bestimmt, wobei mögliche Verdrehungen der eingesetzten Kameras berücksichtigt werden.

Ein ausschließlich visuell gewonnener Fahrzeugnickwinkel $\theta_{Fzg,Vision}$ weist im Gegensatz zum inertial ermittelten Nickwinkel $\theta_{Fzg,Inertial}$ keine Drift auf. Andererseits können dynamische Änderungen von über $2,5Hz$ aufgrund des visuellen Messprinzips nur unzureichend abgebildet werden. Die in Abbildung 5.1 vorgestellte Rückführung des fusionierten Fahrzeugnickwinkels $\theta_{Fzg,Fusion}$, der auch maßgeblich vom inertialen Nickwinkel $\theta_{Fzg,Inertial}$ beeinflusst ist, kann die Dynamik der visuellen Zustandsschätzung erhöhen.

Ein weiterer Unterschied zur inertialen Zustandsschätzung ist der höhere Zeitbedarf, der im Rahmen der visuellen Eigenzustandsschätzung angesetzt werden muss. Wird ein Halbbild einer analogen CCD-Kamera ausgelesen, so wird diesem ein systemweiter Zeitstempel mitgegeben, welcher für sämtliche nachfolgenden Operationen maßgebend ist. Die sich anschließende Digitalisierung des Kamerabildes mittels eines Frame-Grabbers dauert ungefähr einen Videotakt von $40ms$ (bei PAL-Norm). Im nächsten Videotakt (wiederum $40ms$) werden sämtliche Bildverarbeitungsoperationen und die Zustandsschätzung mittels Kalman-Filter ausgeführt. Bis ein visueller Schätzwert vorliegt dauert es somit $80ms$, das sind $70ms$ mehr, als wenn dies mittels des inertialen Kanals erfolgt wäre. Die unterschiedlichen Verarbeitungszeiten sind in der folgenden fusionierenden Zustandsschätzung zu berücksichtigen.

5.4.4 Fusionierende Zustandsschätzung

Wie die Schätzgrößen des inertialen Kanals so werden auch alle Ergebnisse aus den visuellen Schätzprozessen zur Eigenzustandsbestimmung der fusionierenden Zustandsschätzung zugeführt, wo sie zu einer gemeinsamen Repräsentation kondensiert werden. Hierbei sind neben den bereits angesprochenen Verarbeitungszeiten ($10ms$ beim inertialen und $80ms$ beim visuellen Kanal) auch Kommunikationszeiten zu berücksichtigen.

Die Kommunikation der Ergebnisse dauert (im EMS-Vision) systembedingt im schlechtesten Fall $40ms$. Ergebnisse von visuellen Schätzprozessen stehen der fusionierenden Zustandsschätzung somit nach ca. $120ms$ zur Verfügung. Beim inertialen Kanal dauert es nur ca. $10ms$ bis die inertial ermittelten Zustandsgrößen bei der fusionierenden Zustandsschätzung eintreffen. Die kürzere Kommunikationszeit der inertial geschätzten Zustandsgrößen liegt in der EMS-Architektur gemäß Abbildung 3.1 und 3.3 begründet, da der Prozess zur fusionierenden Zustandsschätzung auf dem Verhaltensgenerierungs-PC platziert ist, an dem auch das 'Fahrzeug-Subsystem' angekoppelt ist, auf welchem die inertielle Zustandsschätzung läuft.

Es ist allerdings unökonomisch, die Zustandsgrößen $\hat{\mathbf{x}}_{Inertial}$ der inertialen Zustandsschätzung alle $10ms$ an die fusionierende Zustandsschätzung, die mit einem durch die Bildverarbeitung vorgegebenen Takt von $40ms$ arbeitet, weiterzugeben, da erhöhte Kommunikationslast entsteht. Die von der inertialen Zustandsschätzung erzeugten Daten werden deshalb gesammelt und alle $40ms$ in einem Block an die fusionierende Zustandsschätzung kommuniziert, wo sie zur sequentiellen Innovation der dortigen Schätzprozesse verwendet werden (vgl. Abschnitt 5.2). Im schlechtesten Fall, d.h. bei maximaler Kommunikationszeit von $10ms$ zwischen 'Fahrzeug-Subsystem' und Verhaltensgenerierungs-PC, ist der älteste Datensatz einer Kommunikationsnachricht, die von der inertialen Zustandsschätzung versandt wird, höchstens $50ms$ alt, wenn er bei der fusionierenden Zustandsschätzung eintrifft.

Die am Beispiel des EMS-Vision System aufgezeigten Verarbeitungs- und Kommunikationszeiten sollen exemplarisch darstellen, dass die Daten der visuellen und inertialen Eigenzustandsschätzung nicht synchron bei der fusionierenden Zustandsschätzung eintreffen. Zur Handhabung dieser Problematik wurden Verfahren wie etwa die Rückwärtsinnovation entwickelt (vgl. [RIEDER 00]).

Die Möglichkeit, verspätet eintreffende Zustandsgrößen von der visuellen wie auch von der inertialen Zustandsschätzung nicht zu verwerfen sondern gewichtet in die fusionierende Zustandsschätzung einzubringen, entspricht dem Ziel, soviel Informationen der beiden Kanäle wie möglich für die Fusion zu verwenden, um die Vorteile von inertialem (hohe Dynamik) und visuellem Kanal (stationäre Genauigkeit) auszunutzen. Für die Umsetzung der fusionierenden Zustandsschätzung mittels Kalman-Filter sind neben den bereits angesprochenen Ergänzungen bei der Innovation an die jeweilige Anwendung angepasste Dynamikmodelle für den Prädiktionsschritt vorzusehen. Diese Dynamikmodelle sind in der Regel detaillierter aufgelöst als die der unterlagerten visuellen und inertialen Zustandsschätzungen.

Generell kann die fusionierende Zustandsschätzung in einem Kraftfahrzeug über das gesamte Spektrum der Fahrzeugdynamik (Nick-, Wank, Quer- oder Längsdynamik) oder zur Positionsbestimmung eingesetzt werden. Im Folgenden wird am Beispiel der Nickdynamik gezeigt, wie die Ergebnisse der inertialen (Abschnitt 5.4.2) und der visuellen Nickdynamikschätzung (Abschnitt 5.4.3) mit Hilfe der angeführten Verfahren fusioniert werden können.

5.4.4.1 Schätzung der Nickdynamik

Um die inertial ($\theta_{Fzg,Inertial}$, Abschnitt 5.4.2) und visuell ($\theta_{Fzg,Vision}$, Abschnitt 5.4.3) ermittelten Nickwinkel miteinander zu fusionieren, ist ein an die jeweilige Fahrzeugart angepasstes Dynamikmodell für die Nickdynamik zu verwenden. Es ist zu berücksichtigen, dass bei Kraftfahrzeugen die Nickbewegung eng mit der Hubbewegung verkoppelt ist.

Wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, bilden das Nicken und das Huben zusammen mit dem Wanken die Vertikaldynamik eines Kraftfahrzeugs, wobei die Wankbewegung von der Hub-/Nickbewegung als entkoppelt angesehen werden kann. Für die Bestimmung des Aufbaunickwinkels θ_{Fzg} ist es notwendig, ein Nickdynamikmodell zu finden, das an die Fahrzeugart angepasst ist. Für ein zweiachsiges Kraftfahrzeug ergeben sich die in Abbildung 5.4 dargestellten Kräfte und geometrischen Verhältnisse, mit deren Hilfe ein Modell für die Hub-/Nickbewegung erstellt werden kann.

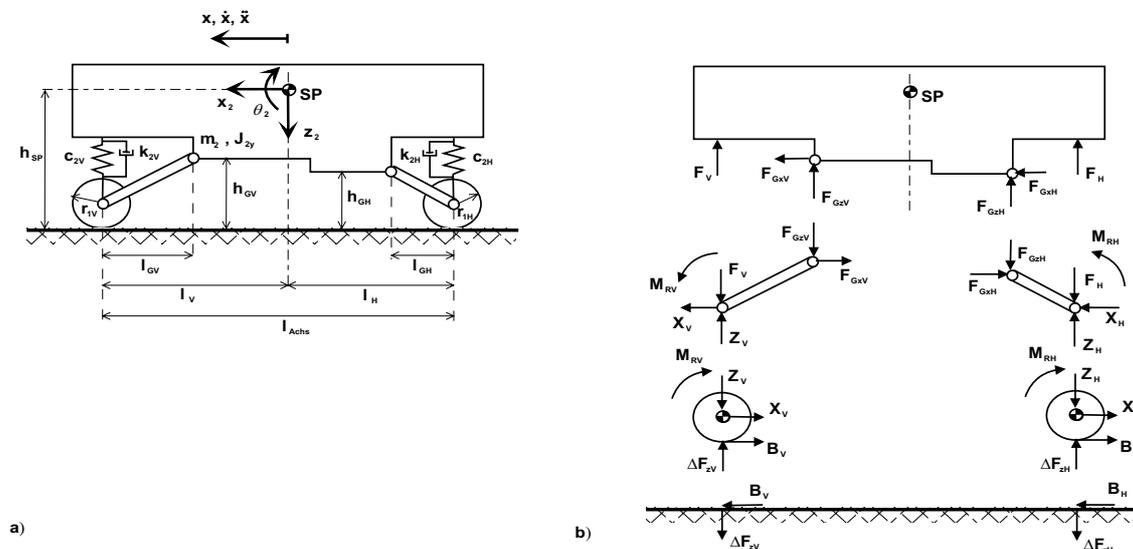


Abbildung 5.4: Modell zur Berechnung der Aufbauschwingungen beim Bremsen (nach [MITSCHKE 97]): a) Fahrzeugdaten; b) Kräfte und Momente

Die verwendeten Zustandsgrößen können der Tabelle 5.2 entnommen werden, wobei in diesem Abschnitt die Bezeichnungen einer kürzeren Schreibweise wegen der Nomenklatur nach [MITSCHKE 97] angepasst sind. Der Index Fzg wird dabei durch den Index $_2$ ersetzt, der gemäß [MITSCHKE 97] für das Teilsystem 'Fahrzeugaufbau' steht.

Tabelle 5.2: Variablen zur Schätzung der Hub-/Nickdynamik

Formelzeichen	Physikalische Bedeutung	Einheit
\dot{z}_2	Geschwindigkeit des Fahrzeugaufbaus bezüglich der aufbaufesten z -Achse	$\frac{m}{s}$
z_2	Weg des Fahrzeugaufbaus bezüglich der aufbaufesten z -Achse	m
$\dot{\theta}_2$	Nickwinkelgeschwindigkeit bezüglich der der aufbaufesten y -Achse	$\frac{rad}{s}$
θ_2	Nickwinkel des Fahrzeugaufbaus bezüglich der aufbaufesten y -Achse	rad

Es ergeben sich die aus [MITSCHKE 97] bekannten Systemgleichungen, die an die geltenden Koordinatensystemkonventionen (vgl. [SIEDERSBERGER 01]) angepasst sind:

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 = & -\frac{k_{2V} + k_{2H}}{m_2} \cdot \dot{z}_2 - \frac{c_{2V} + c_{2H}}{m_2} \cdot z_2 + \frac{k_{2V}l_{2V} - k_{2H}l_{2H}}{m_2} \cdot \dot{\theta}_2 \\ & + \frac{c_{2V}l_{2V} - c_{2H}l_{2H}}{m_2} \cdot \theta_2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_2 = & \frac{k_{2V}l_{2V} - k_{2H}l_{2H}}{J_{2y}} \cdot \dot{z}_2 + \frac{c_{2V}l_{2V} - c_{2H}l_{2H}}{J_{2y}} \cdot z_2 - \frac{k_{2V}l_{2V}^2 + k_{2H}l_{2H}^2}{J_{2y}} \cdot \dot{\theta}_2 \\ & - \frac{c_{2V}l_{2V}^2 + c_{2H}l_{2H}^2}{J_{2y}} \cdot \theta_2 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Bei den verwendeten Parametern handelt es sich um das Massenträgheitsmoment J_{2y} um die aufbaufeste y -Achse, bei m_2 um die Aufbaumasse und bei c_{2V} , c_{2H} , k_{2V} und k_{2H} um Parameter der Feder-/Dämpfersysteme, mittels derer die Räder mit der Karosserie verbunden sind. All diese Parameter werden als konstant und linear angenommen. An dieser Stelle bietet sich daher Potenzial für Verfeinerungen der angegebenen Systemgleichungen. So können beispielsweise nichtlineare Charakteristiken der Feder-/Dämpferelemente oder Parameterschwankungen wie die der Aufbaumasse m_2 berücksichtigt werden. Aber auch die Betrachtung unterschiedlicher Radaufhängungsarten führt zu detaillierteren Dynamikmodellen.

Angeregt wird das dynamische System von Abbildung 5.4 zum einen durch Bodenunebenheiten³, die über die Räder auf die Karosserie übertragen werden, und zum anderen

³Es wird vereinfachend angenommen, dass es sich bei den Bodenunebenheiten um Einspuranregungen handelt, wodurch keine Wankschwingungen auftreten.

durch aktiven Gas- bzw. Bremsengriff. Die sich aus einem Brems- bzw. Gaseingriff ergebenden positiven wie negativen Längsbeschleunigungen und deren Änderungen führen zum sogenannten Brems- bzw. Beschleunigungsnicken. Ein einfacher Zusammenhang zwischen einer Nickbewegung und der sie verursachenden Längsbeschleunigung wurde in [SPOHR & WERBER 00] hergeleitet. Verwendet man die Beschleunigung als Eingangsgröße für das durch die Gleichungen 5.5 und 5.6 beschriebene System, so erhält man eine lineare Zustandsbeschreibung für das extern angeregte Hub-/Nickmodell.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b} \cdot u \quad (5.7)$$

mit

$$\mathbf{x}^T = [\dot{z}_2, z_2, \dot{\theta}_2, \theta_2], \quad u = a_x$$

und

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{k_{2V} + k_{2H}}{m_2} & -\frac{c_{2V} + c_{2H}}{m_2} & \frac{k_{2V} l_{2V} - k_{2H} l_{2H}}{m_2} & \frac{c_{2V} l_{2V} - c_{2H} l_{2H}}{m_2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{2V} l_{2V} - k_{2H} l_{2H}}{J_{2y}} & \frac{c_{2V} l_{2V} - c_{2H} l_{2H}}{J_{2y}} & -\frac{k_{2V} l_{2V}^2 - k_{2H} l_{2H}^2}{J_{2y}} & -\frac{c_{2V} l_{2V}^2 - c_{2H} l_{2H}^2}{J_{2y}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Der Eingangsvektor \mathbf{b} ist abhängig davon, ob das Fahrzeug sich in einer Beschleunigungs- oder Verzögerungsphase befindet. Für den Verzögerungsfall gilt:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} m_2 \cdot \left(-\frac{(1-i) \cdot h_{GV}}{l_{GV}} + \frac{i \cdot h_{GH}}{l_{GH}} \right) \\ 0 \\ m_2 \cdot \left(-\frac{(1-i) \cdot h_{GV}}{l_{GV}} \cdot l_{2V} + \frac{i \cdot h_{GH}}{l_{GH}} \cdot l_{2H} + h_{SP} \right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Der Einfluss der Verzögerung auf das Aufbaunicken ist zum einen von Geometrieparametern abhängig (siehe Abb. 5.4), zum anderen wirkt sich die Bremskraftverteilung i zwischen Hinter- und Vorderachse auf das Bremsnicken aus.

Für den Beschleunigungsfall vereinfacht sich der Eingangsvektor nach Gleichung 5.9, da, mit Ausnahme von Allradfahrzeugen, die Kraft beim Beschleunigen für gewöhnlich über die Räder einer Achse in Vortrieb umgesetzt wird. Der Eingangsvektor \mathbf{b} lautet daher für ein heckgetriebenes Kraftfahrzeug:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} m_2 \cdot \left(\frac{h_{GH}}{l_{GH}} \right) \\ 0 \\ m_2 \cdot \left(\frac{h_{GH}}{l_{GH}} \cdot l_{2H} + h_{SP} \right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Das vorgestellte Hub-/Nickmodell wird im Rahmen der Realisierung einer auf einem Kalman-Filter basierenden fusionierenden Zustandsschätzung, welche den fusionierten Fahrzeugnickwinkel $\theta_{Fzg,Fusion}$ liefert, im Prädiktionsschritt gemäß Abschnitt 5.2 benötigt. Zur Durchführung des Innovation-Schrittes im Zuge der Abarbeitung des Kalman-Filter Algorithmus' sind entsprechende physikalische (Mess-) Größen erforderlich.

Verwendet man zur Innovation der fusionierenden Nickdynamikschätzung ausschließlich Größen, die von der inertialen Nickdynamikschätzung (Abschnitt 5.4.2) geliefert werden, wie die Fahrzeugnickgeschwindigkeit $\dot{\theta}_{Fzg,Inertial}$ gemäß Gleichung 5.4 oder die Geschwindigkeit entlang der aufbaufesten z -Achse $\dot{z}_{Fzg,Inertial}$, so tritt das aufgrund der Aufintegration von inertialen Größen entstehende Driftproblem zu Tage.

Zur Kompensation der Drift wird in dieser Anwendung ein visuell ermittelter, driftfreier Nickwinkel verwendet. Die visuelle Nickdynamikschätzung gemäß Abschnitt 5.4.3 bestimmt anhand von visuellen Merkmalen, im vorgestellten Fall anhand von Spurmarkierungen der Fahrbahn, den Fahrzeugnickwinkel $\theta_{Fzg,Vision}$. Der visuell ermittelte Fahrzeugnickwinkel steht aber nur dann zur Verfügung, wenn auch die notwendigen visuellen Merkmale im Bild vorhanden sind. Außerdem kann zu dynamischen Nickbewegungen oberhalb von etwa $2,5Hz$ von der visuellen Nickdynamikschätzung nicht mehr ausreichend genau gefolgt werden. Der visuell ermittelte Fahrzeugnickwinkel wird daher nur zur Innovation der fusionierenden Nickdynamikschätzung herangezogen, wenn genannte Bedingungen zutreffen, z.B. im Stillstand. Für die Innovation der fusionierenden Nickdynamikschätzung bedeutet dies, dass nicht ständig verfügbare Messwerte, die im Vergleich zu den inertialen Größen auch noch verspätet eintreffen, verwaltet werden müssen, was den Einsatz der sequentiellen Innovation und der Rückwärtsinnovation gemäß Abschnitt 5.2 erfordert. Ein auftretendes Driften des ausschließlich mit inertialen Daten innovierten Fahrzeugnickwinkels $\theta_{Fzg,Fusion}$ über einen längeren Zeitraum kann somit effektiv durch die Nutzung eines driftfreien, visuell ermittelten Nickwinkels $\theta_{Fzg,Vision}$ kompensiert werden.

Mit der Fusion von inertialer und visueller Nickdynamikschätzung mittels Kalman-Filter erreicht man die Vereinigung der stationären Genauigkeit der visuellen mit der hohen Dynamik der inertialen Zustandsschätzung. Der so gewonnene fusionierte Fahrzeugnickwinkel $\theta_{Fzg,Fusion}$ stellt das beste Wissen über den Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und der lokalen Tangetialebene dar. Er wird systemweit (z.B. über den Szenenbaum von Abschnitt 4.1) verteilt. Sämtliche funktionalen Systemkomponenten können den fusionierten Fahrzeugnickwinkel somit nutzen. So wird das Ergebnis der fusionierenden Zustandsschätzung, wie in Abb. 5.1 angedeutet, auch zur inertialen und visuellen Zustandsschätzung rückgeführt, um z.B. das Driftverhalten des inertialen Zweigs zu minimieren.

Wie in Abschnitt 9.3.2 zu sehen ist, ergibt sich aus der Fusion von inertialen und visuellen Daten unter Nutzung des einfachen Hub-/Nickmodells nach Gleichung 5.7 ein sowohl qualitativ als auch quantitativ nachvollziehbarer Verlauf des Aufbaunickwinkels $\theta_{Fzg,Fusion}$.

5.4.4.2 Weitere Anwendungen

Neben der in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Schätzung der Nickdynamik eines Kraftfahrzeugs eignet sich das Prinzip der Fusion von inertialen und visuellen Signalen auch für weitere Anwendungen, die im Rahmen der automatischen Führung von (semi-) autonomen Fahrzeugen von Bedeutung sind. Die Fusion inertialer und visueller Größen bei der Ermittlung horizontaldynamischer Zustandsgrößen ist ebenso ein Beispiel hierfür wie die Stützung der Positionsbestimmung durch visuell ermittelte Daten.

Bei der Schätzung von horizontaldynamischen Zustandsgrößen wie der Fahrzeuggierate $\omega_{z,Fzg}$ oder des Fahrzeugschwimmwinkels β_{Fzg} , welche für eine sichere Durchführung von Fahrmanövern und für die Generierung des in Kapitel 4.2 vorgestellten Fahrschlauchs notwendig sind, wird prinzipiell auf die gleiche Weise vorgegangen, wie es bei der Schätzung der Nickdynamik der Fall ist. Ausgehend von Dynamikmodellen⁴, welche die Rotation des Fahrzeugs um seine eigene Hochachse beschreiben, wird eine fusionierende Zustandsschätzung aufgebaut. Werden für die Innovation bei dieser fusionierenden Rotationsdynamikschätzung ausschließlich Größen wie die inertielle Gierrate $\omega_{z,inertial}$ oder der gemessene Lenkwinkel δ_{Mess} verwendet, so tritt auch hier aufgrund der ungestützten Aufintegration inertialer Signale die Driftproblematik zu Tage, wenn keine Gegenmaßnahmen vorgesehen werden.

Da einige der im Rotationsmodell verwendeten Größen wie etwa die Fahrzeuggierate auch auf visuellem Wege bestimmt werden können, bietet es sich an, die Driftkompensation auch hier mittels des visuellen Kanals vorzunehmen. Wie beispielsweise die Eigenbewegung innerhalb der eigenen Fahrspur auf visuellem Wege ermittelt werden kann, ist in [BEHRINGER 96] und [LÜTZELER 02] beschrieben. Aber auch hier tritt wie schon bei der Nickdynamikschätzung der Fall auf, dass die visuell bestimmten Größen nur vorliegen, wenn auch die zur Ermittlung der Zustandsgrößen notwendigen Merkmale im Bild vorhanden sind. Liegt ein entsprechendes Szenario vor, können die visuell bestimmten Zustandsgrößen zur Stützung der auf ausschließlich inertialen Signalen beruhenden Rotationsdynamikschätzung herangezogen werden.

Die inertielle/visuelle Zustandsschätzung kann aber auch im Bereich der Ortung sowohl zur globalen als auch zur lokalen Positionsbestimmung eingesetzt werden. Bei der globalen (absoluten) Positionsbestimmung übernimmt der visuelle Kanal bei Ausfall der GPS-Information (z.B. durch Abdeckung oder Defekt) die Aufgabe, die sich im Sinne der inertialen Navigation ergebende Drift zu kompensieren. Dazu wird auf visuellem Wege die Relativposition zu Landmarken wie Kreuzungen oder markanten Gebäuden bestimmt. Dadurch dass die absolute Position der Landmarken bekannt ist, kann auch die absolute Position des Eigenfahrzeugs bestimmt werden. Ein ähnliches Vorgehen wird angewendet, um die Position innerhalb eines lokal definierten Bezugssystems, welches z.B. mit einem Kartenausschnitt gleichgesetzt werden kann, zu bestimmen.

Für die gemeinsame Nutzung von inertialen und visuellen Informationen ergibt sich daher im Rahmen von (semi-)autonomen Fahrzeugen ein weites Anwendungsfeld.

⁴Eine Herleitung der verwendeten Modelle findet sich z.B. in [BRÜDIGAM 94] oder [MÜLLER 96].

Kapitel 6

Fähigkeitskonzept

Wie in Kapitel 5 am Beispiel von Wahrnehmungsmodulen, welche primär Inertialdaten auswerten, gezeigt wurde, ist in einem autonomen System ein komplexer Wahrnehmungsapparat notwendig, um eine detaillierte interne Repräsentation systemdynamischer Zustandsgrößen des eigenen Systems und der Umgebung - etwa in Form eines Szenenbaums (vgl. Abschnitt 3.5 und Kapitel 4) - aufbauen zu können. In Analogie zum Menschen gehen in einem autonomen System neben dem Wahrnehmen innerer und äußerer Sachbezüge aber noch andere Vorgänge vorstatten. „Erkennen, Denken und Wollen, ja schon das ihnen vorausgehende Wahrnehmen [aber auch das Agieren, Anm. des Autors], sind Tätigkeiten.“ [LORENZ 75, S.10]. Konrad Lorenz bezieht diesen Sachverhalt zwar auf biologische Lebewesen, jedoch kann dieser auch auf technische Systeme übertragen werden, die selbstständig agieren. So führt ein autonomes System bei der Erledigung einer Aufgabe prinzipiell die gleichen Tätigkeiten aus (Wahrnehmen, Entscheiden, Agieren, etc.), wie es auch der Mensch in der jeweiligen Situation tun würde.

Bei der Ausübung einer *Tätigkeit* wird eine gewisse Leistung erbracht. Damit die gewünschte Leistung abgerufen werden kann, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Ist dies der Fall, so ist die *Fähigkeit* vorhanden, die assoziierte Leistung bei Bedarf zu erbringen. 'Zu etwas fähig sein' bedeutet laut [MEYERS 71, Band 8, S.447] das Vorhandensein der „Gesamtheit der zum Erbringen einer Leistung notwendigen Bedingungen“. In Ergänzung zur „Begabung, die sich auf angeborene Bedingungen ... zur Ausführung von Leistungen bezieht, schließt der Fähigkeitenbegriff auch solche Bedingungen ein, die durch Lernprozesse ... erworben worden sind.“ [MEYERS 71, Band 8, S.447]. Eine Fähigkeit, sei sie ererbt oder erlernt, ist somit ein Synonym für die mit ihr assoziierte Leistung, welche erbracht werden kann, wenn sämtliche notwendigen Bedingungen vorliegen. Bei einer Tätigkeit handelt es sich daher um das Erbringen einer Leistung und speziell in diesem Kontext um das „Inbetriebsein, Wirksamsein oder Aktivsein“ [BROCKHAUS 96, Band 1, S.302] der die Tätigkeit repräsentierenden Fähigkeit.

Um eine Tätigkeit, die durch die zugehörige Fähigkeit repräsentiert ist, ausüben zu können, muss bekannt sein, welche Bedingungen zutreffen müssen und ob diese erfüllt sind.

Dieses Wissen rund um eine Fähigkeit, sei es implizit oder explizit vorhanden, ermöglicht erst, die jeweilige Fähigkeit zu nutzen, d.h. die zugehörige Tätigkeit auszuführen.

Oft ist es zum Erreichen eines Zieles notwendig, mehrere Fähigkeiten gemeinsam abzurufen, woraus sich in der Zusammenschau neue, komplexere Fähigkeiten ergeben. Auch bei derart kombinierten Fähigkeiten müssen alle zum Erbringen der gewünschten komplexen Leistung notwendigen Voraussetzungen erfüllt sein. Notwendige Bedingung für eine komplexe Fähigkeit kann die Existenz weniger komplexer (elementarer) Fähigkeiten sein. Eine komplexe Fähigkeit ist also abhängig von denjenigen Fähigkeiten, welche sie nutzt. Das bedeutet, dass eine kombinierte Fähigkeit nur abgerufen werden kann, wenn auch alle anderen Fähigkeiten, von denen sie abhängt, verfügbar sind, was wiederum heißt, dass alle Bedingungen der Einzelfähigkeiten erfüllt sein müssen. Zusätzlich können bei einer kombinierten Fähigkeit neue Bedingungen hinzukommen, die über die bereits für die Einzelfähigkeiten notwendigen Bedingungen hinausgehen.

Fähigkeiten, unabhängig davon ob es sich um elementare oder bereits aus anderen Fähigkeiten kombinierte handelt, sind oft unterschiedlichen Typs. Um welche Kategorie von Fähigkeit (Wahrnehmung, Planung, Entscheidung, Aktionsausführung usw.) es sich letztendlich handelt, wird durch den Bereich definiert, in dem die zugehörige Tätigkeit ausgeführt wird. Je komplexer jedoch eine Fähigkeit ist, desto schwieriger ist es, sie einer einzelnen Kategorie zuzuordnen.

Durch die Möglichkeit, Fähigkeiten kombinieren zu können, entsteht eine Hierarchie innerhalb aller Fähigkeiten. Es ist ein qualitativer Unterschied, ob einfache oder komplexere, zusammengesetzte Fähigkeiten betrachtet werden. Unterschiedliche Hierarchieebenen, denen Fähigkeiten zugeordnet werden können, aber auch die Einteilung in Kategorien wie etwa Wahrnehmung, Entscheidung, Aktionsausführung etc. sind in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt. Jeder Kreis innerhalb dieses Fähigkeitenschemas steht für eine Fähigkeit. Die Abhängigkeiten zwischen den Fähigkeiten sind durch die Pfeile zwischen den Kreisen ausgedrückt, wobei diese so zu verstehen sind, dass Fähigkeiten, die in der Hierarchie höher angesiedelt sind, von solchen einer untergeordneten Schicht abhängig sind. Die einzelnen Ebenen werden gemäß dem Abstraktionsgrad und dem Entscheidungsbedarf der in ihnen angesiedelten Fähigkeiten abgestuft.

Die starrste Form der Ausübung von Tätigkeiten nennt man *Handlungsprimitive*, die als *Fertigkeiten* repräsentiert sind. Fertigkeiten bzw. deren Ausübung in Form von Handlungsprimitiven „können als relativ verfestigte und automatisierte Tätigkeiten, häufig ohne ständige Steuerung und Kontrolle ..., aufgefaßt werden.“ [BROCKHAUS 96, Band 7, S.235]. Aufgrund des automatisierten Ablaufs ist kein Entscheidungsbedarf von anderer Stelle erforderlich. Handlungsprimitive sind eindeutig einem bestimmten Tätigkeitsbereich (z.B. Wahrnehmung, Entscheidung, Aktionsausführung, ...) zugeordnet. Fertigkeiten, welche Handlungsprimitive repräsentieren, bilden die unterste Ebene in der Fähigkeitenhierarchie (vgl. Abbildung 6.1).

Das Ausüben einer ziel- bzw. zweckgerichteten stereotypen Fähigkeit wird als *Handlung* bezeichnet. Im Gegensatz zu den eine Hierarchiestufe tiefer angesiedelten Handlungsprimitiven ist eine Handlung „eine reflektierte, willentliche Tätigkeit, die auf Gestaltung

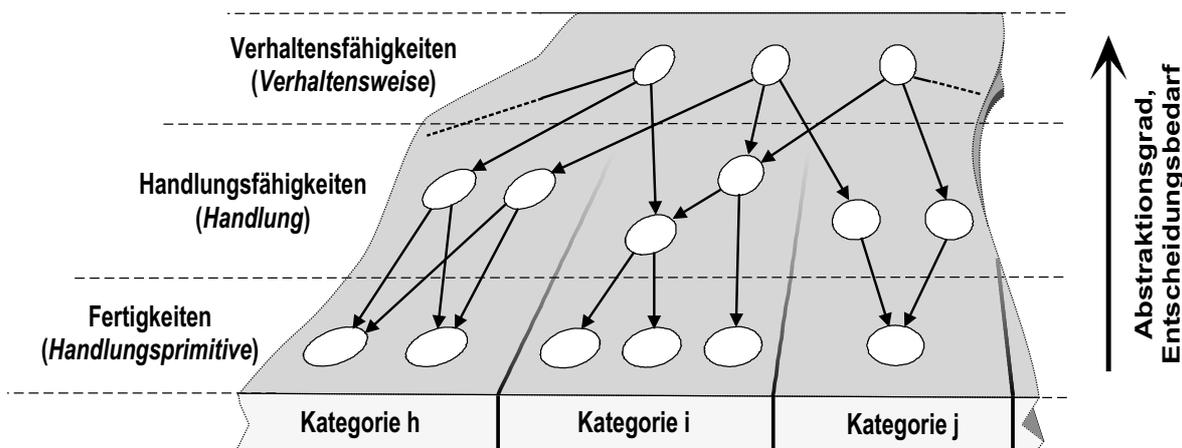


Abbildung 6.1: Zuordnung von Fähigkeiten zu Hierarchieebenen und Kategorien

der Wirklichkeit gerichtet ist“ [BROCKHAUS 96, Band 9, S.448] und daher durchdachte Entscheidungen voraussetzt. Fähigkeiten, die Handlungen repräsentieren, werden als *Handlungsfähigkeiten*¹ bezeichnet (vgl. Abbildung 6.1). Handlungen nutzen immer Fertigkeiten, um die mit ihnen assoziierte Leistung zu erbringen, und gehören meist der gleichen Kategorie wie die genutzten Fertigkeiten an.

Werden, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen, unterschiedliche Handlungen parallel oder sequentiell ausgeführt, so ergeben sich komplexe *Verhaltensweisen*. Eine Verhaltensweise ist gemäß [BROCKHAUS 96, Band 23, S.209] die Bezeichnung für zusammengehörige Tätigkeiten (Handlungen, sowie Handlungsprimitive) eines Organismus¹. Die in komplexen Verhaltensweisen genutzten Fähigkeiten müssen nicht zwangsläufig einer Kategorie (z.B. Wahrnehmung, Entscheidung, Aktionsausführung, ...) angehören. Es ist nur entscheidend, dass sich die ausgeführten Handlungen gegenseitig ergänzen, damit die gestellte Aufgabe erfüllt werden kann. Da Verhaltensweisen unterlagerte Fähigkeiten verschiedenster Couleur nutzen, um komplexe Aufgaben zu erledigen, können Verhaltensweisen keiner einzelnen Kategorie mehr zugeordnet werden. Spätestens auf dieser Abstraktionsebene löst sich die Einteilung in unterschiedliche Kategorien auf. Im Sinne der Repräsentation von Tätigkeiten in Form von Fähigkeiten werden Verhaltensweisen durch *Verhaltensfähigkeiten* repräsentiert.

An dieser Stelle sei nochmals festgehalten, dass eine *Tätigkeit* das Erbringen derjenigen Leistung ist, welche durch die zugehörige *Fähigkeit* repräsentiert ist. *Tätigkeiten* werden aufgrund ihrer Komplexität, ihres Abstraktionsgrads und ihres Entscheidungsbedarfs in *Handlungsprimitive*, *Handlungen* und *Verhaltensweisen* unterschieden. Bei einer *Fähigkeit* als Repräsentant der von einer Tätigkeit zu erwartenden Leistung spricht man bei gleichem Abstraktionsniveau von *Fertigkeiten*, *Handlungsfähigkeiten* und *Verhaltensfähigkeiten*.

¹[PELLKOFER 03] bezeichnet Handlungsfähigkeiten als *schematische Fähigkeiten*.

6.1 Fähigkeiten in einem autonomen System²

Überträgt man das zu Beginn dieses Kapitels vorgestellte Fähigkeitenschema auf ein autonomes System, so steht eine Fähigkeit für eine im System verfügbare Funktionalität. Dies ist unabhängig davon, welcher Kategorie die Fähigkeit zuzuordnen ist oder über welchen Detaillierungsgrad sie verfügt. Das Wissen über das, was ein System zu leisten vermag, ist im Besonderen für dessen Planungs- und Entscheidungseinheiten von essenzieller Bedeutung.

Dieser Thematik nehmen sich speziell die Kognitionswissenschaften, Fachgebiete der 'Künstlichen Intelligenz' (KI) und die Informatik an. Zum einen wird versucht, Fähigkeiten in Anlehnung an den Menschen formal zu erklären [HORN 68], [LE MENTEC ET AL. 99], zum anderen steht die informationstechnische Umsetzung einer abstrakten Fähigkeitenbeschreibung auf einem Rechnersystem im Mittelpunkt des Interesses. Dies erfolgt in vielen Fällen für Agenten-Systeme unabhängig davon, um was für einen Typ von 'Agenten' es sich handelt. Dazu wird meist eine abstrakte Beschreibungssprache mit eigener Syntax benutzt, um Fähigkeiten zu beschreiben und sie für allgemeine Planungszwecke (logistische Planung, Bewegungsplanung, Planung von Ablaufsteuerungen jeglicher Art usw.) nutzen zu können [GILL & BLYTHE 00], [WILKINS & MYERS 95].

Im Bereich der Robotik wird der 'Fähigkeiten'-Begriff ebenfalls verwendet, vor allem wenn es darum geht, die Funktionalitäten eines Roboters oder eines autonomen Systems zu erläutern. Meistens wird davon gesprochen, dass ein System über eine Fähigkeit verfügt, wenn eine gewünschte Funktion ausgeführt werden kann. Eine explizite formale Repräsentation von Fähigkeiten, wie von der KI als Grundlage für die Planung gefordert, erfolgt aber in wenigen Fällen.

Verhaltensbasierte Architekturen kommen der Forderung nach getrennten Verhaltensmustern am nächsten, indem sie die Verhaltensmuster, welche als Fähigkeiten angesehen werden können, in den Mittelpunkt rücken. Bei der Frage, wie Verhaltensmuster zu repräsentieren sind, gehen die Meinungen allerdings auseinander. So lehnt [BROOKS 86] mit seiner 'Subsumptionarchitektur', der wohl bekanntesten reaktiven verhaltensbasierten Systemarchitektur, explizite interne Modelle grundlegend ab. In rein reaktiven Systemen werden diese für unnötig angesehen, da die vom System gezeigten Verhaltensmuster direkt mit bestimmten Eingangssignalkombinationen z.B. von Sensoren verknüpft sind und dafür kein internes Modell vorhanden sein muss. Einen guten Überblick über verhaltensbasierte Systemarchitekturen gibt [ARKIN 98].

In fast allen wie auch immer strukturierten Systemarchitekturen, in denen keine explizite Repräsentation der Fähigkeiten erfolgt, bei denen aber Planungs- und Entscheidungskomponenten vorgesehen sind, wird impliziert, dass alle notwendigen Voraussetzungen für die Ausführung einer einzuplanenden bzw. auszuwählenden Funktion erfüllt sind.

Ziel bei der Entwicklung des Fähigkeitenkonzeptes für autonome Systeme und speziell für das EMS-Vision System war, eine einheitliche systeminterne Repräsentation für alle von

²Die Konzepte und Verfahren dieses Abschnitts wurden in der Gruppe 'Verhalten' erarbeitet.

einem autonomen System zur Verfügung gestellten Funktionalitäten aufzubauen und sie in Fähigkeiten zu kapseln. Fähigkeiten sollten explizit repräsentiert werden, damit jede funktionale Einheit des autonomen Systems bei Bedarf zugreifen kann. So können sowohl langfristig planende als auch auf aktuelle Ereignisse reagierende Module auf die in den Fähigkeiten gekapselten Funktionalitäten zurückgreifen.

Für eine konsistente Nutzung durch unterschiedliche funktionale Systemeinheiten sollte die Repräsentationsform eine von der Art der Fähigkeit unabhängige, einheitliche Struktur aufweisen. Aus der homogenen Fähigkeitenbeschreibung ergibt sich, dass ein für alle Fähigkeiten gleichartiges Monitoring zur Überwachung des aktuellen Fähigkeitenstatus' und eine vereinheitlichte prädiktive Komponente zur Bestimmung des zukünftigen Verlaufs der von einer Fähigkeit repräsentierten Funktionalität realisiert werden können.

6.1.1 Zustandsautomatenmodell

Eine Fähigkeit ist der Repräsentant einer Funktionalität, die von einer funktionalen Einheit eines autonomen Systems ausgeführt werden kann. Die Systemkomponente, welche die zur Fähigkeit äquivalente Tätigkeit ausführt, wird als *Experte* der jeweiligen Fähigkeit bezeichnet. Dabei ist es unerheblich, ob mehrere funktionale Einheiten, welche Experten für unterschiedliche Fähigkeiten sein können, in einem (Software-)Modul zusammengefasst werden oder ob es für jeden Fähigkeitenexperten ein eigenes Modul gibt.

Im Sinne einer konsistenten Handhabung von Fähigkeiten ist es sinnvoll, eine einheitliche Struktur für Fähigkeiten einzuführen, welche zum einen die Ausführung der durch die Fähigkeit repräsentierten Tätigkeit mittels des Experten und zum anderen den externen Zugriff durch andere funktionale Systemeinheiten, welche nicht mit dem Experten identisch sein müssen, regelt. So können Fähigkeiten von beliebigen Systemkomponenten initialisiert, gestartet, gestoppt oder parametrisiert werden. In der Regel übernehmen diese Aufgaben Entscheidungsinstanzen, welche in einer hierarchischen Systemarchitektur über den Fähigkeitenexperten angesiedelt sind. Fähigkeiten werden von diesen Entscheidungseinheiten bedarfs- und situationsgerecht eingesetzt, um globale Ziele zu erreichen (z.B. eine komplexe Mission durchzuführen) oder um elementare Forderungen (z.B. dass sich ein autonomes System immer in einem sicheren Zustand befinden muss) zu erfüllen.

Abbildung 6.2 zeigt das im Rahmen der Entwicklung des Fähigkeitenkonzeptes entstandene Zustandsautomatenmodell für die Nutzung von Fähigkeiten, welches die Ausführung der durch die Fähigkeiten repräsentierten Tätigkeiten und die dazu nebenläufigen Maßnahmen koordiniert. Zur graphischen Darstellung des Zustandsautomatenmodells werden Zustandskarten nach [HAREL 87] benutzt.

Eine Fähigkeit verfügt für die Ausführung der ihr gekapselten Funktionalität über eine organisatorische, eine operative und eine überwachende Komponente. Diese erscheinen im Zustandsautomatenmodell für eine Fähigkeit gemäß Abbildung 6.2 als parallele Zustände. Jeder dieser Zustände ist wiederum in Unterzustände aufgeteilt. Realisiert werden die durch Zustandskarten modellierten Abläufe mittels Zustandsautomaten.

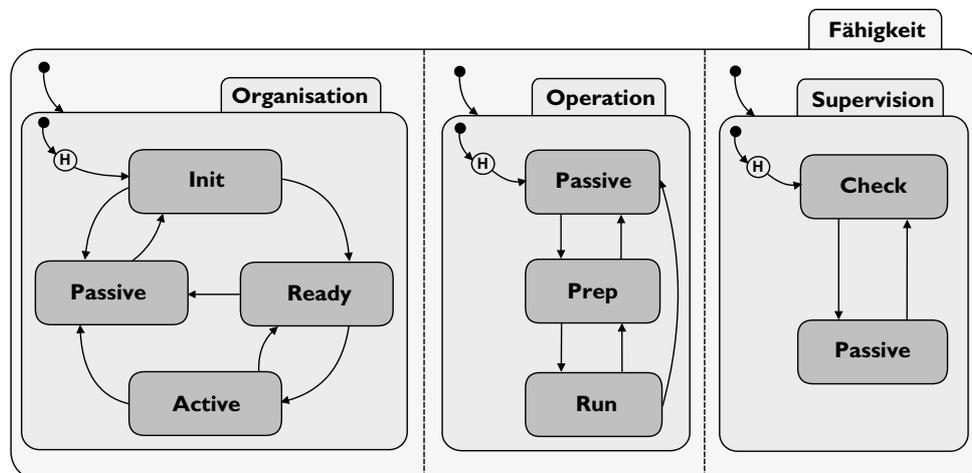


Abbildung 6.2: Zustandsautomatenmodell

Wird eine Fähigkeit initialisiert, d.h. die Ausführung der mit der Fähigkeit verbundenen Funktionalität wird angestrebt, so erfolgt der Eintritt in die jeweiligen Anfangszustände der drei Bereiche **Organisation**, **Operation** und **Supervision**, was durch die kurzen Initialisierungspfeile symbolisiert wird. Der Zustand **Operation** geht in seinen Anfangszustand **Operation.Passive**, in dem noch keine Aktivitäten ausgeführt werden. Im **Supervision**-Teil wird sofort mit der Überprüfung begonnen, ob alle für die Ausführung dieser Fähigkeit notwendigen Bedingungen z.B. die Verfügbarkeit anderer benötigter, evtl. weniger komplexer Fähigkeiten, zutreffen (**Supervision.Check**). Der Zustand **Organisation** beginnt mit dem Unterzustand **Organisation.Init**, in dem alle für die Ausführung notwendigen implementatorischen Grundlagen (Speicher reservieren, Schnittstellen zur Verfügung stellen, etc.) geschaffen werden. Verläuft die Überprüfung der benötigten Ressourcen im **Supervision**-Teil erfolgreich, so verbleibt dieser im Unterzustand **Supervision.Check** und es wird regelmäßig überprüft, ob noch alle notwendigen Bedingungen erfüllt sind. Dies ist eine Bedingung, dass der **Organisation**-Automat in den Zustand **Organisation.Ready** wechselt. Die andere Transitionsbedingung für den Übergang von **Organisation.Init** in **Organisation.Ready** ist, dass die Ausführung von außen parametrisiert wird, d.h. dass die funktionale Systemeinheit, die schon die Fähigkeit initialisiert hat, nun Parameter übermittelt, die ihrerseits festlegen, wie die Fähigkeit ausgeführt werden soll. Der Wechsel in den **Organisation.Ready**-Zustand veranlasst im **Operation**-Teil den Übertritt von **Operation.Passive** nach **Operation.Prep**. In diesem Zustand werden unter Verwendung der gewünschten Ausführungsparameter Vorberechnungen für die potentielle Ausführung der Fähigkeit unternommen. So werden beispielsweise Sollverläufe bestimmt oder die exakten Startpunkte (Zeit- oder Ortspunkt) festgelegt, an denen mit der Ausführung der zur jeweiligen Fähigkeit gehörenden Tätigkeit begonnen werden muss. Ist einer dieser Punkte erreicht, so erfolgt der Übergang von **Operation.Prep** nach **Operation.Run**. Eine zusätzliche Bedingung für diesen Übergang ist noch, dass zuvor der Zustandsübergang von **Organisation.Ready** nach

Organisation.Active vollzogen wurde. Der Wechsel von Organisation.Ready nach Organisation.Active besagt, dass von der die Fähigkeit aufrufenden funktionalen Systemkomponente die Ausführung auch endgültig gewünscht wird, indem das Start-Kommando gegeben wird, welches die Bedingung für den Übergang von Organisation.Ready nach Organisation.Active ist. In dieser Kombination (Organisation.Active, Operation.Run und Supervision.Check) wird die in der jeweiligen Fähigkeit gekapselte Leistung erbracht. Es besteht voller Durchgriff auf benötigte Ressourcen (z.B. Hardware, andere unterlagerte Fähigkeiten etc.).

Das durch einen Kreis umgebene 'H' bedeutet, dass eine Historie über die Zustandsübergänge innerhalb einer Zustandskarte geführt wird. Solange die Ausführung einer Tätigkeit nicht beendet ist, wird bei jedem Wiedereinstieg in die Zustandskarte nicht der Initialisierungszustand sondern der letzte gültige Zustand eingenommen.

Die durch eine Fähigkeit repräsentierte Tätigkeit wird so lange ausgeführt, bis:

- von außen ein Stop-Kommando geschickt wird. Dieses bewirkt, dass von Organisation.Active nach Organisation.Passive gewechselt wird, was wiederum zur Folge hat, dass im Operation-Automat von Operation.Run nach Operation.Passive zurückgewechselt wird.
- die durch die Fähigkeit repräsentierte Leistung ordnungsgemäß erbracht wurde und deshalb im Operation-Teil von Operation.Run nach Operation.Passive gewechselt wird. Dies bewirkt im Umkehrschluss, dass im Organisation-Teil der Zustandswechsel von Organisation.Active nach Organisation.Passive erfolgt.
- eine notwendige Bedingung nicht mehr zutrifft und durch den Supervision-Teil eine entsprechende Benachrichtung erfolgt, was bewirkt, dass sowohl im Operation- als auch im Organisation-Teil in den Zustand Passive gewechselt wird.

In der Regel wird die Nutzung einer ins Passive gesetzten Tätigkeit von der aufrufenden funktionalen Systemkomponente eingestellt. Es ist aber auch möglich durch erneute Initialisierung und darauffolgende Parametrisierung die Fähigkeit wiederholt zu nutzen.

Das vorgestellte Zustandsautomatenmodell kann auf Fähigkeiten unterschiedlichsten Typs angewandt werden. Es bildet einen einheitlichen Rahmen für die internen Abläufe, vor und während der Ausführung der durch eine Fähigkeit repräsentierten Tätigkeit.

Die mit der Fähigkeit assoziierte Leistung wird im Run-Zustand des Operation-Zustandsautomaten erbracht. Dazu ist dem Operation.Run-Zustand ein Ablaufmodell unterlagert, welches je nach Abstraktionsgrad oder Kategorie der Fähigkeit unterschiedlich aufgebaut ist (siehe z.B. Abschnitt 6.3.2.2). Auch die Ablaufmodelle werden in Form von Zustandskarten dargestellt und durch Zustandsautomaten realisiert. Wird die von einer Fähigkeit erwartete Leistung erbracht, so wird vom Experten das Ablaufmodell abgearbeitet.

Den Auftrag zur Ausführung einer Fähigkeit erhält der Experte von einer in der Regel hierarchisch höher angesiedelten funktionalen Systemkomponente. Diese gibt den Wunsch, eine Fähigkeit nutzen zu wollen, derart kund, dass sie die jeweilige Fähigkeit initialisiert, wodurch im Experten eine Instanz der Fähigkeit angelegt und abgearbeitet wird.

Eine einmal initialisierte Fähigkeit befindet sich immer in einem eindeutigen Zustand. Durch die Möglichkeit, Fähigkeiten zu parametrisieren, kann sogar ein und dieselbe Fähigkeit mit unterschiedlichen Parametern mehrmals genutzt werden. Dieser Parallelität sind jedoch Grenzen gesetzt, wenn bei der Ausübung der zur Fähigkeit gehörigen Tätigkeit gleiche Ressourcen (z.B. Hardware) benötigt werden, die nicht in ausreichender Anzahl zur Verfügung stehen. In solchen Fällen muss entschieden werden, welche der um die Ressourcen konkurrierenden Fähigkeiten favorisiert werden soll. Nicht favorisierte Fähigkeiten können als Alternativen vorgehalten werden und im Falle des Scheiterns der favorisierten Fähigkeit als Ersatz dienen.

Details zur software-technischen Implementierung der Basisfunktionalitäten von Fähigkeiten sowie des im folgenden Abschnitt vorgestellten Fähigkeitsnetzes können in [PELLKOFER 03] nachgelesen werden.

6.1.2 Fähigkeitsnetz

Nachdem geklärt ist, wie durch Fähigkeiten repräsentierte Funktionalitäten vom zuständigen Experten zur Ausführung gebracht werden, ist darzulegen, wie Fähigkeiten in einer fähigkeitenorientierten Systemarchitektur für alle funktionalen Systemkomponenten zugänglich gemacht werden können.

Dies umfasst einerseits die Fragestellungen, wie funktionale Systemkomponenten, die Fähigkeiten nutzen wollen, auf die jeweilige Fähigkeit zugreifen können und wie Experten einzelner Fähigkeiten diese Kommandos erhalten. Andererseits muss dieses Wissen über die Fähigkeiten verwaltet werden. Letztendlich ist eine Datenbasis zu schaffen, welche das Wissen über die Fähigkeiten aufnimmt und deren Schnittstellen den Kontakt zum Experten und zu anderen funktionalen Systemkomponenten herstellt.

Es bietet sich an, die in Abbildung 6.1 dargestellte netzartige Struktur für die Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen einzelnen Fähigkeiten beizubehalten. In der Informatik spricht man bei einer derartigen Struktur von einem unidirektionalen, zyklensfreien, gerichteten Graphen. Auf Fähigkeiten angewandt ergibt sich das sogenannte *Fähigkeitsnetz*. Jeder Knoten des Netzes - *Fähigkeitsknoten* genannt - symbolisiert eine Fähigkeit. Die gerichteten Kanten zwischen den Netzknoten geben die Abhängigkeiten zwischen den Fähigkeiten wieder.

Durch das Fähigkeitsnetz sind alle prinzipiell im System verfügbaren Fähigkeiten repräsentiert, unabhängig davon, welcher Kategorie sie angehören oder über welchen Komplexitätsgrad sie verfügen (vgl. Abb. 6.1). Neben dieser statischen Repräsentation der Verfügbarkeit von Fähigkeiten gibt es eine dynamische Komponente. Jeder Fähigkeitsknoten verfügt über eine Schnittstelle, via dieser die aktuelle Verfügbarkeit gesetzt werden

kann. Die dynamische Verfügbarkeit richtet sich nach eventuellen Fehlern oder Ausfällen von notwendigen Systemkomponenten, nach der Güte des momentan vorhandenen Wissens und danach, wieviel gleichartige Fähigkeiten bereits genutzt werden. Die dynamische Verfügbarkeit kann sich ständig ändern, was ein regelmäßiges Überprüfen und Setzen der aktuellen Verfügbarkeit im Fähigkeitenknoten notwendig macht.

Neben den Informationen über die Verfügbarkeit einer Fähigkeit enthält der zur jeweiligen Fähigkeit gehörende Knoten im Fähigkeitennetz eine Referenz, durch welche die Verbindung zwischen Fähigkeit und Experten hergestellt wird. Außerdem geben die Fähigkeitenknoten Auskunft darüber, wieviele Instanzen einer Fähigkeit bereits angelegt wurden und wieviele noch gestartet werden können. Ferner werden Status und Fortschritt von bereits aktivierten Fähigkeiten im zugehörigen Knoten des Fähigkeitennetzes bereitgestellt. Informationen über den Ablauf während oder vor der Ausführung einer durch eine Fähigkeit repräsentierten Tätigkeit können dem Zustands- bzw. Ablaufmodell (vgl. Abschnitt 6.1.1) entnommen werden. All dies sind Informationen, für die sich funktionale Systemkomponenten interessieren, welche Fähigkeiten nutzen wollen. Für den Aktualitätsgrad der Informationen ist der Experte zuständig, der diese im jeweiligen Knoten des Fähigkeitennetzes setzt (siehe Abb. 6.3 links oben). Für Systemkomponenten, welche in der Fähigkeitenhierarchie sehr weit oben angesiedelte Fähigkeiten nutzen wollen, ist es somit transparent, ob und aus welchen Teilfähigkeiten sich eine Fähigkeit zusammensetzt.

Aufgabe des Fähigkeitennetzes ist es nun, das gesammelte Wissen über eine Fähigkeit automatisch im System zu verteilen und es allen funktionalen Systemeinheiten zur Verfügung zu stellen. Damit das Wissen über eine Fähigkeit vom Experten im jeweiligen Fähigkeitenknoten abgelegt und von Fähigkeitsnutzern verwendet werden kann, stellen das Fähigkeitennetz und die Fähigkeitenknoten eigene, spezialisierte Zugriffsfunktionen zur Verfügung (Abbildung 6.3).

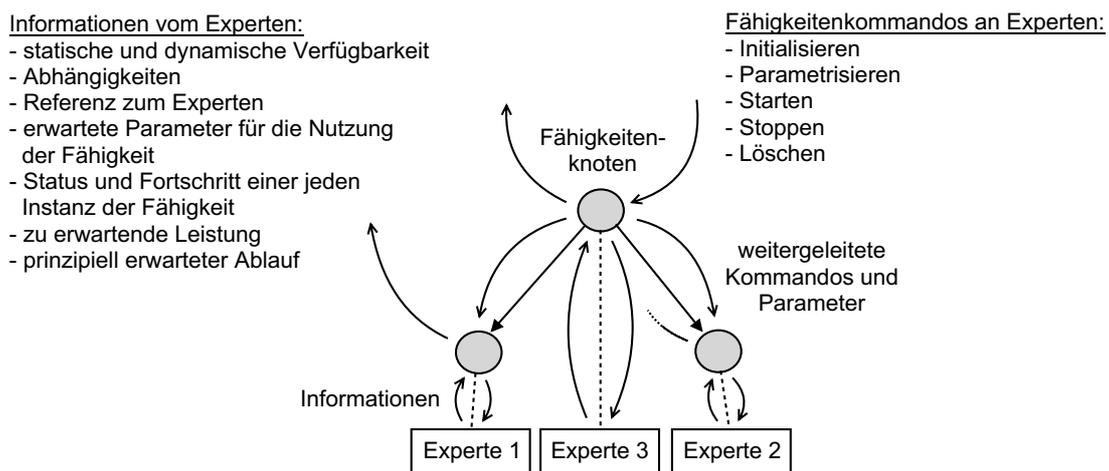


Abbildung 6.3: Funktionalität des Fähigkeitennetzes (nach [PELLKOFER 03])

Neben den Informationen über den Zustand einer Fähigkeit, die vom Experten im jeweiligen Knoten des Fähigkeitsnetzes abgelegt werden, werden auch Kommandos und Parameter zur Aktivierung und Steuerung der Fähigkeiten übers Fähigkeitsnetz verschickt. Die Fähigkeitenknoten bieten dazu eine einheitliche Schnittstelle. Kommandos und Parameter von aufrufenden Systemkomponenten werden automatisch zum Experten der Fähigkeit und zu den Experten der Teilfähigkeiten geleitet. Mit den Steuerkommandos kann eine Instanz einer Fähigkeit initialisiert, parametrisiert, gestartet, gestoppt und gelöscht werden (vgl. Abb. 6.3 rechts oben).

Wie dieser Abschnitt zeigt, dient das Fähigkeitsnetz nicht nur der Repräsentation der in einem autonomen System vorhandenen Funktionalitäten, die in Fähigkeiten gekapselt sind, sondern unterstützt auch deren einheitliche Aktivierung, Steuerung und Synchronisation. Der gesamte Fähigkeiten-Kontrollfluss kann somit auf einheitliche Weise gestaltet und über das Fähigkeitsnetz abgewickelt werden.

6.1.3 Aktivierung

Anhand eines hypothetischen Beispiels soll in diesem Abschnitt erläutert werden, wie der Kontrollfluss zur Steuerung von Fähigkeiten über das Fähigkeitsnetz abgewickelt wird. Das Beispiel und die verwendeten Bezeichnungen für Funktionsaufrufe und Variablen sind denjenigen nachempfunden, wie sie in [PELLKOFER 03] eingeführt wurden³. Dort wird auch das Klassendesign für Fähigkeiten und Fähigkeitenknoten im Zuge der objektorientierten Implementierung des Fähigkeitskonzeptes im Detail erläutert.

Abbildung 6.4 zeigt ein Fähigkeitsnetz mit drei Fähigkeitenknoten 1, 2 und 3. Die Fähigkeitenknoten dienen, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, als Schnittstellen zu den Experten, welche die drei Fähigkeiten anbieten. Eine andere Systemkomponente möchte Fähigkeit 1 nutzen.

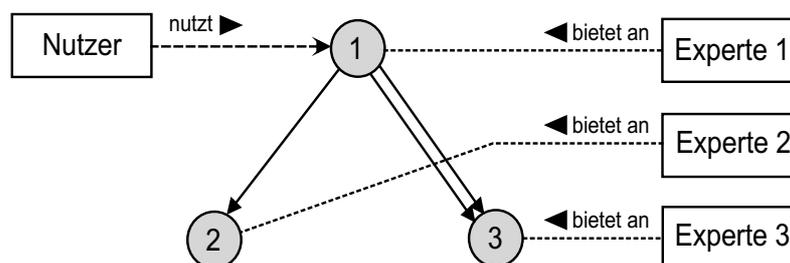


Abbildung 6.4: Beispiel eines Fähigkeitsnetzes mit 3 Experten und einem Nutzer (nach [PELLKOFER 03])

³Aus Konsistenzgründen wird für die Darstellung des Kontrollflusses zur Aktivierung von Fähigkeiten das gleiche Beispiel wie bei [PELLKOFER 03] verwendet.

„Das Fähigkeitsnetz von Abbildung 6.4 spezifiziert, dass die Fähigkeit 1 von den Fähigkeiten 2 und 3 abhängt, wobei zur Ausführung von Fähigkeit 1 zwei Instanzen der Fähigkeit 3 notwendig sind (Fähigkeitenknoten 1 besitzt zwei Verknüpfungen zum Fähigkeitenknoten 3). Durch das Fähigkeitsnetz wird gewährleistet, dass der Nutzer der Fähigkeit 1 diese Abhängigkeiten nicht zu kennen braucht.“ [PELLKOFER 03].

Als erstes ruft der Nutzer der Fähigkeit 1 die Funktion `Initialize()` des zugehörigen Fähigkeitsknotens 1 auf (vgl. Abb. 6.5). Dieser Aufruf führt dazu, dass an den Experten 1 eine Nachricht gesandt wird, die bei diesem dazu führt, dass die Ereignisbehandlungsfunktion `OnInitializeAbility()` aufgerufen wird. Die Übermittlung von Ereignissen zwischen einzelnen funktionalen Systemeinheiten ist in Abbildung 6.5 aus Gründen der Übersichtlichkeit nur vereinfacht dargestellt. Im Zuge der Funktion `OnInitializeAbility()` wird vom Experten 1 eine Instanz der Fähigkeit 1 angelegt. Anschließend wird die Funktion `OnInitialize()` der Instanz der Fähigkeit 1 aufgerufen, wodurch das Zustandsautomatenmodell der jeweiligen Fähigkeitsinstanz gemäß 6.1.1 initialisiert wird.

Das Fähigkeitsnetz leitet, wie bereits erwähnt, automatisch alle Aufrufe der Kommandofunktionen eines übergeordneten Fähigkeitsknotens an die darunterliegenden Knoten weiter. So werden im angeführten Beispiel durch den Aufruf der Funktion `Initialize()` des Fähigkeitsknotens 1 auch die gleichlautenden Funktionen der Fähigkeitsknoten 2 und 3 aufgerufen. Für jede Teilfähigkeit wird nun das bereits oben beschriebene Prozedere mit der Benachrichtigung des zuständigen Experten, dem Anlegen einer Instanz der Teilfähigkeit durch den Experten usw. durchlaufen. An dieser Stelle sei die doppelte Verknüpfung zwischen den Fähigkeitsknoten 1 und 3 erwähnt. Diese führt dazu, dass zwei Instanzen der gleichen Fähigkeit angelegt werden, d.h. dass die mit der Fähigkeit verbundene Funktionalität zweimal zur Ausführung gebracht wird, beispielsweise mit unterschiedlichen Parametern.

Alle Instanzen von Fähigkeiten, die durch den Aufruf `Initialize()` des Nutzers erzeugt werden, gehören ein und demselben Fähigkeitsnetz an, das durch eine eindeutige Netz-ID identifiziert wird. Die Netz-ID bekommt der Nutzer beim Aufruf der Funktion `Initialize()` zurückgeliefert. Neben der Netz-ID besitzt eine jede Instanz einer Fähigkeit auch eine Instanz-ID. Unterschiedliche Instanzen einer Fähigkeit haben verschiedene Instanz-ID's aber die gleich Netz-ID.

Der Nutzer der Fähigkeit 1 kann durch weitere Kommandos Einfluss auf die Ausführung der in der Fähigkeit gekapselten Funktionalität nehmen. Dabei muss die zugehörige Netz-ID angegeben werden. Im aktuellen Beispiel ruft der Nutzer die Funktion `SetParameter()` auf und sendet so dem Experten 1 die zur Erbringung der mit der Fähigkeit 1 assoziierten Leistung notwendigen Parameter. Für den Experten 1 besteht nun die Aufgabe darin, die Parameter für die genutzten Teilfähigkeiten 2 und 3 unter Zuhilfenahme und Auswertung der empfangenen Parameter zu bestimmen und diese über die jeweiligen Fähigkeitsknoten an die zuständigen Experten der Teilfähigkeiten zu schicken.

Bei den Kommandos `Start()`, `Stop()` und `Delete()` gilt der gleiche Automatismus wie für die Funktion `Initialize()`. Ruft der Nutzer beim Fähigkeitsknoten 1 eine dieser Funktionen mit

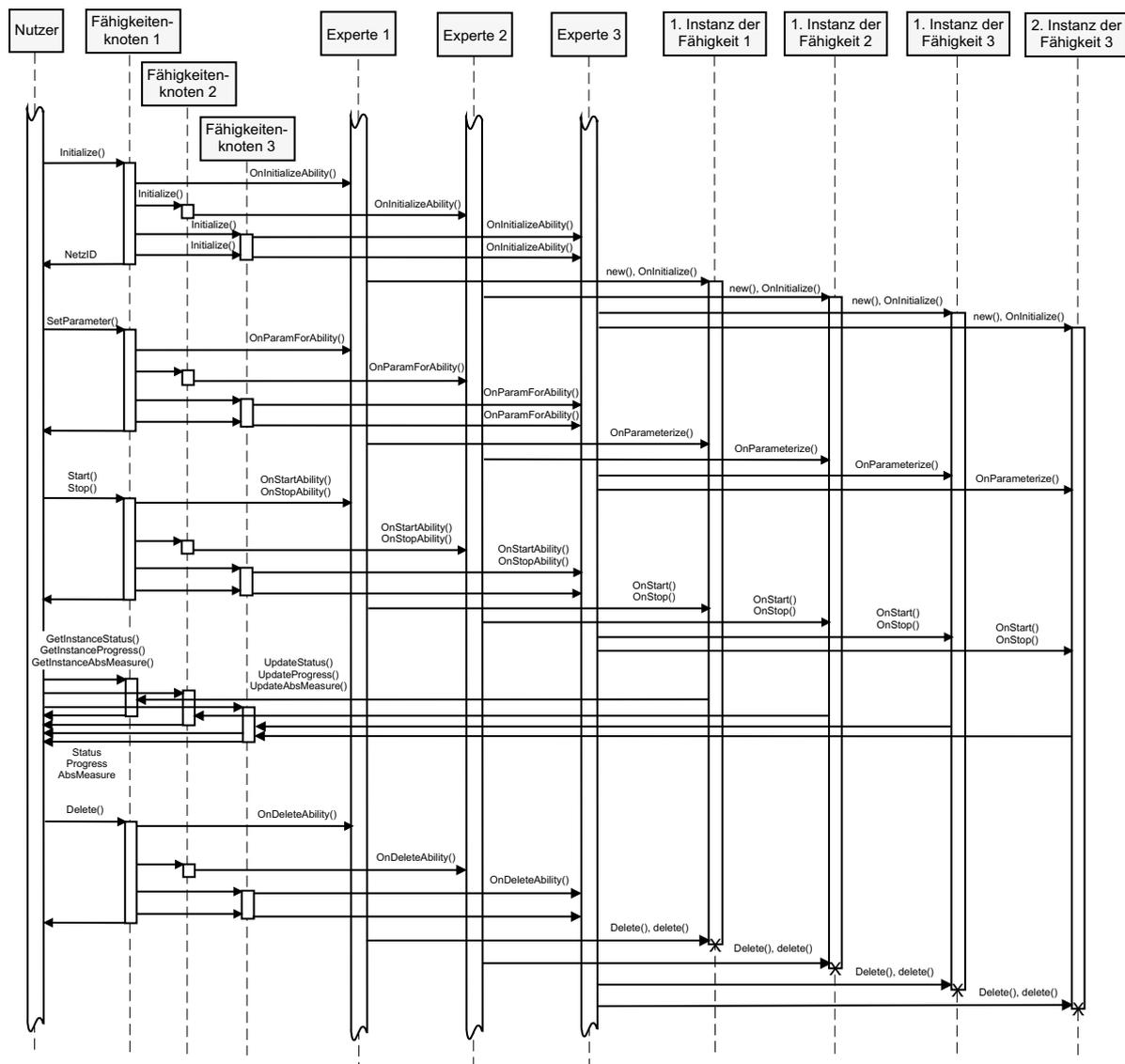


Abbildung 6.5: Sequenzdiagramm für die Aktivierung von Fähigkeiten (nach [PELLKOFER 03] - Darstellung gemäß UML⁴)

der entsprechenden Netz-ID auf, so wird durch einen rekursiven Aufruf dieser Kommando-funktion für die Fähigkeitenknoten 2 und 3 dieses Kommando an die zuständigen Experten gesandt. Mit dem Start()- bzw. Stop()-Kommando besitzt der Nutzer die Möglichkeit, die eigentliche Tätigkeit, welche durch die Fähigkeit repräsentiert wird, gezielt zu starten und zu beenden. Mit dem Delete()-Befehl werden die angelegten Fähigkeiteninstanzen gelöscht.

⁴Eine Einführung in die *Unified Modeling Language* (UML) gibt [OESTEREICH 97].

Mit dem vorgestellten Kontrollfluss steht ein systemweiter und von der Art der Fähigkeit unabhängiger Aktivierungsmechanismus für Fähigkeiten zur Verfügung. Alle funktionalen Systemkomponenten eines autonomen Systems wie zum Beispiel Planungs- und Entscheidungseinheiten können somit in einheitlicher Weise auf die im System zur Verfügung stehenden Fähigkeiten zugreifen.

6.1.4 Monitoring

Während der Ausführung der in Fähigkeiten gekapselten Funktionalitäten kann es zu Fehlern und zu Abweichungen vom vorgegebenen Sollverlauf kommen oder notwendige Voraussetzungen können nicht mehr erfüllt sein. Um derartige Mängel zu detektieren, ist ein Monitoring zu installieren, welches die Verfügbarkeit und Nutzung von Fähigkeiten überwacht.

Die Monitoringaufgabe kann aufgrund unterschiedlicher Ausprägungen in Teilbereiche untergliedert werden. Je nachdem, um welche Überwachungsaufgabe es sich handelt, sind unterschiedliche funktionale Systemeinheiten zuständig und es werden für die jeweilige Aufgabe passende Verfahren angewendet.

6.1.4.1 Überprüfung aller für eine Fähigkeit notwendigen Bedingungen

Wie zu Beginn des Kapitels 6 beschrieben wurde, heißt über eine Fähigkeit zu verfügen, dass alle Bedingungen, welche für die Erbringung der von einer Fähigkeit erwarteten Leistung notwendig sind, erfüllt sein müssen. Dies ist unabhängig davon, ob die mit einer Fähigkeit assoziierte Leistung gerade erbracht wird oder ob die Leistung prinzipiell im System verfügbar ist. Je nachdem welcher Fähigkeitenhierarchieebene (Fertigkeit, Handlungsfähigkeit, Verhaltensfähigkeit, vgl. Abb. 6.1) eine betrachtete Fähigkeit angehört, gestaltet sich die Kontrolle der notwendigen Bedingungen mehr oder weniger aufwendig.

Bei Fertigkeiten, die in der Regel sehr engen Bezug zur Hardware besitzen, können notwendige Bedingungen sein, dass benötigte Hardwareressourcen verfügbar sind. Je nach Bedarf ist zu überprüfen, ob genügend Speichervolumen und ausreichend Rechenleistung verfügbar oder ob die benötigte Sensorik und Aktuatorik funktionstüchtig ist. Es können unterschiedlichste Verfahren und Methoden zum Einsatz kommen, um die Verfügbarkeit der Hardware zu ermitteln. Für den Bereich der Fahrzeugführung werden in Abschnitt 7.1.2.3 typische Methoden präsentiert.

Handelt es sich um Fähigkeiten (Handlungsfähigkeit, Verhaltensfähigkeit), welche in der Fähigkeitenhierarchie höher angesiedelt sind, d.h. sie sind von anderen unterlagerten Fähigkeiten abhängig, so ist zunächst zu überprüfen, ob die unterlagerten Fähigkeiten, von denen die betrachtete Fähigkeit abhängig ist, verfügbar sind. Außerdem sind in Abhängigkeit vom Fähigkeitenabstraktionsgrad neu hinzukommende Bedingungen zu überwachen.

Die Durchführung dieser Verfügbarkeitsüberwachung obliegt dem Experten der jeweiligen Fähigkeit. Dieser wendet für eine Fähigkeit typische Kontrollverfahren an, um das

Vorliegen aller Bedingungen zu überprüfen, welche für die Existenz einer Fähigkeit notwendig sind. Für die Überprüfung eventueller Abhängigkeiten einer Fähigkeit von unterlagerten Fähigkeiten werden vom Experten Funktionen des Fähigkeitsnetzes aufgerufen, welche die Verfügbarkeit von unterlagerten Fähigkeiten kontrollieren. Der Verfügbarkeitsstatus der jeweiligen Fähigkeit wird vom Experten nach Abschluss der Verfügbarkeitsüberprüfung im zugehörigen Knoten des Fähigkeitsnetzes veröffentlicht.

6.1.4.2 Überwachung der Ausführung einer Tätigkeit

Bei der Ausführung der mit einer Fähigkeit assoziierten Tätigkeit kann es zu Störungen, Fehlern, Verzögerungen etc. kommen. Voraussetzung für eine effiziente Detektion solcher Abweichungen vom Sollverlauf sind allgemeine Beurteilungsmaße, mit deren Hilfe der Ausführungsfortschritt bewertet werden kann. Die Beurteilungsmaße sind derart allgemein zu halten, dass sie bei allen Fähigkeiten, unabhängig davon, welcher Fähigkeitenkategorie sie angehören, angewendet werden können.

Sämtliche Maße, welche den zeitlichen Fortschritt einer Tätigkeit beurteilen, wie z.B. die beiden folgenden Gütemaße (vgl. Abbildung 6.6), sind derart allgemeine Fortschrittsmaße:

1. Absolute Zeitdifferenz Δt :

Die absolute Zeitdifferenz Δt beschreibt die für die Ausführung der zur Fähigkeit gehörenden Tätigkeit veranschlagte Zeitspanne:

$$\Delta t = t_{End} - t_{Begin} \quad (6.1)$$

Δt wird in Sekunden gemessen. Bei einer Fähigkeit ohne zeitliche Begrenzung ist die absolute Zeitdifferenz unendlich.

2. Aktuelle, normierte Zeit t_{Norm} :

Die normierte Zeit t_{Norm} gibt an, wieviel Prozent der Zeit seit dem Beginn der Nutzung der jeweiligen Fähigkeit vergangen sind. Sie berechnet sich aus der seit dem Start vergangenen Zeitspanne $t - t_{Begin}$ dividiert durch die für die Tätigkeit vorgesehene absolute Zeit Δt :

$$t_{Norm}(t) = \frac{t - t_{Begin}}{\Delta t} \quad (6.2)$$

t_{Norm} besitzt bei t_{Begin} den Wert 0, wächst im Laufe der Ausübung der Tätigkeit stetig und erreicht beim vorgesehenen Ende t_{End} den Wert 1. Kommt es bei der Ausführung zu Störungen, so kann t_{Norm} am Ende kleiner als 1 sein, wenn die Tätigkeit schneller als vorgesehen abgewickelt wurde, und größer als 1, wenn es zu Verzögerungen gekommen ist.

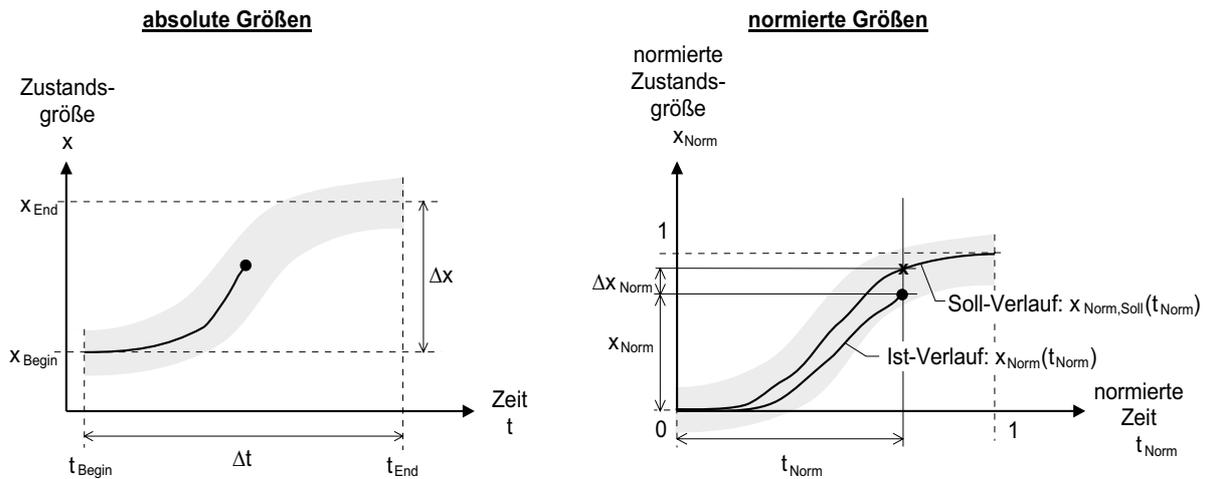


Abbildung 6.6: Fortschrittsmaße für Fähigkeiten

Bei einigen Fähigkeitenkategorien (z.B. Wahrnehmung, Aktionsausführung, ...), bei denen physikalische Größen die Bedeutung von Zustandsgrößen für die jeweilige Fähigkeit haben, können neben dem zeitlichen Fortschritt auch die Verläufe dieser Zustandsgrößen bewertet werden. Zur Beurteilung, inwieweit die aktuellen Zustandsgrößen einer derartigen Fähigkeit von ihren Sollverläufen abweichen, werden folgende allgemeine Bewertungsmaße eingeführt (vgl. Abbildung 6.6):

3. Absolute Zustandsänderung Δx :

Während der Ausübung der mit einer Fähigkeit assoziierten Tätigkeit werden eine oder mehrere physikalische Größen im Zeitintervall Δt von einem Anfangswert x_{Begin} in einen Endwert x_{End} überführt. Für jede einzelne dieser Zustandsgrößen wird die Änderung Δx angegeben:

$$\Delta x = x_{End} - x_{Begin} \quad (6.3)$$

Die Einheit von Δx hängt davon ab, welche physikalischen Größen im Rahmen der Nutzung einer Fähigkeit verändert werden.

4. Aktuelle, normierte Zustandsgröße x_{Norm} :

x_{Norm} berechnet sich in analoger Weise wie die normierte Zeit:

$$x_{Norm}(t) = \frac{x(t) - x_{Begin}}{\Delta x} \quad (6.4)$$

Die Größe x_{Norm} gibt an, um wieviel sich bereits die betrachtete Zustandsgröße zum Zeitpunkt t bezogen auf die absolute Zustandsänderung Δx verändert hat.

5. Normierte Abweichung der Zustandsgröße vom Sollverlauf Δx_{Norm} :

Die bis dato vorgestellten Gütemaße beziehen sich nur auf absolute bzw. normierte Start-/Endwerte. Sie sagen jedoch nichts darüber aus, wie der Verlauf einer Zustandsgröße zwischen Start- und Endwert sein soll und wie stark eine Zustandsgröße zum Zeitpunkt t vom Sollverlauf abweicht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass x_{Norm} nicht zwangsläufig linear mit der normierten Zeit t_{Norm} ansteigen muss, sondern auch Phasen mit nichtlinearem Anstieg von x_{Norm} auftreten können (z.B. Sprünge).

Die Abweichung einer normierten Zustandsgröße x_{Norm} vom normierten Sollverlauf $x_{Norm,Soll}$ zum Zeitpunkt t_{Norm} ist Δx_{Norm} und ergibt sich zu:

$$\Delta x_{Norm}(t_{Norm}) = x_{Norm,Soll}(t_{Norm}) - x_{Norm}(t_{Norm}) \quad (6.5)$$

Δx_{Norm} ist ein Maß dafür, ob und wie stark eine Größe hinter dem Sollverlauf hinterherhinkt bzw. vorauseilt. Bei Verzögerungen ist Δx_{Norm} positiv, beim Vorauseilen negativ. Entspricht der Istverlauf einer normierten Zustandsgröße x_{Norm} annähernd dem vorgesehenen Sollverlauf, so ist Δx_{Norm} nahezu null.

Die vorgestellten Fortschrittsmaße werden vom Experten einer Fähigkeit während der Ausführung der zur jeweiligen Fähigkeit gehörenden Tätigkeit bestimmt und im jeweiligen Fähigkeitenknoten des Fähigkeitennetzes veröffentlicht. Die einmalig bestimmten Gütemaße stehen somit sämtlichen funktionalen Systemkomponenten zur Verfügung.

Gütemaße für Fähigkeiten des obersten Abstraktionsgrades, welche keinen unmittelbaren Bezug zu Zustandsgrößen besitzen (z.B. Verhaltensfähigkeiten), werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet⁵.

Gemäß der zugrundegelegten hierarchischen Systemarchitektur (vgl. Abschnitt 3.3) hat sich auch bei der Ausführungsüberwachung einer Tätigkeit eine mehrstufige Struktur etabliert. Für die Bewertung des Fortschritts anhand der Gütemaße sind aufgrund der für die jeweilige Monitoringstufe typischen Abstraktionsniveaus verschiedene Module innerhalb einer hierarchisch aufgebauten funktionalen Systemarchitektur zuständig.

Überwachung der Zustandsgrößen einer Fähigkeit durch den Experten

Abweichungen von Zustandsgrößen während der Ausführung der zu einer Fähigkeit gehörenden Tätigkeit können bereits durch den zuständigen Experten anhand der vorgestellten Gütemaße erkannt und kompensiert werden. Durch Adaption der Fähigkeitenparameter kann der Istverlauf einer abweichenden Zustandsgröße dem gewünschten Sollverlauf angepasst werden.

Die ausschließliche Betrachtung der Zustandsgrößen und der Fortschrittsmaße einer Fähigkeit durch den Experten kann aber auch kontraproduktiv sein. Dadurch dass vom jeweiligen Experten ausschließlich versucht wird, entstandene Abweichungen der Zustandsgrößen zu kompensieren, ohne die eigentliche Ursache zu kennen, kann es dazu kommen,

⁵An dieser Stelle sei auf [PELLKOFER 03] verwiesen.

dass durch die starre Adaption, die zwar in den meisten Fällen positiv wirkt, der negative Effekt eintritt, dass die Abweichungen der Zustandsgrößen vergrößert statt verkleinert werden.

Um derartige Abweichungen bzw. Fehler zu erkennen, ist aber mehr Wissen als die bloße Kenntnis der Gütemaße nötig. Über einen entsprechenden Wissenshorizont verfügt eine expertenunabhängige Kontrollinstanz, welche in der Systemhierarchie über dem Experten angesiedelt ist.

Kontrolle der Ausführung einer Tätigkeit durch eine expertenunabhängige Überwachungseinheit

Treten trotz der auf Seiten des Experten vorhandenen Kontroll- und Adaptionmöglichkeiten Fehler in der Ausführung einer Tätigkeit auf, so können diese durch eine expertenunabhängige Kontrollinstanz beurteilt werden. Neben den bekannten Gütemaßen verfügt eine solche Überwachungseinheit über weit mehr Informationen, um die Abweichungen in der Ausführung einer Tätigkeit bewerten zu können.

Aufgrund von statischen Vorgaben bzw. durch dynamische Anpassung (Lernen) wird von der jeweiligen Kontrolleinheit ein Korridor um die Sollkurve einer jeden Zustandsgröße definiert (siehe grau unterlegter Bereich in Abbildung 6.6). Stimmt der aktuelle Wert einer Zustandsgröße nicht mit dem Sollwert überein, liegt dieser aber innerhalb des Akzeptanzkorridors, so wird dieser Fehler noch toleriert. Erst wenn Zustandsgrößen außerhalb des vorgesehenen Akzeptanzbereichs liegen, wird die Ausführung der jeweiligen Tätigkeit als gescheitert gewertet.

Wie die Gütemaße, der Verfügbarkeitsstatus, der Status des Zustandsautomatenmodells etc. so wird auch der Ausführungsstatus einer Fähigkeit im zugehörigem Fähigkeitenknoten angezeigt und ist somit im System verfügbar.

Die beste Ausführung einer Tätigkeit ist nutzlos, wenn sich die Rahmenbedingungen für die Nutzung einer Fähigkeit grundlegend geändert haben und deshalb die Voraussetzungen für die Ausführung der mit einer Fähigkeit assoziierten Tätigkeit nicht mehr vorliegen. Derartige Beurteilungen der adäquaten Nutzung von Fähigkeiten können aber nur im Situationskontext erfolgen und bedürfen einer Kontrollinstanz, welche die Nutzung einer Fähigkeit im Situationszusammenhang bewertet.

Situationsbezogene Überwachung von Fähigkeiten durch eine zentrale Kontrolleinheit

Aufgrund der bis dato beschriebenen Monitoringeinrichtungen kann im Rahmen einer situationsbezogenen Überwachung davon ausgegangen werden, dass die eingesetzten Fähigkeiten entsprechend den Vorgaben angewandt werden. Kommt es zu inakzeptablen Abweichungen bei der Ausführung von Tätigkeiten, werden diese bereits durch die Kontrollmechanismen des Experten bzw. der expertenunabhängigen Überwachungseinheiten detektiert und gemeldet.

Aber auch bei Fähigkeiten, welche wie vorgesehen angewendet werden, können Konflikte auftreten, und zwar dann, wenn sich die Rahmenbedingungen für die Nutzung der jeweiligen Fähigkeiten während der Ausführung ändern. So kann sich beispielsweise die Situation grundlegend ändern oder die zugrunde gelegten Ziele werden aus gegebenen Anlass neu definiert. Aktuell genutzte Fähigkeiten können dadurch nicht mehr passend sein oder sogar im Widerspruch zu den aktuell vorliegenden Rahmenbedingungen stehen. Derartige Konflikte zu erkennen ist Aufgabe einer zentralen Kontrollinstanz, die neben Zustandsgrößen und Gütemaßen auch über Wissen über die aktuelle Situation und die verfolgten Ziele besitzt. Innerhalb der hierarchisch gestaffelten Monitoringeinrichtungen ist die zentrale Überwachung im Situationskontext über den Kontrollmechanismen sowohl des Experten als auch anderer Überwachungsinstanzen angesiedelt.

Welche funktionalen Einheiten einer Systemarchitektur neben dem Experten die Überwachungsaufgaben ausführen können und wie dies im EMS-Vision System realisiert ist, kann in Abschnitt 6.2 und im Kapitel 8 nachgelesen werden.

6.1.5 Vorhersage

Aufgrund der Tatsache, dass gesammeltes Wissen über die in Fähigkeiten gekapselten Funktionalitäten in Form von Ablaufmodellen, Verfügbarkeitsmodi, Fortschrittsmaßen etc. im gesamten System mittels des Fähigkeitsnetzes zur Verfügung steht, kann dieses Wissen auch zur Vorhersage der von einer Fähigkeit zu erwartenden Leistung verwendet werden. Diese 'Vorhersage'-Funktion ist besonders für Entscheidungs- und Planungsmodul eines autonomen Systems von Bedeutung.

Über den jeweiligen Knoten im Fähigkeitsnetz kann von einer beliebigen Systemkomponente die Anfrage an den Experten einer Fähigkeit erfolgen, die von einer Fähigkeit zu erwartende Leistung innerhalb eines vorzugebenden Parameter- und Zeitbereichs voraussupradizieren. Dazu ist die Prädiktionsfunktion des jeweiligen Fähigkeitsknotens aufzurufen. Der Auftrag wird wie bei den anderen Fähigkeitenfunktionen (z.B. Aktivierungsfunktionen) an den Experten weitergeleitet, der die Prädiktion durchführt und die Ergebnisse wiederum über den entsprechenden Knoten im Fähigkeitsnetz zur Verfügung stellt. Es ist dabei unwesentlich, in welchem Zustand des Operation-Automaten sich die jeweilige Fähigkeit befindet.

Für die Prädiktionsaufgabe nutzt der Experte einer Fähigkeit sämtliches ihm zur Verfügung stehende Wissen. Neben den allgemein im Fähigkeitsnetz verfügbaren Informationen ist dies auch sein Expertenwissen darüber, wie die mit einer Fähigkeit assoziierte Leistung zu erbringen ist. Mit Hilfe des Ablaufmodells können die einzelnen Phasen einer Fähigkeit vorausbestimmt werden. Bei Fähigkeiten, bei denen physikalische Größen den Rang von Zustandsvariablen besitzen, können für diese Zustandsgrößen anhand der zugehörigen systemdynamischen Zustandsgleichungen die Solltrajektorien generiert werden.

Wie die eigentliche Ausführung einer Tätigkeit so ist auch deren bedarfsmäßige Prädiktion Aufgabe des zuständigen Experten, da dieser über sämtliches Wissen, das hierfür

notwendig ist, verfügt. Eine separate Repräsentation der Abläufe bei der Ausführung einer Tätigkeit in anderen funktionalen Systemmodulen ist daher nicht notwendig.

Durch die Vorhersage des von einer Fähigkeit zu erwartenden Verhaltens kann jeder potenzielle Nutzer einer Fähigkeit vor deren Aktivierung klären, wie diese ablaufen wird und kann somit gezielt Fähigkeiten einsetzen. Es muss allerdings in Betracht gezogen werden, dass, je weiter man 'vorausschaut', der während der Ausführung erzielte Istverlauf je nach auftretenden Störungen stark vom prädierten Sollverlauf abweichen kann. In solchen Fällen kommt dann das im Abschnitt 6.1.4 vorgestellte Fähigkeitenmonitoring zum Tragen.

6.2 Das Fähigkeitenkonzept im 'EMS-Vision' System

Wie beim Menschen so ist auch bei autonomen technischen Systemen das Wissen über die eigene Leistungsfähigkeit eine Grundvoraussetzung für eigenständiges Entscheiden und Agieren. Das im vorherigen Abschnitt 6.1 vorgestellte Fähigkeitenkonzept stellt einen Ansatz dar, wesentliche Fähigkeitenmerkmale, so weit zu abstrahieren, dass sie allgemeine Gültigkeit besitzen. Es wird dadurch möglich, typische Eigenschaften von Fähigkeiten auf autonome technische Systeme zu übertragen.

Es ist dabei unerheblich, um welche Arten von technischen Systemen es sich handelt oder welche Systemarchitekturen den autonomen Systemen zugrunde liegen. Sowohl bei deliberativen (planenden) als auch bei reaktiven Systemarchitekturen können Fähigkeiten und deren explizite Repräsentation zentraler Bestandteil sein. Durch die explizite Repräsentation von Fähigkeiten wird der verhaltensorientierte Charakter einer Systemarchitektur hervorgehoben.

Bei Systemarchitekturen für autonome Roboter haben sich in letzter Zeit hybride verhaltensbasierte Ansätze durchgesetzt, welche planende mit reaktiven Methoden kombinieren, was R. Arkin folgendermaßen zusammenfasst:

„The integration of knowledge-based deliberation and reactive control requires the confrontation of many difficult problems. Each of these methods addresses different subsets of the complexities inherent in intelligent robotics. The hybrid system's architect contends that neither approach is entirely satisfactory in isolation but that both must be taken into account to produce an intelligent, robust and flexible system.” [ARKIN 98, S. 211].

Beim EMS-Vision System handelt es sich um ein derart hybrides System, welches sowohl planende als auch reaktive Komponenten enthält und dem eine verhaltensbasierte Systemarchitektur zugrunde liegt (vgl. [ARKIN 98]). Durch die Einführung des Fähigkeitenkonzepts kommen im EMS-System im Vergleich zur hierarchisch strukturierten Systemarchitektur gemäß Abschnitt 3.3 nun auch verhaltensbasierte und reaktive Aspekte

stärker zur Geltung. Aber allein schon wegen der Tatsache, dass die Fähigkeiten explizit im System repräsentiert sind, kann es sich beim EMS-Vision System um kein rein reaktives System im Sinne von [BROOKS 86] handeln.

Da es bei der Integration des Fähigkeitenkonzepts ins EMS-Vision System primär um die systemweite Repräsentation von Fähigkeiten und deren einheitliche Nutzung geht, d.h. um die Verwaltung von Fähigkeiten in einer Datenbasis mit den zugehörigen Zugriffsfunktionen, ist es naheliegend, die bereits vorhandene Funktionenvielfalt der zentralen dynamischen Wissensbasis (DKB) des EMS-Systems zur Verteilung und Synchronisation von Wissen zu nutzen. Das Fähigkeitsnetz wird deshalb als zum Szenenbaum usw. parallele Datenbasis in die zentrale Wissensrepräsentation mit aufgenommen (vgl. Abschnitt 3.5). Wie dies im Einzelnen realisiert wurde, kann in [PELLKOFER 03] nachgelesen werden.

Im Zuge der Entwicklung des EMS-Vision Systems wurden basierend auf dem vorgestellten Fähigkeitenkonzept eine Reihe von Fähigkeiten in unterschiedlichsten Bereichen implementiert. Fähigkeiten zur Umfeldwahrnehmung, beispielsweise von positiven Hindernissen (Fremdfahrzeuge etc.) oder negativen Hindernissen (z.B. Gräben), werden in [HOFMANN] näher beschrieben. In [PELLKOFER 03] kann die Implementierung der Fähigkeiten zur Blickrichtungssteuerung nachgelesen werden.

6.3 Spezielle Kategorien von Fähigkeiten

In den folgenden Abschnitten werden speziell Fähigkeiten zur inertial-basierten Wahrnehmung des Fahrzeugeigenzustands und zur Fortbewegung eines Kraftfahrzeugs vorgestellt.

6.3.1 Fähigkeiten zur Wahrnehmung des Eigenzustands

Wie in Kapitel 5 dargestellt, gibt es eine Fülle von Funktionalitäten, welche auf Basis von Inertialsensordaten und unter Verwendung rekursiver Schätzverfahren etwa zur Bestimmung der globalen und lokalen Fahrzeugposition oder zur Fahrzeugeigenzustandsschätzung verwendet werden. Gestützt werden die inertialbasierten Wahrnehmungsfunktionen mit Daten, welche von visuellen Wahrnehmungsprozessen stammen. Wie Wahrnehmungsfunktionalitäten in das Fähigkeitenkonzept eingebettet werden können, wird in diesem Abschnitt erläutert.

Einer der Grundgedanken des entwickelten Fähigkeitenkonzepts ist, die vorhandene Leistungsfähigkeit eines Systems explizit zu repräsentieren, damit dieses Wissen in einheitlicher, integraler Form im gesamten System zur Verfügung steht. Dies betrifft im Besonderen den Bereich der Wahrnehmung, da in jedem System die Wahrnehmung des Eigenzustands und der Umwelt zentraler Bestandteil ist und dadurch erst die Generierung eines internen Weltbildes ermöglicht wird. Dabei ist es unerheblich, um welche Wahrnehmungsaufgaben es sich letztendlich handelt und mit welchen Sensoren bzw. Verfahren diese realisiert werden.

Stehen beispielsweise im Bereich der Wahrnehmung Fähigkeiten nicht zur Verfügung, so hat dies in den meisten Fällen unmittelbar Auswirkungen auf das vom System realisierbare Verhalten. Angewandt auf den Betrieb eines (semi-)autonomen Kraftfahrzeugs bedeutet dies, dass z.B. beim Fehlen der Wahrnehmungsfähigkeit, benachbarte Fahrstreifen zu detektieren und zu vermessen, ein 'Spurwechsel'-Manöver nicht ausgeführt werden kann.

Wie zu Beginn des Abschnitts 6.1 beschrieben, wird für ein autonomes System gefordert, sämtliche im System verfügbaren Fähigkeiten - darunter auch Wahrnehmungsfähigkeiten - für Planungs- und Entscheidungskomponenten zugänglich zu machen, da das Wissen über die eigene Leistungsfähigkeit elementare Grundlage für diese ist. Dieser Ansatz wird auch in [WASSON 99] verfolgt, wo einzelne Aufgaben eines Wahrnehmungsagenten zur Erfassung der Umwelt im Sinne von potentiell verfügbaren Leistungen (Fähigkeiten) angesehen werden. Wie Umfeldwahrnehmungsfunktionen gemäß dem hier vorgestellten Fähigkeitenkonzept im EMS-System gehandhabt werden, wird z.B. in [HOFMANN] erläutert.

Analog zur Umfeldwahrnehmung lassen sich auch Funktionen zur Erfassung systemeigener Zustandsgrößen, welche in Kapitel 5 exemplarisch für Kraftfahrzeuge vorgestellt werden, im Sinne des präsentierten Fähigkeitenkonzepts darstellen. Dieses Vorgehen ist für den Bereich der inertialbasierten Eigenzustandsschätzung noch wenig verbreitet, da stets davon ausgegangen wird, dass sämtliche Funktionen zur Wahrnehmung des Eigenzustands ständig aktiv sind und nicht über Konsequenzen nachgedacht wird, die sich aus einer Nichtverfügbarkeit einzelner Wahrnehmungsfunktionen ergeben.

Gemäß dem Fähigkeitenkonzept können Wahrnehmungsfunktionalitäten als Fähigkeiten repräsentiert werden. Zur Beschreibung der Vorgänge vor, während und nach der Nutzung von Wahrnehmungsfähigkeiten, unabhängig davon, welchen Abstraktionsgrad die Fähigkeiten besitzen, dient das Zustandsautomatenmodell nach Abbildung 6.2. Die von einer Wahrnehmungsfähigkeit zu erwartende Leistung wird typischerweise im Zustand `Operation.Run` erbracht. In diesem Zustand kommen die in Kapitel 5 für die jeweilige Fähigkeitenhierarchiestufe entwickelten Verfahren und Konzepte zum Einsatz. Aufgrund der Vereinheitlichung im Rahmen des Fähigkeitenkonzepts erfolgt die Aktivierung von Wahrnehmungsfähigkeiten aus dem Bereich der Eigenzustandsschätzung nach dem allgemeinen Schema von Abschnitt 6.1.3.

Eine Reihe von Wahrnehmungshandlungen zur Eigenzustandsbestimmung in Kraftfahrzeugen, wie sie in Kapitel 5 vorgestellt werden, wurden im Sinne des Fähigkeitenkonzepts implementiert. Um welche inertialbasierten Wahrnehmungshandlungen es sich im Einzelnen handelt, ist der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

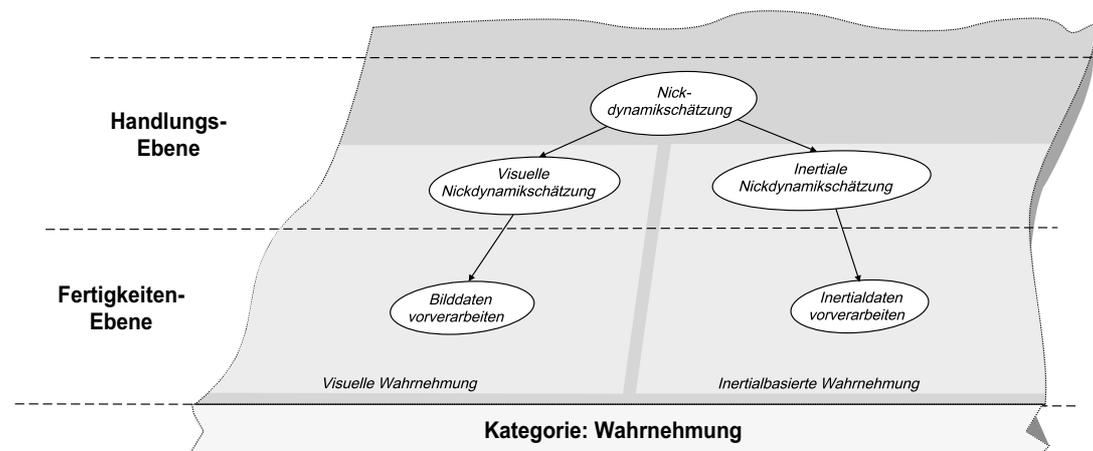
Weitere Handlungsfähigkeiten zur Wahrnehmung des Eigenzustands (z.B. Wank-, Längsdynamikschätzung) lassen sich nahtlos der Aufstellung in Tabelle 6.1 hinzufügen, wurden aber im Rahmen dieser Arbeit nicht bearbeitet.

Auch bei Wahrnehmungsfähigkeiten gibt es unterschiedliche Hierarchiestufen, die aufeinander aufbauen. Die in Tabelle 6.1 aufgelisteten Wahrnehmungshandlungen hängen alle von unterlagerten Wahrnehmungsfertigkeiten ab, in denen ständig wiederkehrende

Tabelle 6.1: Inertialbasierte Wahrnehmungshandlungen

Wahrnehmungshandlung	Beschreibung
Starrkörperschätzung	Schätzung der Zustandsvariablen eines als Starrkörper abstrahierten Kraftfahrzeugs mit Hilfe der Newton'schen Gleichungen
Nickdynamikschätzung	Fusionierende Schätzung des Fahrzeugnickwinkels
Querdynamikschätzung	Schätzung typischer Querdynamikparameter
Lokale Positionschätzung	Schätzung der Fahrzeugposition innerhalb eines lokalen Koordinatensystems
Globale Positionsschätzung	Schätzung der Fahrzeugposition im Weltkoordinatensystem

Tätigkeiten wie das Filtern von Sensorsignalen durchgeführt werden. In Abbildung 6.7 ist exemplarisch für die Wahrnehmungshandlungen 'Nickdynamikschätzung' dargestellt, wie deren Abhängigkeiten von unterlagerten Wahrnehmungsfertigkeiten sind.

**Abbildung 6.7:** Inertialbasierte Wahrnehmungsfähigkeiten

Wie in Abschnitt 5.4 detailliert beschrieben, werden im Rahmen der Nickdynamikschätzung (vgl. Abbildung 6.7) sowohl inertialbasierte als auch visuelle Verfahren zur Bestimmung nickdynamischer Zustandsgrößen eingesetzt. Man erreicht so eine robuste Zustandsschätzung, da Mängel einer Methode durch das jeweils andere Verfahren kompensiert werden. Fällt ein Variante zur Nickdynamikschätzung aus, so kann - zwar mit geringerer Güte - die jeweils andere Wahrnehmungsfähigkeit zur Nickdynamikschätzung weiter genutzt werden.

6.3.2 Fähigkeiten zur Fortbewegung bei einem (semi-)autonomen Kraftfahrzeug

Nachdem im vorherigen Abschnitt dargestellt wurde, wie Wahrnehmungsfunktionalitäten - im Speziellen Verfahren und Methoden zur Bestimmung des Fahrzeugeigenzustands - mit dem Fähigkeitenkonzept verknüpft werden können, wird in diesem Abschnitt gezeigt, dass auch Fortbewegungsfunktionen als Fähigkeiten interpretiert und repräsentiert werden können. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Entwicklung des EMS-Vision Systems das autonome bzw. assistierende Führen von Kraftfahrzeugen im Vordergrund steht, erfolgt eine Einschränkung auf die Fortbewegung von Kraftfahrzeugen. Das Fähigkeitenkonzept lässt sich aber auch auf andere Gattungen mobiler Roboter wie Indoor-Roboter und Krabber oder auf Manipulatoren übertragen.

Für den Einsatz von (semi-)autonomen Fahrzeugen im Bereich des Kraftfahrverkehrs auf ausgebauten Straßen wurden bereits systematische Untersuchungen unternommen, um typische Fahrmanöver zu klassifizieren, schematisch zu beschreiben und in eine Systematik einzuordnen. In [NAGEL & ENKELMANN 91] wird postuliert, dass eine Menge von 17 Fahrmanövern ausreicht, um bei Ausklammerung der Notfallmanöver eine Fahrt sowohl auf Autobahnen als auch im innerstädtischen Verkehr vollständig zu beschreiben. [OKUNO ET AL. 92] spezifizieren verbal eine Menge von 12 Fahrprogrammen, die benötigt werden, um mit einem Fahrzeug automatisch auf Autobahnen zu fahren. Die Anzahl der Fahrprogramme ist nach oben hin offen, d.h. es können beliebig viele weitere Fahrprogramme hinzugefügt werden. In [NAGEL 94] wird ein Ansatz zur formalen Beschreibung von Fahrten im Straßenverkehr auf begrifflicher Ebene durch Aktionsfolgen behandelt. [TÖLLE 96] reduziert die in [NAGEL & ENKELMANN 91] vorgestellten 17 Fahrmanöver auf eine Menge von 9 Basismanövern und führt einen einheitlichen Parametersatz für alle Fahrmanöver ein. Für ein ausschließlich auf zweispurige, unidirektionale Straßen eingeschränktes Szenario wird von [ÖZGÜNER ET AL. 97b] ein Satz von 12 diskreten Fahrzuständen definiert, welche Fahrmanövern entsprechen.

All diesen Ausführungen ist gemein, dass sie sich ausschließlich auf den Straßenverkehr beziehen, d.h. es werden keine Fahrmanöver betrachtet, die beispielsweise für Fahrten abseits befestigter Wege benötigt werden. Außerdem erfolgen die Betrachtungen in keinem systemweiten Kontext, d.h. es wird nur der Bereich der Fahrzeugführung untersucht und formal beschrieben. Eine Einbettung der Fahrmanöver in eine gesamtheitliche Systemarchitektur für (semi-)autonome Fahrzeuge, in der alle Systemfunktionalitäten gleichwertig in Form von Fähigkeiten repräsentiert werden, findet nicht statt.

In [SIEDERSBERGER & DICKMANN 00] wurde am Beispiel des 'Abbiege'-Manövers gezeigt, dass mit Hilfe eines verallgemeinerten Ablaufmodells für Fähigkeiten auch Fahrmanöver in einheitlicher Form repräsentiert werden können. Das vorgestellte Fähigkeitenkonzept für autonome mobile Agenten ist aus diesen Ansätzen hervorgegangen. Fahrmanöver lassen sich dabei ebenso wie die im vorigen Abschnitt 6.3.1 vorgestellten Wahrnehmungsfunktionalitäten ins Fähigkeitenkonzept integrieren. Gemäß Abbildung 6.1 stellen Fahrmanöver Handlungen im Bereich der Fortbewegung dar, die durch Fahrhand-

lungsfähigkeiten repräsentiert werden. [JÜRGENSOHN 97] bezeichnet Fahrmanöver auch als Fahrhandlungen. Die Einordnung von Fahrmanövern in die Handlungs-Ebene ist insofern schlüssig, als dass für die Ausführung einer komplexen Fahrhandlung (z.B. Abbiegen) einfachere, automatisch ablaufende Fertigkeiten zur Fortbewegung benötigt werden, die der untersten Fähigkeitenhierarchieebene angehören. Fahrmanöver mit ihrem integralen Charakter stellen demzufolge nicht das unterste Abstraktionsniveau in der Hierarchie von Fortbewegungs-Fähigkeiten für Kraftfahrzeuge dar. Wie Fahrhandlungen/-manöver und die von diesen genutzten Fortbewegungsfertigkeiten im systemdynamischen (regelungstechnischen) Sinne verstanden werden sowie die damit verbundene Lösung des in der KI-Literatur erwähnten 'symbol grounding'-Problems werden in Abschnitt 7.1 näher erläutert.

Abbildung 6.8 zeigt eine Auswahl möglicher Fahrhandlungsfähigkeiten eines Kraftfahrzeugs mit ihren Abhängigkeiten von unterlagerten Fertigkeiten und die Einordnung in die Fähigkeitenhierarchie gemäß Abbildung 6.1.

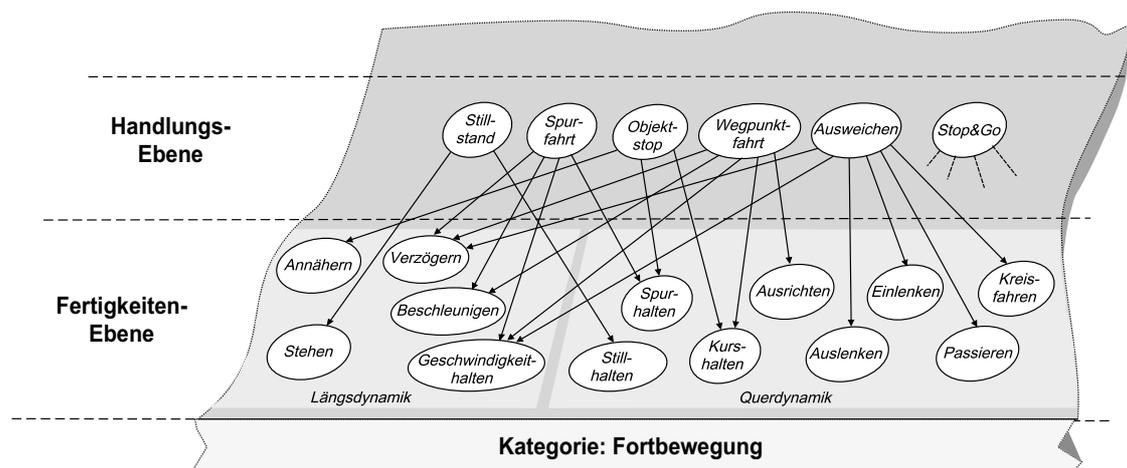


Abbildung 6.8: Fortbewegungsfähigkeiten eines Kraftfahrzeugs

6.3.2.1 Besonderheiten von Fortbewegungs-Fähigkeiten

Der Abbildung 6.8 ist nicht nur zu entnehmen, dass Fahrhandlungsfähigkeiten von unterlagerten Fertigkeiten abhängig sind, sondern es wird auch eine Besonderheit im Bereich der Fortbewegung von Kraftfahrzeugen augenfällig. Fortbewegungsfertigkeiten⁶ bei Kraftfahrzeugen lassen sich ihrerseits nochmals in zwei Klassen untergliedern, nämlich in

⁶Im Weiteren werden, falls nicht explizit anders ausgedrückt, Fortbewegungsfertigkeiten nur noch als Fertigkeiten bezeichnet.

Fertigkeiten der Längs- und der Querverführung. Dies ist dadurch bedingt, dass Längs- bzw. Querdynamik eines Kraftfahrzeugs durch unterschiedliche Aktuatoren (Gas/Bremse bzw. Lenkung) beeinflusst werden, was in Fällen normalen Fahrverhaltens auch eine Entkopplung dieser beiden Dynamikbereiche zur Folge hat.

Gemäß Definition repräsentieren Fertigkeiten verfestigte, automatisierte Abläufe. Im Bereich der Längsführung von Kraftfahrzeugen sind dies beispielsweise das 'Geschwindigkeit halten' oder das 'Stehen'. Bei der Querverführung können exemplarisch das 'Einlenken' oder das 'Spurhalten' genannt werden. Längsführungs- bzw. Querverführungs-Fertigkeiten laufen hierbei nach festen Schemata ab. Es können zwar Parameter den aktuellen Umständen angepasst werden, jedoch ist der Ablauf stets der gleiche. Beim menschlichen Pendant würde man sagen, Längs- und Querverführungsfertigkeiten werden 'unterbewusst' ausgeführt.

Die in begrenzter Zahl vorhandenen Fortbewegungsfertigkeiten eines (semi-)autonomen Kraftfahrzeugs lassen sich prinzipiell beliebig kombinieren, wodurch sich Fahrhandlungsfähigkeiten ergeben. Es sind jedoch nur die Kombinationen von Fertigkeiten der Längs- und Querverführung von Interesse, wodurch Fahrverhalten generiert wird, welches dem bestimmter Fahrmanöver entspricht.

Koordiniert wird die Abfolge der einzelnen Längs- und Querverführungsfertigkeiten durch Zustandsautomaten, welche gemäß dem Zustandsautomatenmodell von Abschnitt 6.1.1 im Zustand `Operation.Run` der jeweiligen Fahrhandlung ausgeführt werden (siehe dazu auch Abschnitt 6.3.2.2). Mittels fahrhandlungsinterner Rechenvorschriften sowohl vor als auch während der Ausführung des jeweiligen Fahrmanövers werden die Transitionsbedingungen für die Zustandsautomaten der Längs- bzw. Querverführungsfertigkeiten bestimmt, wobei die aktuellen Verkopplungen der Dynamikbereiche berücksichtigt werden.

Fahrmanöver können aufgrund interner sowie externer Einflüsse, welche die Ausführung des jeweiligen Manövers initiieren, qualitativ unterschiedlich eingesetzt werden. Sind die zur Ausübung einer Fahrhandlung führenden Größen bzw. Umstände lokaler/aktueller Natur, d.h. wird auf lokale Gegebenheiten bzw. auf aktuelle Verkehrssituationen reagiert, so spricht man von *taktischen Fahrmanövern*. Ist der Einsatz einer Fahrhandlung eher in einem weiter reichenden Kontext, beispielsweise einer Mission zu sehen, so handelt es sich um *strategische Fahrmanöver*. Bei der Repräsentation von Fahrmanövern in Form von Fahrhandlungsfähigkeiten macht es keinen Unterschied, ob es sich um strategische oder taktische Fahrmanöver handelt, außer dass bereits in der Planungsphase von längerfristigen Handlungsabfolgen die Verfügbarkeit von strategischen Fortbewegungs-Fähigkeiten bekannt sein muss, damit ein ausführbarer Plan erzeugt werden kann. Taktische Fortbewegungs-Fähigkeiten dagegen werden vor Ort als Reaktion auf nicht eingeplante Ereignisse eingesetzt.

Als Beispiel sei an dieser Stelle das 'Spurwechsel'-Manöver angeführt. Dieses Fahrmanöver wird zum einen strategisch eingesetzt, um am Ende einer Autobahnfahrt auf den Verzögerungstreifen zu wechseln. In diesem Fall muss die Verfügbarkeit des Manövers 'Spurwechsel' bereits in der Planungsphase bekannt sein. Es wird in einem globalen Kontext eingesetzt. Zum anderen wird der 'Spurwechsel' auch dazu verwendet, während einer längeren Autobahnfahrt an langsameren Fahrzeugen vorbeizufahren. Die für diesen Einsatz

benötigten Informationen stehen zum Zeitpunkt der Planung noch nicht zur Verfügung, sondern ergeben sich erst aus den lokalen Gegebenheiten. Das 'Spurwechsel'-Manöver wird in diesem Falle im taktischen Sinne eingesetzt. Steht der 'Spurwechsel' als Reaktion auf langsame Fahrzeuge aus irgendwelchen Gründen nicht zur Verfügung, so muss eine andere Fahrhandlung beispielsweise die 'Folgefahrt' im Sinne eines taktischen Manövers eingesetzt werden.

Sämtliche im Rahmen der Entwicklung des EMS-Vision Systems implementierten strategischen bzw. taktischen Fahrhandlungen sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Zu jeder Fahrhandlung ist angegeben, welche Fertigkeiten der Längs- bzw. Querführung die jeweiligen Fahrhandlungen benötigen und mittels welcher Parameter von außen auf die Ausführung einer Fahrhandlung eingewirkt werden kann. Eine detaillierte Beschreibung von ausgewählten Fahrhandlungsfähigkeiten mit den zugehörigen Fertigkeiten der Längs- bzw. Querführung erfolgt in Kapitel 7.2.

Tabelle 6.2: Fahrhandlungen

Fahrhandlung	Beschreibung	Parameter	benötigte Fertigkeiten	
			Längsdynamik	Querdynamik
Stillstand	Fahrzeug im Stillstand halten.	<i>keine</i>	Stehen	Fixieren
Notstop	Schnellst mögliches Anhalten.	<i>keine</i>	Vollbremsen	Spurhalten, Kurshalten
Stop	In x Metern anhalten.	<i>Anhalteweg, Sollverzögerung</i>	Verzögern	Spurhalten, Kurshalten
Objektstop	Im Abstand von x Metern vor einem Objekt anhalten.	<i>Bezugsobjekt-Längsführung (z.B. Hindernis), Sollabstand, Sollverzögerung</i>	Annähern	Spurhalten, Kurshalten
Spurfahrt	Festgelegter Trajektorie entlang fahren.	<i>Sollgeschwindigkeit, Bezugsobjekt-Querführung (z.B. Fahrspur), Sollablage</i>	Beschleunigen, Geschwindigkeit halten, Verzögern	Spurhalten
Abbiegen	In Querstraße abbiegen.	<i>Bezugsobjekt-Querführung (Querstraße), Zielspur, Sollablage</i>	Geschwindigkeit halten, Verzögern	Spurhalten, Einlenken, Fixieren, Auslenken
Überqueren	Einen begrenzten, freien Bereich gezielt überqueren.	<i>Bezugsobjekt-Querführung (z.B. Zielstraße, Fahrspur)</i>	Geschwindigkeit halten, Verzögern	Einlenken, Fixieren, Auslenken

Abfahren	Straße verlassen.	<i>Bezugsobjekt-Querführung (z.B. Wegpunkt), Abfahrbereich</i>	Geschwindigkeit halten, Verzögern	Spurhalten, Einlenken, Fixieren, Auslenken, Kurshalten
Auffahren	Auf Straße auffahren.	<i>Bezugsobjekt-Querführung (z.B. Straße), Zielspur, Sollablage</i>	Beschleunigen, Geschwindigkeit halten	Kurshalten, Einlenken, Fixieren, Auslenken, Spurhalten
Wegpunktfahrt	Globalen Wegpunkt anfahren.	<i>Bezugsobjekt Wegpunkt</i>	Beschleunigen, Geschwindigkeit halten, Verzögern	Ausrichten, Kurshalten
Ausweichen	Einem Hindernis ausweichen.	<i>Bezugsobjekt (z.B. Hindernis)</i>	Geschwindigkeit halten, Verzögern	Einlenken, Auslenken, Passieren, Fixieren
Stop&Go	Fahren im Stau.	<i>Bezugsobjekt-Längsführung (Zielfahrzeug), Zeitlücke</i>	Stehen, Abstandhalten, Annähern	Fixieren, Spurhalten
Folgefahrt	Einem vorausfahrenden Fahrzeug folgen.	<i>Bezugsobjekt-Längsführung (Zielfahrzeug), Zeitlücke</i>	Annähern, Abstandhalten	Spurhalten
Spurwechsel	Wechseln der Fahrspur.	<i>Bezugsobjekt-Querführung (z.B. Fahrspur)</i>	Beschleunigen, Geschwindigkeit halten	Einlenken, Fixieren, Auslenken

Aufgrund der Kombinierbarkeit von Längs- und Querführungsfertigkeiten zu Fahrhandlungsfähigkeiten sind weitaus mehr Fahrhandlungen denkbar, als in Tabelle 6.2 aufgeführt sind. Außerdem können Fahrhandlungen in unterschiedlichen Skalierungsstufen d.h. mit verschiedenen abgestuften Längs- und Querführungsfertigkeiten existieren.

Die hier beschriebenen Fahrhandlungen können im Sinne von verhaltensorientierten Architekturen für Roboter als 'Verhaltensmuster' verstanden werden. Im Gegensatz zu speziellen, rein reaktiven Ausprägungen dieser Systemarchitekturgattung - als Beispiel sei die Subsumption-Architektur nach [BROOKS 86] angeführt - wo mehrere Verhaltensmuster gleichzeitig zum Gesamtverhalten beitragen können, wird hier ein anderer Ansatz verfolgt.

Mit einem Fahrmanöver ist eine relativ klare, stereotype Vorstellung über das zu erwartende Fahrverhalten verbunden. Dies kann nur gewährleistet werden, wenn auch nur eine Fahrhandlung aktiv ist, d.h. dass nur diese eine Fahrhandlung den exklusiven Zugriff auf

die Aktuatorik hat und somit die Aktuator-Stellgrößen ausschließlich von dieser einen Fahrhandlung vorgegeben werden. Da bei der Ausführung von Fahrhandlungen unterlagerte Fertigkeiten genutzt werden, ist auch nur jeweils ein Handlungsprimitiv sowohl im Bereich der Längs- als auch der Querdynamik gleichzeitig aktiv, durch welche der exklusive Zugriff auf die jeweilige Aktuatorik erfolgt. Andere Fahrmanöver können zwar vorbereitet werden, sie tragen aber nicht zum jeweils resultierenden Fahrverhalten bei. Es erfolgt keine Überlagerung von Aktuator-Stellgrößen von verschiedenen Fahrmanövern.

Wie letztendlich alle aufgezählten Aspekte der Fortbewegung eines Kraftfahrzeugs im Zustandsautomatenmodell gemäß Abschnitt 6.1.1 berücksichtigt werden, wird im folgenden Abschnitt 6.3.2.2 und im Kapitel 7 erläutert.

6.3.2.2 Ablaufmodelle für Fortbewegungs-Fähigkeiten

In Abschnitt 6.1.1 wurde ein Zustandsautomatenmodell zur Beschreibung der internen Abläufe vor, während und nach der Nutzung von Fähigkeiten vorgestellt, welches unabhängig davon ist, um welche Kategorie (Wahrnehmung, Fortbewegung, ...) von Fähigkeit es sich handelt und welcher Hierarchiestufe eine Fähigkeit zuzuordnen ist. Dieses Zustandsautomatenmodell ist auch für die auf mehrere Hierarchiestufen verteilten Fortbewegungs-Fähigkeiten zu nutzen.

Der Aufbau des Zustandsautomatenmodells und somit auch die Ablaufsteuerung ist für sämtliche Fähigkeiten identisch. Die mit einer Fähigkeit assoziierte Leistung wird in einer bestimmten Zustandskonstellation der parallelen Automaten (**Organisation**, **Operation**, **Supervision**) dieses Zustandsautomatenmodells erbracht. Die eigentliche Funktionalität ist im **Operation.Run**-Zustand gekapselt. In Abhängigkeit, welcher Hierarchiestufe eine Fähigkeit angehört (Fertigkeit, Handlungsfähigkeit), besteht der **Operation.Run**-Zustand aus mehr oder weniger vielen Unterzuständen, die wiederum mittels eines Zustandsautomaten (Zustandskarte) organisiert sind.

Fortbewegungs-Fähigkeiten der Fertigkeiten-Ebene

Fortbewegungsfertigkeiten lassen sich ohne großen Aufwand in Form des in Abbildung 6.2 vorgestellten Zustandsautomatenmodells darstellen. Dies gilt sowohl für die Längs- als auch für die Querführung eines Kraftfahrzeugs. Wie bereits erwähnt, wird die Leistung, welche von einer Fähigkeit erwartet wird, im **Operation.Run**-Zustand erbracht. In diesem Zustand werden sämtliche Berechnungen und Aktionen durchgeführt, die notwendig sind, damit bei Nutzung einer Fähigkeit die erwartete Funktionalität auch tatsächlich realisiert wird. Im Falle der Längsführungsfertigkeit 'Geschwindigkeithalten' ist dies zum einen die Festlegung eines Geschwindigkeitsollwerts, der von der Fahrzeuglängsregelung eingeregelt werden soll und zum anderen die Aktivierung der notwendigen Regelungen. Gleiches gilt für die Fahrzeugquerführung, wo beispielsweise im **Operation.Run**-Zustand der Querführungsfertigkeit 'Spurhalten' neben der Bestimmung der Führungsgrößen für den Lenkregler dieser auch koordiniert wird. Der **Operation.Run**-Zustand des allgemeinen

Zustandsautomatenmodells stellt daher nur einen Überzustand gemäß der 'Statechart'-Theorie zur Beschreibung von Zustandsautomaten dar (vgl. [HAREL 87]), der, wie in Abbildung 6.9 zu sehen ist, die zwei Zustände Calculation und Action enthält.

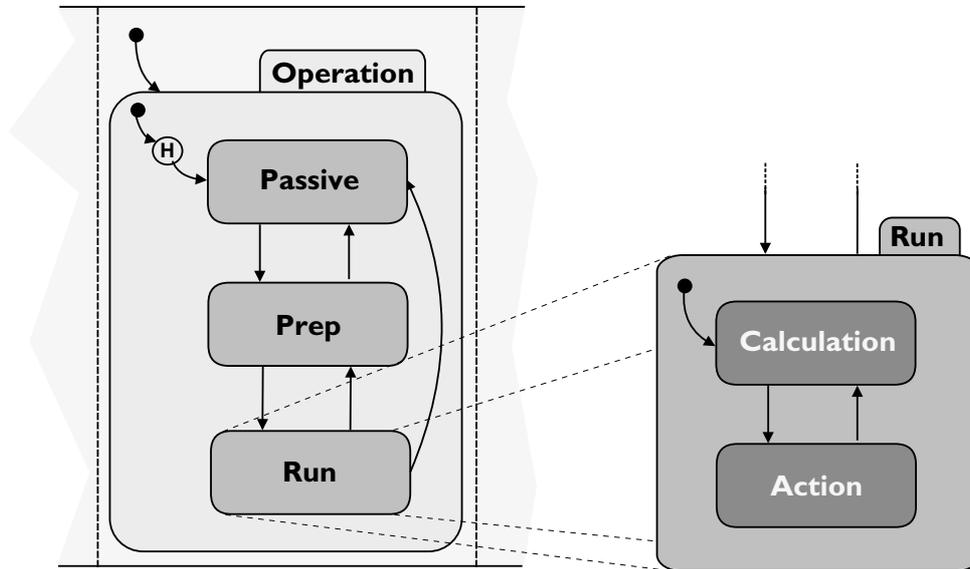


Abbildung 6.9: Erweiterung des Zustandsautomatenmodells gemäß Abbildung 6.2 um das Ablaufmodell für Fortbewegungsfähigkeiten

Im Calculation-Zustand wird die angesprochene Bestimmung fertigkeitenspezifischer Größen durchgeführt. Ist dies abgeschlossen erfolgt der Übergang in den Zustand Action und die zugehörige Aktion wird ausgeführt, was bei Fahrzeugführungsfähigkeiten bedeutet, dass die Längs- bzw. Querregelung angesprochen wird, wodurch letztendlich der Durchgriff auf die Aktuatoren erfolgt. Nach diesem Eingriff wird wieder in den Zustand Calculation gewechselt und die Fähigkeiteninstanz steht für einen erneuten Aufruf zur Verfügung. Dies gilt sowohl für den Fall, dass die Ausführung der jeweiligen Fahrzeugführungs-Fähigkeit durch einen zyklischen Event getriggert wird, als auch für jenen Fall, dass ein wie auch immer spezifiziertes Ereignis den Event erzeugt.

Alle Fertigkeiten der Fortbewegung in den Bereichen Längs- als auch Querführung, wie sie in Tabelle 6.2 aufgelistet sind, lassen sich in dieser erweiterten Form des Zustandsautomatenmodells nach Abbildung 6.9 darstellen. Wie die Rechenvorschriften im Zustand Calculation im Detail lauten und wie die Anbindung der Längs- bzw. Querregelung im Action-Zustand erfolgt, ist im Kapitel 7 spezifiziert.

Fortbewegungs-Fähigkeiten der Handlungsebene

Auf der nächst höheren Fähigkeiten-Hierarchiestufe - der Handlungsebene - sind in der Kategorie 'Fortbewegung' ebenfalls Erweiterungen am Operation.Run-Zustand des allge-

meinen Zustandsautomatenmodells von Abschnitt 6.1.1 vorzunehmen. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Ausführung von Fahrhandlungen Längs- und Querdynamik für gewöhnlich getrennt voneinander beeinflusst werden, reicht das eben für Fertigkeiten modifizierte Modell nicht mehr aus. Der Action-Zustand des Modells gemäß Abbildung 6.9 stellt für Fahrhandlungsfähigkeiten wiederum nur einen Überzustand dar, der seinerseits die zwei parallelen Zustände Longitudinal Action und Lateral Action zusammenfasst. Für Fahrhandlungen erhält man somit das in Abbildung 6.10 dargestellte Zustandsautomatenmodell.

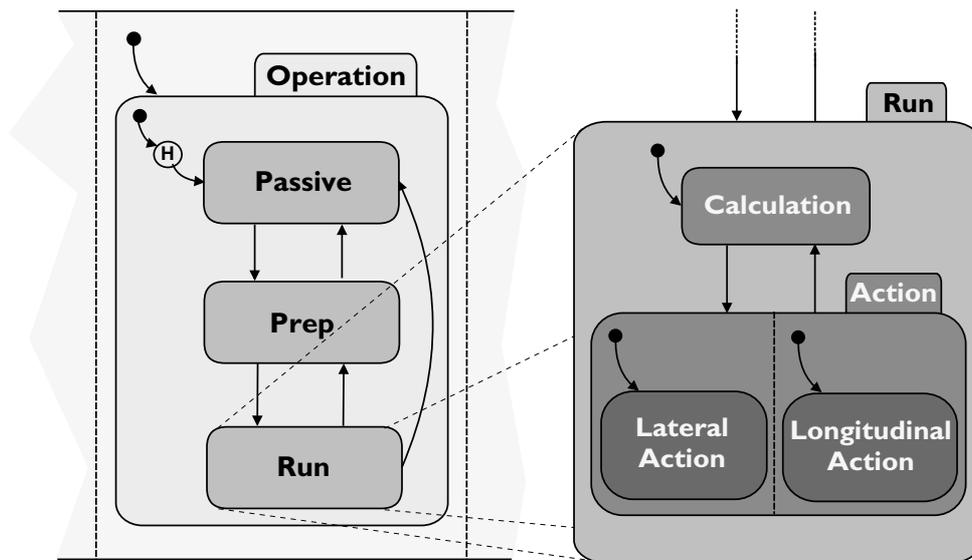


Abbildung 6.10: Erweiterung des Zustandsautomatenmodells gemäß Abbildung 6.2 um das Ablaufmodell für Fahrhandlungsfähigkeiten

Auch im Zustandsautomatenmodell für Fahrhandlungen ist die eigentliche Funktionalität im `Operation.Run`-Zustand gekapselt. Die von einer Fahrhandlungsfähigkeit angebotene Funktion ist auf ein Ziel hin ausgerichtet, welches über das der automatisierten Abläufe bei Fertigkeiten hinausgeht. Als Beispiel sei hier das 'Ausweich'-Manöver genannt (vgl. Abschnitt 7.2.1), wo zwar Fertigkeiten der Längs- und Querführung genutzt werden, wie etwa ein Geschwindigkeitsprofil mit Hilfe der Längsführungsfertigkeit 'Geschwindigkeit halten' abzufahren oder unter Verwendung der Querführungsfertigkeiten 'Einlenken' und 'Auslenken' um ein Hindernis zu steuern, deren immer gleiche Abläufe aber nicht im Vordergrund stehen. Vielmehr charakterisiert die situationsangepasste Bestimmung einer geeigneten Ausweichtrajektorie unter Beachtung des Ziels, Zusammenstöße zu vermeiden, und der geschickte Einsatz von Längs- und Querführungsfertigkeiten das Fahrmanöver. Eine Fahrhandlung steht daher für ein komplexeres Fahrverhalten als es die von ihr genutzten Fortbewegungsfertigkeiten tun. Dabei werden spezifische Fahrzeugführungsfertigkeiten in den Zuständen Longitudinal Action und Lateral Action so kombiniert, dass sich

das gewünschte Fahrmanöver ergibt.

Die Zustände **Longitudinal Action** und **Lateral Action** stellen im Zustandsautomatenmodell für Fahrhandlungen wiederum nur Überzustände dar. Der eine Überzustand umfasst dabei den Zustandsautomat für die Längs- und der andere den für die Querführung. In graphischer Form werden die Zustandsautomaten mit Zustandskarten dargestellt. Jeder Zustand innerhalb des **Longitudinal Action**- bzw. des **Lateral Action**-Automaten entspricht dabei einer Fahrzeugführungsfertigkeit. Exemplarisch ist der **Operation.Run**-Zustand für die Fahrhandlung 'Spurfahrt' in Abbildung 6.11 bis zu den Zustandsautomaten für **Longitudinal Action** und **Lateral Action** dekomponiert.

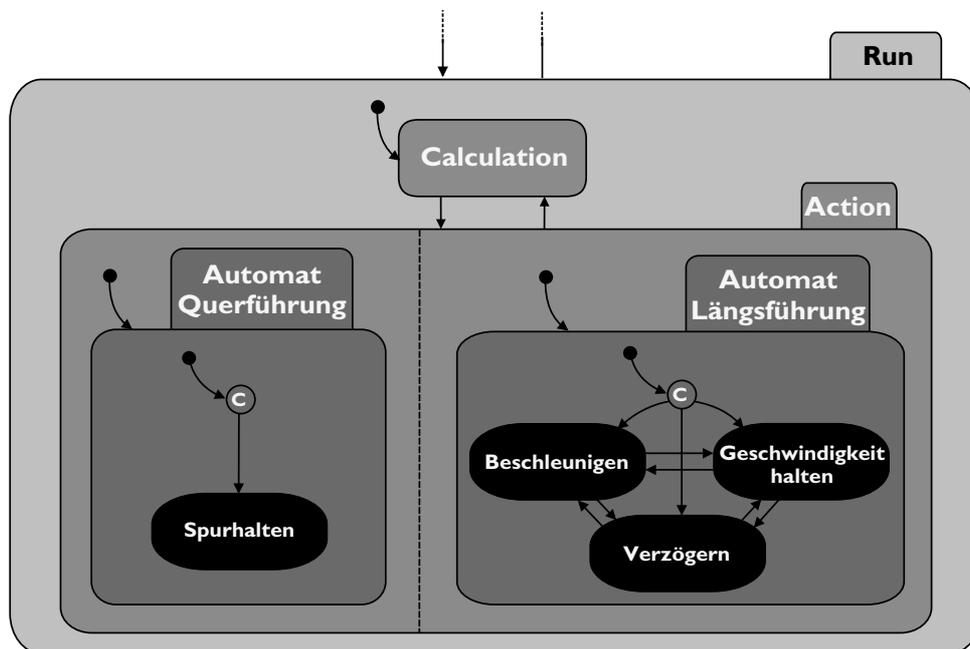


Abbildung 6.11: Längs- und Querführungsautomat bei der 'Spurfahrt'

Wie bei den Fahrzeugführungsfertigkeiten erfolgt auch bei den Handlungsfähigkeiten der Fahrzeugführung im Zustand **Calculation** die Bestimmung von spezifischen Größen (vgl. Abbildung 6.10 und 6.11). Bei Fahrhandlungen sind dies im Besonderen diejenigen Größen, mittels derer die Verkopplung der Quer- mit der Längsdynamik berücksichtigt wird. Koppelgrößen zwischen Längs- und Querdynamik wie die Fahrzeuggeschwindigkeit oder die Querbeschleunigung werden so festgelegt, dass sich selbst in kritischen Situationen, in denen die Verkopplung der Fahrzeugdynamikbereiche beachtet werden muss, durch Vorgabe dieser Größen an die Längs- und Querführung ein sicheres Fahrverhalten ergibt.

Neben der Bestimmung von Koppelgrößen werden im **Calculation**-Zustand auch noch Größen berechnet, welche im sich anschließenden **Action**-Zustand dazu verwendet werden,

die Transitionsbedingungen zwischen den einzelnen Zuständen der Automaten *Longitudinal Action* und *Lateral Action* zu überprüfen.

Bei jedem Aufruf des *Operation.Run*-Zustands einer Fahrhandlung werden zunächst alle für die Längs- wie auch für die Querdynamik gemeinsamen Größen bestimmt. Mittels dieser Größen wird dann in den parallelen Automaten *Longitudinal Action* und *Lateral Action* überprüft, ob ein Übergang von einem Zustand in einen anderen durchzuführen ist. Das mit einem Kreis umschlossene 'C' in den Automaten für die Längs- und Querführung bedeutet, dass beim initialen Aufruf abhängig von den geltenden Transitionsbedingungen in den jeweils passenden Automatenzustand gewechselt wird. Steht fest, welcher Zustand des jeweiligen Automaten gerade gültig ist, wird die zum Zustand gehörende Fertigkeit abgerufen, d.h. die Ausführung der jeweiligen Fertigkeit wird wie oben beschrieben angestoßen, was letztendlich zum Ansteuern der Aktuatorik führt.

Trotz der Erweiterungen des Zustandsautomatenmodells für Fortbewegungs-Fähigkeiten der Fertigkeiten- wie auch der Handlungs-Ebene hat sich an der äußeren Struktur des Modells nichts geändert. Eine während einer Fahrhandlung benötigte Fahrzeugführungsfertigkeit wird auf die selbe Weise aktiviert, wie die Handlung selbst. Die Aktivierung von Fahrzeugführungs-Fähigkeiten, egal welcher Fähigkeitenhierarchieebene sie angehören, erfolgt gemäß dem allgemeinen Schema von Abschnitt 6.1.3.

Die Ergänzungen am Zustandsautomatenmodell für Fortbewegungs-Fähigkeiten sind nach außen hin nicht sichtbar. Nur dem Experten für die Fortbewegung - der Fahrzeugführung - sind die Neuerungen am Zustandsautomatenmodell bekannt. Die Fahrzeugführungs-Fähigkeiten für ein (semi-)autonomes Kraftfahrzeug lassen sich somit wie schon die Fähigkeiten zur Wahrnehmung des Fahrzeug-Eigenzustands nahtlos in das in diesem Kapitel vorgestellte Fähigkeitenkonzept für autonome Systeme integrieren.

Kapitel 7

Fähigkeitenbasierte Fahrzeugführung

Im Sinne einer funktionalen Systemarchitektur für autonome Roboter (siehe z.B. [ARKIN 98], [MEYSTEEL 91]) wird das Modul, welches im Rahmen der Aktionsausführung für die Generierung von Bewegungsabläufen zuständig ist, als 'Bewegungssteuerung' (vgl. [KNIERIEMEN 91]) bezeichnet. Im englischen Sprachraum wird der Begriff 'Motion Control' häufig verwendet [MEYSTEEL 91]. Die funktionale Einheit zur Bewegungsgenerierung zeichnet in einem autonomen System für die Umsetzung der in Fähigkeiten der Kategorie 'Bewegung' repräsentierten Funktionalitäten verantwortlich. Dazu werden die von einer 'Bewegungs-Fähigkeit' angebotenen Regeln, Rechenvorschriften usw. genutzt. Handelt es sich beim betrachteten autonomen System um einen mobilen Roboter, so bezeichnet man die für Fortbewegung zuständige Systemkomponente im Speziellen als 'Fahrzeugführung' (engl. 'Vehicle Control', VC).

Da oft die Begriffe 'Fahrzeugführung' und 'Fahrzeugregelung' gleichbedeutend verwendet werden, wird zur Unterscheidung dieser beiden Termini die Definition gemäß [TÖLLE 96] herangezogen. [TÖLLE 96] leitet die Begriffe 'automatische Fahrzeugführung' und 'automatische Fahrzeugregelung' aus dem Kontext der manuellen Kraftfahrzeugführung durch den Menschen ab.

Die Definition der Fahrzeugregelung¹ eines Kraftfahrzeugs lautet demnach wie folgt:

„Die 'automatische Fahrzeugregelung' (Längs- bzw. Querregelung) hat die Aufgabe, die Fahrzeugbewegung derart zu beeinflussen, dass das Fahrzeug verzögerungsfrei und stationär genau² den vorgegebenen Sollverläufen für die Längs- und Querbewegung folgt.“ [TÖLLE 96, S. 10].

¹Im Weiteren wird, falls nicht explizit anders angeführt, unter Fahrzeugregelung immer die 'automatische Fahrzeugregelung' und unter Fahrzeugführung die 'automatische Fahrzeugführung' verstanden.

²Unter 'stationär genau' ist zu verstehen, dass bei konstant vorgegebenem Sollwert die Differenz zwischen Soll- und Istwert für $t \rightarrow \infty$ gegen Null strebt.

Allein mittels Regelungen läßt sich jedoch ein Kraftfahrzeug nicht führen. So benötigen Regelungen an die jeweilige Situation und an den Eigenfahrzeugzustand angepasste Führungsgrößen. Die Berechnung der Sollverläufe für die Längs- und Querregelung ist ebenso Aufgabe der Fahrzeugführung wie die Bestimmung von Vorsteuergrößen oder die Realisierung der Steuerungen bzw. Regelungen. Die Fahrzeugführung schließt daher die Fahrzeugregelung ein. Die zur Bestimmung der Reglerführungsgrößen, zur Vorsteuergrößengenerierung oder zur Ablaufkoordination notwendigen Informationen erhält die Fahrzeugführung von überlagerten Systemkomponenten bzw. aus einer zentralen Datenbasis (z.B. der DKB, siehe Kapitel 3.5). Die Zusammenhänge zwischen Fahrzeugregelung, Fahrzeugführung und den anderen Systemkomponenten sind schematisch in Abbildung 7.1 dargestellt. Überträgt man diese Struktur auf die EMS-Systemarchitektur gemäß Abbildung 3.2, so kann der Teil der funktionalen Systemarchitektur, welcher innerhalb der Aktionsausführung die Fortbewegung repräsentiert, entsprechend der hier getroffenen Unterscheidung in Fahrzeugregelung und -führung gruppiert werden (vgl. Abbildung 7.2). Andere mögliche Bewegungskomponenten innerhalb der Aktionsausführung wie etwa eine Blickrichtungssteuerung sind nicht dargestellt, können aber nach gleichem Schema eingebunden werden.

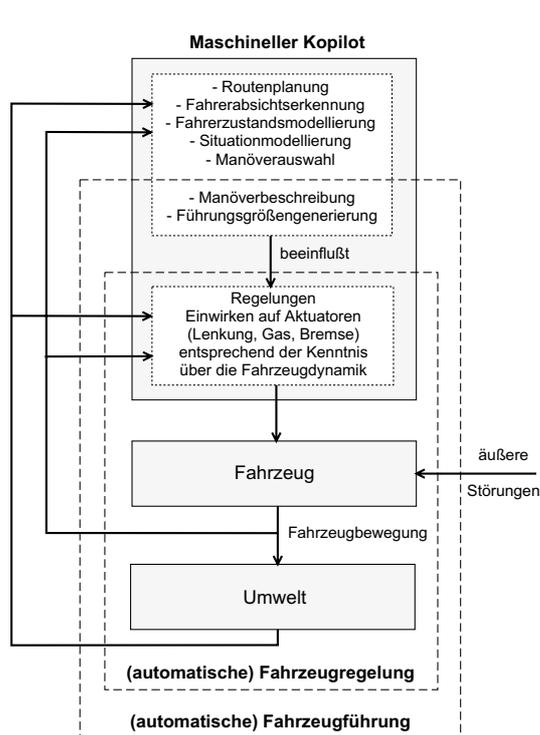


Abbildung 7.1: Automatische Fahrzeugführung nach [TÖLLE 96] am Beispiel eines maschinellen Kopiloten

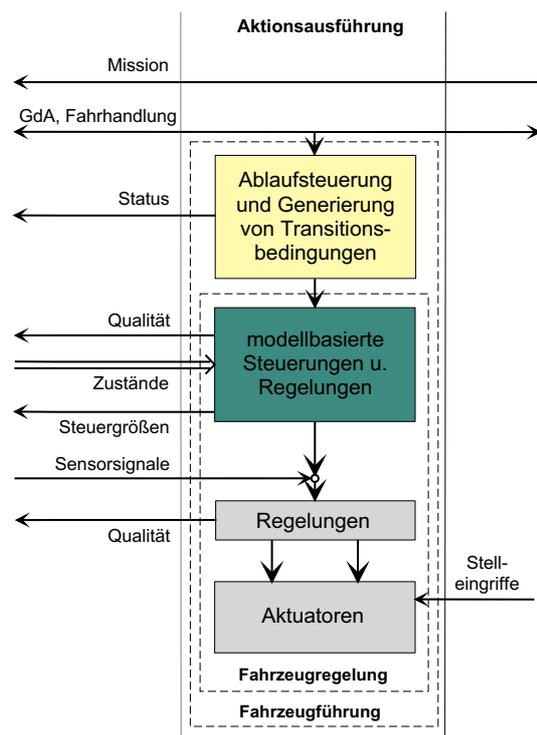


Abbildung 7.2: Gliederung der 'Fortbewegungs'-Komponente der EMS-Systemarchitektur gemäß Abb. 3.2 in Fahrzeugführung und -regelung

Als Konsequenz ist unter dem Begriff 'automatische Fahrzeugführung' folgender Sachverhalt zu verstehen:

„Die Aufgabe der 'automatischen Fahrzeugführung' besteht darin, die Sollverläufe für die Längs- und Querregelung [und Vorsteuerverläufe, Anm. des Autors] unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Informationen derart zu berechnen bzw. extern vorgegebene Sollgrößen (z.B. Fahrbahnrandverlauf) intern so zu modifizieren, dass das Fahrzeug sicher (d.h. kollisionsfrei) und komfortabel³ im Straßenverkehr bewegt wird.“ [TÖLLE 96, S. 11].

„Im Gegensatz zur ‚manuellen Fahrzeugführung‘ ist die ‚automatische Fahrzeugführung‘ nur in einem definierten Arbeitsbereich gültig.“ [TÖLLE 96]. Dies bedeutet, dass die automatisch ausführbaren Fahrmanöver nur solange einsetzbar sind, solange die Voraussetzungen für die Ausführung der jeweiligen Fahrhandlung erfüllt sind. Wird der definierte Arbeitsbereich verlassen, so ist ein anderes Fahrmanöver anzustoßen, oder, falls keine passende Fortbewegungs-Fähigkeit zur Verfügung steht, ist im semi-autonomen Betrieb die Fahrzeugführung an den Fahrer zu übergeben und im autonomen Fall das Fahrzeug in einen sicheren Zustand zu bringen.

Für die letztendliche Auswahl der auszuführenden Fahrhandlungen ist in einem autonomen System die Entscheidungsinstanz für die Fortbewegung (BDL) zuständig (vgl. Kapitel 8). Aufgabe der Fahrzeugführung (VC) ist es, das aktuelle Fahrmanöver im definierten Arbeitsbereich so gut wie möglich umzusetzen, d.h. die mit einer Fortbewegungs-Fähigkeit gemäß Abschnitt 6.3.2 assoziierte Leistung zu erbringen. Demzufolge ist die Fahrzeugführung der Experte für Fortbewegungs-Fähigkeiten im Sinne des Fähigkeitskonzepts von Kapitel 6.

Für die Repräsentation von Fortbewegungs-Fähigkeiten steht neben der diskreten, den Ablauf mit Hilfe von Zustandsautomaten beschreibenden Darstellungsform gemäß Abschnitt 6.3.2 ein weiterer Beschreibungsmechanismus zur Verfügung. Fortbewegungs-Fähigkeiten können ebenso effizient mit Hilfe von (quasi-)kontinuierlichen Zustandsmodellen beschrieben werden. Speziell im Bereich der Fahrzeugregelung werden (quasi-)kontinuierliche Ansätze aus dem Fachbereich der Steuerungs- und Regelungstechnik zur Beschreibung der Regelstrecken und Regler verwendet. Die Fusion der beiden unterschiedlichen Repräsentationsformen wird innerhalb der Fahrzeugführung vollzogen (Abschnitt 7.1). Diese Art der Beschreibung eines Systems mit Hilfe von kontinuierlichen und diskreten Methoden ist typisch für 'hybride Regelungssysteme' (siehe z.B. [BRANICKY 95]). In Abschnitt 7.2 wird der hybride Charakter ausgewählter Fahrmanöver im Detail vorgestellt.

³Da komfortables Fahren eine subjektive Größe ist, wird dieser Begriff in Verbindung mit autonomen bzw. halbautonomen Fahren auf den Sachverhalt reduziert, dass mögliche Fahrzeuginsassen bei automatischer Fahrt nicht durch hohe Längs- bzw. Querbeschleunigungen gefährdet werden.

7.1 Einbindung des Fähigkeitskonzepts in die Fahrzeugführung

Die komplexe Aufgabe der Fahrzeugführung, das von Fortbewegungs-Fähigkeiten repräsentierte Fahrverhalten zu generieren, wird nach verschiedenen Kriterien in Teilaufgaben gegliedert, für die systematische, möglichst einfache Lösungsansätze existieren. In Abschnitt 7.1.1 wird die Struktur der Fahrzeugregelung vorgestellt, wobei die Reglertopologie im Vordergrund steht. Auf die Auslegung der Längs- und Querregelung wird nicht näher eingegangen. Die Auswahl passender Regelungen und Steuerungen zur Generierung des gewünschten Fahrverhaltens ist eine typische Aufgabe der Fahrzeugführung. Dazu ist es notwendig, Methoden aus dem Bereich der Steuer- und Regelungstechnik in geeigneter Weise mit den abstrakten, KI-orientierten Beschreibungsmethoden des Fähigkeitskonzepts zusammenzuführen (Abschnitt 7.1.2).

Dies alles erfolgt unter der Prämisse, die Fahrzeugführung möglichst unabhängig von den Eigenschaften eines bestimmten Kraftfahrzeugtyps auszulegen. Der Nachweis der Unabhängigkeit wurde wie schon bei [MAURER 00] dadurch erbracht, dass das Modul zur Fahrzeugführung (VC) in zwei grundverschiedenen Fahrzeugen, einem leichten Lastkraftwagen (Baujahr: 1983) und einem Personenkraftwagen der Oberklasse (Baujahr: 1992), eingesetzt wurde. Außer den unvermeidbaren, aber aufgrund der unterschiedlichen Aktuator-Konzepte notwendigen Anpassungen auf der hardware-spezifischen Ebene ist die Gesamtstruktur der Fahrzeugführung einheitlich.

7.1.1 Struktur der Fahrzeugregelung

Wie in Abschnitt 5.3 detailliert dargestellt ist, kann ein Kraftfahrzeug durch zwei dynamische Teilsysteme (Horizontal- und Vertikaldynamik) modelliert werden. Diese können für gewöhnlich separat voneinander betrachtet werden, da sich in normalen Fahrsituationen Vertikal- und Horizontaldynamik kaum gegenseitig beeinflussen und sich dadurch eine Entkopplung dieser beiden Teilsysteme ergibt.

Regelsysteme, welche die Vertikaldynamik beeinflussen, wie etwa aktive Radaufhängungssysteme (Active Body Control), unterstützen die Entkopplung von Horizontal- und Vertikaldynamik, da sie, wie es bereits in Serie befindliche Regelsysteme (ABS, ESP etc.) tun, in extremen Fahrsituationen stabilisierend auf das Kraftfahrzeug einwirken und somit die Entkopplung aufrecht erhalten. Die Vertikaldynamik muss daher im Rahmen der gestellten Aufgabe, ein Kraftfahrzeug entlang einer vorgegebenen Bahn zu leiten, nicht weiter berücksichtigt werden.

Um die Fahrzeugbewegung in der Horizontalebene zu beeinflussen, muss bei der Auslegung der notwendigen Steuerungen und Regelungen nur die Längs- und Querdynamik beachtet werden. Längs- und Querdynamik sind zwei Teilsysteme, in welche die Horizontaldynamik gemäß Abschnitt 5.3 weiter verfeinert werden kann. Aufgrund der Tatsache

dass sich im Allgemeinen der querdynamische Bewegungszustand wesentlich schneller als der längsdynamische ändert, kann die Fahrzeuggeschwindigkeit bei Querdynamikuntersuchungen als konstanter oder langsam zeitveränderlicher Parameter angesehen werden (vgl. [ROPPENECKER 94]). Vice versa wird durch eine maximal zulässige Querbeschleunigung bei Kurvenfahrt die Fahrgeschwindigkeit begrenzt. Hieraus ergibt sich, dass in einem Kraftfahrzeug Längs- und die Querdynamik weitgehend voneinander entkoppelt sind. Die Auslegung der Quer- und Längsregelung kann daher getrennt erfolgen.

Wie der Abbildung 7.2 zu entnehmen ist, erstreckt sich die Fahrzeugregelung, welche aus der Längs- und Querregelung besteht, über die hardware-spezifische Ebene und über die 4D-Ebene. Dieser hierarchische Aufbau der Fahrzeugregelung ist in Abbildung 7.3 im Detail dargestellt. Regler, die in der Darstellung nach Abbildung 7.3 übereinander angeordnet sind, arbeiten als Kaskadenregler.

Aufgrund der Entkopplung von Längs- und Querdynamik können die beiden zugehörigen Regelungszeige separat voneinander betrachtet werden. Wie schon bei [MAURER 00] wird die Reglertopologie in Form eines Blockschaltbildes dargestellt und der Aufbau der Fahrzeugregelung wird anhand der funktionalen Hierarchieebenen erläutert, wobei einige Neuerungen eingearbeitet sind.

In Abbildung 7.3 ist außerdem eine Besonderheit in der Längsregelung von Kraftfahrzeugen zu sehen. Für die Beeinflussung der Längsdynamik sind zwei unterschiedliche Aktuatoren - Gas und Bremse - nötig, um auf das gesamte Dynamikspektrum einwirken zu können. Diese beiden Aktuatoren gilt es, geeignet zu koordinieren. Für die Querregelung ist hingegen ein Lenkaktuator ausreichend.

Hochfrequente Regelkreise auf der hardware-spezifischen Ebene

Regler auf der hardware-spezifischen Ebene zeichnen sich dadurch aus, dass sie aufgrund der von Fahrzeug zu Fahrzeug verschiedenen Aktuatorenkonzepte an die jeweilige Hardware mit ihren unterschiedlichen Regelstrecken angepasst sein müssen.

„Die Regelstrecken auf der hardware-spezifischen Ebene sind zumeist stark nichtlinear, so dass sie keine [globale, Anm. des Autors] 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').“ [MAURER 00].

Die nichtlinearen Regelstrecken werden mit Hilfe von parameterumschaltbaren oder nichtlinearen Reglern stabilisiert. Die Regler werden dazu mit Zykluszeiten betrieben, die eine oder mehrere Größenordnungen kleiner sind als die Zeitkonstanten der zu regelnden Strecken, was den Stabilisierungseffekt unterstützt. Typische Zykluszeiten liegen im Bereich einiger weniger Millisekunden.

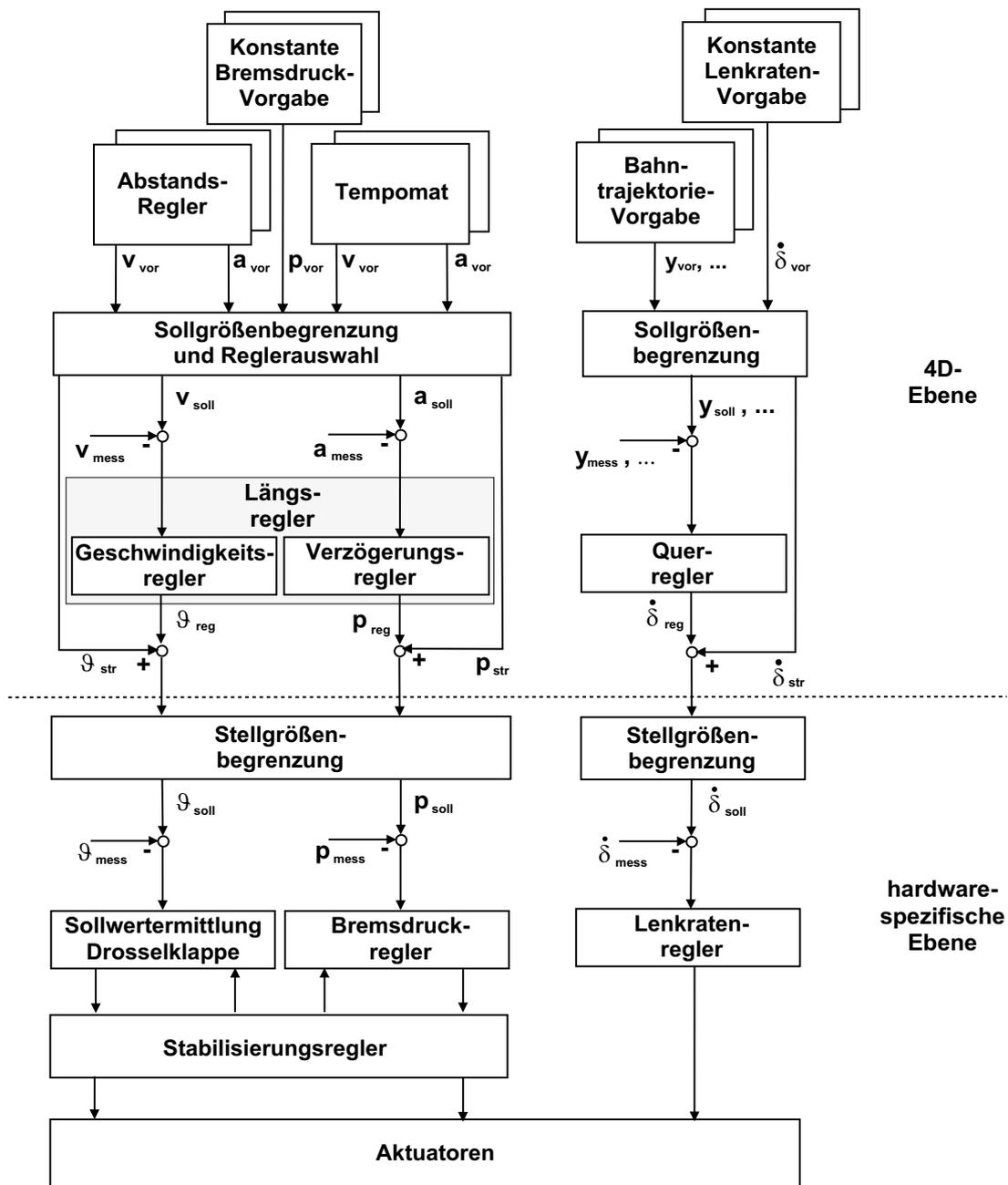


Abbildung 7.3: Hierarchischer Aufbau der Fahrzeugregelung - ϑ : Drosselklappenwinkel, p : Bremsdruck, $\dot{\delta}$: Lenkrate, v : Geschwindigkeit, a : Verzögerung, y : laterale Ablage

Für einige Regelungen der hardware-spezifischen Ebene gibt es bereits Serienlösungen wie etwa das Antiblockiersystem (ABS), die Antriebsschlupfregelung (ASR) oder das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP). Näheres über diese Regelungssysteme findet sich

z.B. in [BOSCH 01]. Für andere, noch nicht serienrelevante Regelungen sind spezielle Einzellösungen realisiert. Dazu zählt die Lenkratenregelung, die exemplarisch in [GÖBEL 94] beschrieben ist, oder der Bremsdruckregler (siehe dazu z.B. [SIEDERSBERGER 96a]). Damit die Stellgrößen für die Aktuatoren im jeweils gültigen Bereich gehalten werden, ist eine Begrenzung vorgesehen.

Reglerstruktur der 4D-Ebene

Typisch für die 4D-Ebene sind modellbasierte Steuerungen und Regelungen. Vorsteuerungen werden eingesetzt, um immer wiederkehrende Vorgänge zu realisieren. „Bei Bedarf können mehrere Vorsteuerungskomponenten überlagert werden. In quasistationären Zuständen kann auf die Vorsteuerung verzichtet werden.“ [MAURER 00]. In allen Fällen sind allerdings Regelungen aktiv, um nicht modellierte Störungen auszugleichen.

Aufgrund der kaskadierten Anordnung der Fahrzeugregelungen liegen die Zykluszeiten auf der 4D-Ebene um eine Größenordnung über denen der hardware-spezifischen Ebene. Die Zykluszeiten richten sich nach den ebenfalls auf der 4D-Ebene angeordneten videobildverarbeitenden rekursiven Schätzverfahren (vgl. Abschnitt 3.3) und deren Verarbeitungszeiten. Aus Sicht der Regelungstechnik sind auch kürzere Zykluszeiten realisierbar.

Die Ausgangsgrößen der modellbasierten Steuerungen und Regelungen der 4D-Ebene sind die Sollgrößen für die Regler auf der hardware-spezifischen Ebene. Reglerentwurf und -auslegung werden für die Geschwindigkeits- und Verzögerungsregelstrecke in [VOLLMAR 94] und [SIEDERSBERGER 96b], für die Lenkungsregelstrecke in [BRÜDIGAM 94], [MAURER 00] und [THEILIG 00] ausführlich diskutiert.

Sollgrößen für den Geschwindigkeits-, den Verzögerungs- und den Querregler werden in überlagerten Funktionsblöcken generiert. In diesen 'Vorgabeblocken' kommen verschiedene Methoden aus dem Bereich der Regelungstechnik zum Einsatz, um die Solltrajektorien zu erzeugen. Angefangen bei der Vorgabe eines konstanten Bremsdrucks, welcher dazu dient, ein Fahrzeug im Stand zu halten und welcher als Steuergröße direkt auf den Aktuator geschaltet wird, bis hin zu einer komplexen Abstandsregelung (nachzulesen in [BRÜDIGAM 94], [SIEDERSBERGER 96b] und [MAURER 00]), welche die Sollgrößen für den Geschwindigkeits- und Verzögerungsregler im Fall einer Fahrgeschwindigkeit generiert, wird ein breites Spektrum an Verfahren eingesetzt, um elementare Fahrverhaltensmodi zu erzeugen.

Unabhängig von der Art und Weise der Generierung der Sollgrößen werden diese durch Randbedingungen (z.B. bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit) oder durch fahrphysikalische Faktoren (maximal mögliche Kurvengeschwindigkeit, maximale Radlastschwankungen, ...) begrenzt. Zusätzlich erfolgt die Auswahl des Reglers, mit welchem die jeweilige Sollgröße aktuell eingeregelt werden soll. Im Besonderen trifft dies auf die Längsregelung zu, wo abhängig von den aktuellen Fahrzuständen entschieden werden muss, mit welchem der zu den Aktuatoren Gas und Bremse gehörenden Kaskadenreglern die Sollgrößen eingeregelt werden sollen.

Wie schon bei der hardware-spezifischen Ebene sind auch auf der 4D-Ebene Techniken aus dem Fachgebiet der Steuerungs- und Regelungstechnik dominierend, um die zeitkontinuierlichen Regelstrecken zu stabilisieren.

7.1.2 Fahrzeugführung

Als Experte für die Fortbewegung autonomer mobiler Roboter - im vorgestellten Fall autonomer Kraftfahrzeuge - ist das Modul 'Fahrzeugführung' (VC) für die prozedurale Umsetzung von Fahrhandlungen/-manövern und Handlungsprimitiven der Fortbewegung zuständig. Wie die regelungstechnische Umsetzung elementarer Fahrverhaltensmuster durch die Fahrzeugregelung als Teil der Fahrzeugführung mit dem Fähigkeitenkonzept für die Fortbewegung gemäß Kapitel 6.3.2 kombiniert und dadurch das Problem des 'symbol grounding' gelöst werden kann, wird im Folgenden beschrieben.

Weitere, sich u.a. aus der Einbindung des Fähigkeitenkonzepts ergebende Aufgaben für die Fahrzeugführung sind die Adaption der Fahrzeugregelung an die aktuellen internen wie externen Gegebenheiten (Abschnitt 7.1.2.2) sowie die Überwachung der Verfügbarkeit der genutzten Fortbewegungs-Fähigkeiten (Abschnitt 7.1.2.3).

7.1.2.1 Einbindung des Fähigkeitenkonzepts

Wie aus Abschnitt 6.3.2 bekannt ist, gibt es eine Vielzahl von Fortbewegungs-Fähigkeiten unterschiedlicher Auflösungsstiefe. Je nach Hierarchiestufe, der Fortbewegungs-Fähigkeiten angehören können, gestaltet sich die Vereinigung der fähigkeitenorientierten Repräsentation auf der 'regelbasierten Ebene' mit der prozeduralen, systemdynamischen Umsetzung der Fortbewegungs-Fähigkeiten auf der '4D-Ebene' unterschiedlich.

Fortbewegungsfertigkeiten und ihre regelungstechnische Realisierung

Elementare Fortbewegungsfertigkeiten, auf denen komplexere Fahrhandlungen aufbauen, werden entweder durch Vorgabe von (parametrisierbaren) zeitlichen Trajektorien für die Steuergrößen (feed-forward control) oder durch (meist lineare) Kopplungen von Steuergrößen an die Differenz zwischen vorgegebenen Soll- und gemessenen Istwerten (feed-back control) realisiert. Gemäß Abschnitt 7.1.1 erfolgt die Generierung von Steuergrößen auf der '4D-Ebene' bzw. der 'hardware-spezifischen Ebene'.

Im Sinne hybrider Regelungssysteme können einzelne Steuerung bzw. Regelung jeweils als (diskrete) Systemmodi repräsentiert werden. Angewandt auf die Fahrzeugführung bedeutet dies, dass z.B. jeder dieser diskreten Steuerungs-/Regelungs-Modi als eine elementare Fortbewegungsfertigkeit interpretiert werden kann. So können die durch Steuerungen und/oder Regelungen realisierten Funktionalitäten der Längsregelung wie 'Abstandsregler', 'Tempomat' oder 'Konstante Bremsdruck-Vorgabe' sowie Funktionalitäten der Querregelung auf der 'regelbasierten Ebene' je durch einen diskreten Modus bezeichnet werden,

welcher einer Fortbewegungsfertigkeit entspricht. Durch die eindeutige Zuordnung einer Steuerungs-/Regelungsfunktion auf einer systemdynamisch geprägten Ebene ('4D-Ebene') zu je einer Fortbewegungsfertigkeit auf einer Ebene mit höherem Abstraktionsniveau ('regelbasierte Ebene') wird das Problem des 'symbol grounding' elegant gelöst.

Der Tabelle 7.1 ist zu entnehmen, mit Hilfe welcher steuerungs-/regelungstechnischer Verfahren beispielsweise die aus Abschnitt 6.3.2 bekannten Längsführungsfertigkeiten realisiert werden.

Tabelle 7.1: Fortbewegungsfertigkeiten der Längsführung und ihre steuerungs-/regelungstechnischen Realisierungen

Längsführungsfertigkeiten (regelbasierte Ebene)	systemdynamische Realisierung (4D-Ebene)
Stehen	Vorgabe eines minimalen konstanten Bremsdrucks
Vollbremsen	Vorgabe des maximal möglichen Bremsdrucks
Verzögern	Vorgabe eines Verzögerungsprofils
Beschleunigen	Vorgabe eines Beschleunigungsprofils
Geschwindigkeit halten	Tempomat
Annähern	Annäherungsregler
Abstand halten	Abstandsregler

Realisierung der in Fahrhandlungen repräsentierten Funktionalität

Durch eine aufeinanderfolgende Nutzung einzelner Fortbewegungsfertigkeiten können komplexere schematische Fortbewegungs-Fähigkeiten, sogenannte Fahrhandlungen, generiert werden. Typisch für Fahrmanöver ist deren lokal integraler Charakter, d.h. dass mehrere Fortbewegungsfertigkeiten aus dem Bereich der Längs- als auch der Querführung genutzt werden, um Fahrmanöver zu generieren.

Das schematische Aufeinanderfolgen einzelner Fortbewegungsfertigkeiten läßt sich, wie bereits in Abbildung 6.11 dargestellt, auf der 'regelbasierten Ebene' sehr effizient durch Zustandsautomaten (Zustandskarten) beschreiben. Aufgrund der separaten Betrachtung von Längs- und Querdynamik ist sowohl für die Längs- als auch für die Querführung auf der 'regelbasierten Ebene' ein eigener Zustandsautomat vorgesehen. Ergänzt wird diese Anordnung paralleler Zustandsautomaten durch einen Automaten, mit dem die Bedienung zusätzlicher Systeme wie Blinker oder Hupe gesteuert wird.

Wie die fähigkeitenorientierte Repräsentation von Fahrhandlungen auf der 'regelbasierten Ebene' mit der steuerungs-/regelungstechnischen Realisierung von Fahrhandlungen auf der '4D-Ebene' kombiniert werden kann, wird ausgehend von den in Abbildung 6.11

vorgestellten Zustandsautomaten für die Fahrhandlung 'Spurfahrt' in Abbildung 7.4 illustriert. Der Automat für die Ansteuerung der Zusatzsysteme ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

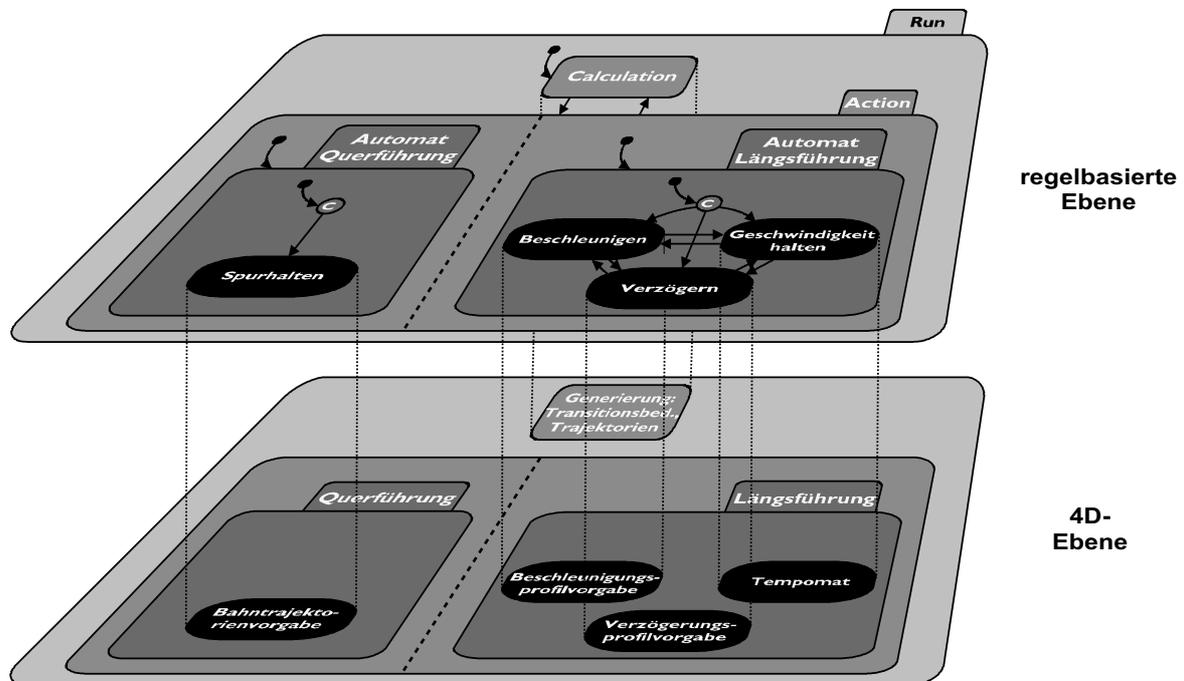


Abbildung 7.4: Ankopplung der '4D-Ebene' an die 'regelbasierte Ebene' am Beispiel der 'Spurfahrt'

Wird im Automaten für die Längs- bzw. Querführung eine Fortbewegungsfertigkeit ausgewählt, so bedeutet dies, dass - wie im vorigen Abschnitt erläutert - die in der jeweiligen Fertigkeit gekapselte Funktionalität mittels systemdynamischer Methoden beispielsweise durch eine Steuerung oder Regelung realisiert wird. Die Auswahl der für die Ausführung einer Fahrhandlung und die aktuellen internen wie externen Umstände günstigsten Fertigkeit erfolgt mittels Durchlaufen des jeweiligen Zustandsautomaten. Dazu werden sämtliche Transitionsbedingungen des gültigen Automatenzustands überprüft und bei Zutreffen einer Bedingung wird ein Zustandsübergang vollzogen.

Bei den Transitionsbedingungen handelt es sich entweder um fixe Werte oder um situationsabhängige Variablen, die ständig neu bestimmt werden müssen. Diese Berechnungen erfolgen in dem zum Calculation-Zustand der 'regelbasierten Ebene' korrespondierenden Funktionsblock der '4D-Ebene'. Neben der Berechnung von veränderlichen Transitionsbedingungen werden typische systemdynamische Größen für die jeweilige Fahrhandlung generiert.

Es handelt sich dabei zum einen um die Generierung von aufeinander abgestimmten Vorsteuerläufen für die Längs- und Querführung, welche den lokal integralen Charakter

der Fahrmanöver prägen. Diese werden entweder aufgrund von Erfahrungswerten vorgegeben oder mittels Optimierungsrechnungen bestimmt. Für die Festlegung der Vorsteuerverläufe können situationsbedingt unterschiedliche Parameter vorgegeben werden. Zum anderen wird zur robusteren Durchführung von Fahrmanövern die positive Wirkung von Rückkopplungen genutzt. Dazu werden auf Basis des nominellen Sollverlaufs des Fahrmanövers Führungsgrößen für unterlagerte Regler berechnet, um Störungen während der Ausführung der Fahrhandlung zu kompensieren.

All diese Berechnungen werden gemeinsam am Anfang eines jeden Automatendurchlaufs durchgeführt. Die Transitionsbedingungen dienen den Zustandsautomaten der Längs- bzw. Querverführung zur Initiierung eines Zustandsübergangs. Die Vorsteuerverläufe und die Sollverläufe der Reglerführungsgrößen stellen Eingangswerte für die innerhalb einer Fahrhandlung genutzten Fortbewegungsfertigkeiten dar, mittels derer der Durchgriff auf die Aktuatoren erfolgt.

Die auf der 'regelbasierten Ebene' und der '4D-Ebene' verwendeten Verfahren sind strukturell fahrzeugunabhängig und werden nur durch Parameter an das jeweilige Fahrzeug angepasst. Die Ausführung der auf der 'regelbasierten Ebene' angesiedelten Zustandsautomaten und die für jeden Zustand einhergehenden Berechnungen auf der '4D-Ebene' sind elementare Aufgaben der Fahrzeugführung.

7.1.2.2 Adaption der Fahrzeugregelung

Eine weitere Aufgabe des funktionalen Systemmoduls 'Fahrzeugführung' ist, die Fahrzeugregelung an die aktuellen Bedingungen anzupassen. Die in Abbildung 7.3 vorgestellte Reglertopologie ist keineswegs fix. Wie in [MAURER 00] beschrieben, können Reglerparameter zur Laufzeit an die jeweiligen Verhältnisse adaptiert, komplette Parametersätze für Regler ausgetauscht oder Regler mit unterschiedlicher Struktur eingesetzt werden. Die der Fahrzeugregelung überlagerte Fahrzeugführung kann dadurch abhängig von der aktuellen Situation auf die einzelnen Regler einwirken und sie den gegebenen Rahmenbedingungen anpassen.

Als Indikatoren, ob ein aktuell eingesetzter Regler in erster Linie stabil, und wenn dies zutrifft, im gewünschten Rahmen robust arbeitet, stehen neben den Eigenfahrzeugzustandsgrößen bzw. den Zustandsgrößen der für eine Regelung relevanten Bezugsobjekte eine Reihe von Gütemaßen zur Beurteilung der Regelkreisgüte zur Verfügung. Neben Qualitätsmaßen für Regelkreise, wie sie in [MAURER 00] ausführlich diskutiert werden, sind dies die aus Abschnitt 6.1.4.2 bekannten Fortschrittsmaße für die Ausführung von Fähigkeiten.

Es werden dazu für die aktuell in Ausführung befindlichen Fahrhandlungsfähigkeiten und Fortbewegungsfertigkeiten die Fortschrittsmaße von der Fahrzeugführung bestimmt und ausgewertet. Die Fortschrittsmaße dienen neben der Fahrzeugführung auch anderen, in einer funktionalen Systemhierarchie höher angesiedelten Modulen zur Überwachung des

Ablaufs von sich in Ausführung befindenden Fortbewegungsfähigkeiten. Für derartige Systemeinheiten ist es nicht mehr von Bedeutung, wie die Regler im Einzelnen ihre Aufgabe erfüllen, sondern inwiefern das durch die Regler generierte Fahrverhalten den Vorstellungen entspricht, was anhand der Fortschrittsmaße kontrolliert wird.

7.1.2.3 Überwachung der Verfügbarkeit von Fortbewegungs-Fähigkeiten

Mit der Möglichkeit der Adaption der Fahrzeugregelung besitzt die Fahrzeugführung ein Instrument, gestaltend auf die Ausführung einer Fortbewegungs-Fähigkeit einzuwirken. Des weiteren hat die Fahrzeugführung aber auch Monitoringaufgaben zu erledigen.

Als Experte für Fortbewegungs-Fähigkeiten ist von der Fahrzeugführung festzulegen, ob die jeweilige Fortbewegungs-Fähigkeit verfügbar ist. Gemäß Abschnitt 6.1.4.1 bedeutet dies für die Fahrzeugführung, zu überprüfen, ob alle für die Ausführung einer Fortbewegungsfertigkeit oder Fahrhandlungsfähigkeit notwendigen Bedingungen erfüllt sind. Je nachdem, welcher Hierarchiestufe die zu überwachende Fortbewegungs-Fähigkeit angehört, gestaltet sich diese Aufgabe verschieden.

Fortbewegungsfertigkeiten der Längs- sowie der Querführung gehören der untersten Stufe der Fähigkeitenhierarchie an und haben daher sehr engen Bezug zur Hardware (Aktuatoren, Rechnerhardware, ...). Die Verfügbarkeit bestimmter Hardwarekomponenten legt daher gleichzeitig fest, ob Fortbewegungsfertigkeiten, welche diese Komponenten nutzen, verfügbar sind. Im Bereich der Kraftfahrzeugtechnik kommen für die Überwachung der Verfügbarkeit von Kraftfahrzeugkomponenten typische kraftfahrzeugspezifische Verfahren zum Einsatz. In letzter Zeit wurden im Zuge der Entwicklung von 'drive-by-wire'-Systemen für Kraftfahrzeuge neue Methoden entwickelt, um derart sicherheitskritische Komponenten zu überwachen [RINGLER ET AL. 98], was in der Luftfahrt seit längerem schon Gang und Gäbe ist. Aber auch im Bereich der Ausfallüberwachung von konventionellen Kfz-Aktuatoren wie beispielsweise einer hydraulischen Bremsanlage [STRAKY ET AL. 02] oder der bordintegrierten Fehlerdiagnose und Überwachung [BÖRNER ET AL. 00] wurden in den letzten Jahren neue Ergebnisse erzielt.

Da Fahrhandlungsfähigkeiten durch Kombination mehrerer Längs- und Querführungsfertigkeiten entstehen, ist bei der Klärung der Frage, ob die jeweilige Fahrhandlungsfähigkeit verfügbar ist, zunächst zu klären, ob alle für die Ausführung der Fahrhandlungsfähigkeit notwendigen Längs- und Querführungsfertigkeiten verfügbar sind. Je nach Komplexität der jeweiligen Fahrhandlungsfähigkeit kann es nötig sein, dass weitere fahrhandlungsspezifische Bedingungen kontrolliert werden müssen.

Im Rahmen der Fahrzeugführung stehen somit einige Mechanismen zur Verfügung, um auf die Ausführung einer Fahrhandlung Einfluß zu nehmen und selbige zu überwachen. Welche Bedeutung im Rahmen des Fähigkeitenmonitorings dabei einer der Fahrzeugführung überlagerten Entscheidungs- und Überwachungsinstanz zukommt, wird in Kapitel 8 geklärt.

7.2 Fahrmanöver im Detail

Gemäß dem vorigen Kapitel besteht die Kernaufgabe der Fahrzeugführung darin, die durch Fähigkeiten repräsentierten Fahrfunktionen prozedural mittels systemdynamischer Methoden stabil und robust auszuführen. Welche mathematischen wie auch physikalischen Grundlagen hierzu notwendig sind, wird im Folgenden behandelt.

In den letzten Jahren wurde ein Reihe von Fahrmanövern automatisiert. Eines der ersten, die automatisch ausgeführt wurden, war wohl die 'Spurfahrt' [ZAPP 88], [THORPE 90], [BROGGI ET AL. 99]. Diesem folgte die Automatisierung des 'Spurwechsels' [ZAPP 88], [BRÜDIGAM 94], der 'Konvoifahrt' [BRÜDIGAM 94], [MAURER 00], des 'Abbiege'-Manövers [MÜLLER 96], des 'Wendens' [TÖLLE 96], einer 'Notbremsung' [KOPISCHKE 00] oder des 'Einparkens' [KOCHEM ET AL. 02].

Einige dieser Fahrhandlungen wurden im Zuge dieser Arbeit ebenfalls realisiert (vgl. Tabelle 6.2). Sie stellen die Grundlage für die Durchführung autonomer Fahrmissionen dar. Aus nachvollziehbaren Gründen kann nicht auf die Implementierung aller aufgelisteten Fahrhandlungen im Detail eingegangen werden. An dieser Stelle sei auf die angegebene Literatur verwiesen.

Auf zwei Fahrmanöver soll jedoch näher eingegangen werden. Dabei handelt es sich zum einen um das 'Ausweichen', zum anderen wird das 'Stop&Go'-Manöver im Detail vorgestellt. Mit Hilfe des 'Ausweich'-Manövers ist es möglich, lokale Hindernisse zu umfahren. Erst wenn diese Fahrhandlung verfügbar ist, kann auf nicht im voraus eingeplante Objekte (Schlaglöcher, verlorene Ladung etc.) reagiert werden und die Durchführung einer autonomen Fahrmission wird so überhaupt erst möglich. Beim zweiten Manöver handelt es sich um die 'Stop&Go'-Fahrt, einer Erweiterung der 'Kolonnenfahrt' in den niederen Geschwindigkeitsbereich. Diese Fahrhandlung ist aktuelles Entwicklungsthema in der Automobilindustrie und an Forschungsinstituten. In diesem Kontext wird die erarbeitete Realisierung des 'Stop&Go'-Manövers als eine mögliche Lösungsvariante präsentiert.

Für beide Fahrmanöver werden die kinematischen und fahrdynamischen Grundlagen hergeleitet. Ausgehend von dieser Modellierung wird dargestellt, welche bereits vorhandenen Komponenten verwendet werden können, welche angepasst werden müssen und wie die Einbettung in das in Abschnitt 7.1 vorgestellte Fahrzeugführungskonzept erfolgt.

7.2.1 Ausweichen

Beim Ausweich-Manöver handelt es sich primär um eine taktische Fahrhandlung, welche dazu benutzt wird, Hindernisse lokal zu umfahren. Grundlage hierfür ist, dass Hindernisse als solche erkannt werden. Wie die Wahrnehmung beispielsweise von negativen Hindernissen wie Gräben erfolgt, kann in [SIEDERSBERGER ET AL. 01] oder [HOFMANN] nachgelesen werden. Ausgehend von allen wahrgenommenen Hindernissen wird ein an die jeweilige Konstellation angepasste Ausweichtrajektorie berechnet. Hierzu wird in [AMELING 02] der Ansatz der 'virtuellen Deichsel' verfolgt.

Zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung in der Horizontalebene reicht das Einspurmodell aus. Beim Einspurmodell werden die Räder der Vorder- bzw. Hinterachse eines vierrädrigen Kraftfahrzeugs zu je einem Rad in der Achsmittre zusammengefasst. Der Schwerpunkt des Einspurmodells ist die Projektion des realen Fahrzeugschwerpunkts auf die Fahroberfläche. Dies hat zur Folge, dass keine Radlastschwankungen modelliert werden können, was zur getrennten Betrachtung der Horizontaldynamik von der Vertikaldynamik führt.

7.2.1.1 Modellierung der Kurvenfahrt

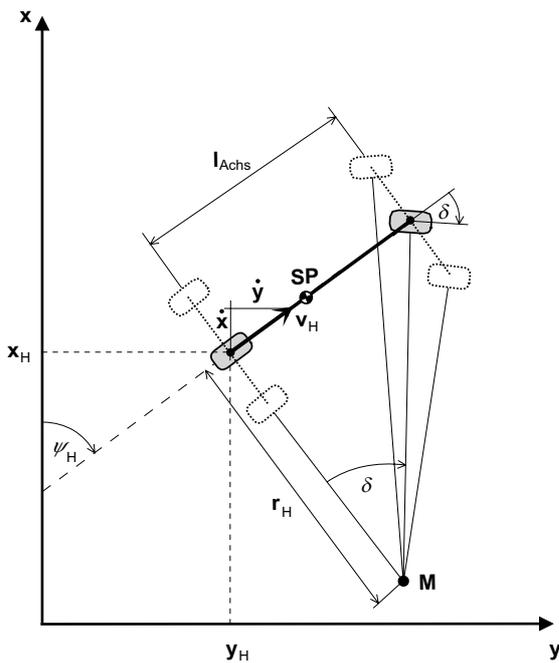


Abbildung 7.5: Nicht-Holonomes Fahrzeugmodell

Abbildung 7.5 zeigt die wichtigsten geometrischen Größen des verwendeten Fahrzeugmodells. Hierbei ist die sogenannte Ackermann-Steuerung gezeigt. Es wird von einer idealisierten Kurvenfahrt ausgegangen, bei der das Hinterrad des Einspurmodells der Bahnkurve exakt folgt und somit kein Schwimmwinkel β und keine Schräglaufwinkel α_V und α_H an den Vorder- bzw. Hinterrädern resultieren. Für den Entwurf des Ausweich-Manövers bei niedrigen Geschwindigkeiten ist eine kinematische Betrachtung, welche sich in Folge der Ackermann-Steuerung ergibt, völlig ausreichend. Die Fahrzeugbewegung - speziell die des Hinterachsmittelpunktes - wird hierbei durch folgende Gleichung für nicht-holonome Vierradfahrzeuge mit Frontlenkung beschrieben [LATOMBE 98]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_H \\ \dot{x}_H \\ \dot{y}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan(\delta)/l_{Achse} \\ \cos(\psi_H) \\ \sin(\psi_H) \end{bmatrix} \cdot v_H \quad (7.1)$$

Dabei ist ψ_H der Bahnazimutwinkel des Fahrzeugs bezüglich eines Bezugskordinatensystems, l_{Achse} der Achsabstand und δ der Lenkwinkel des Einspurmodells. Die Geschwindigkeit des Hinterachsmittelpunktes v_H kann gleich der Geschwindigkeit v des Fahrzeugschwerpunkts gesetzt werden, da bei der vorgestellten Konstellation der Schwimmwinkel und die Schräglaufwinkel der Räder vernachlässigt werden können. Aus Gründen der Transparenz zu anderen Fahrmanövern wie dem 'Abbiegen' wird die 'Ausweich'-Trajektorie für den Hinterachsmittelpunkt bestimmt.

Unter der Annahme, dass sich das Fahrzeug mit der Geschwindigkeit v bewegt:

$$v = \frac{dl}{dt} \quad (7.2)$$

kann das Gleichungssystem von Gl. 7.1 in Integralform geschrieben und statt über die Zeit dt kann über die Lauflänge dl integriert werden:

$$\psi_H(l) = \frac{1}{l_{Achse}} \cdot \int \tan(\delta(l)) dl \quad (7.3)$$

$$x_H(l) = \int \cos(\psi_H(l)) dl \quad (7.4)$$

$$y_H(l) = \int \sin(\psi_H(l)) dl \quad (7.5)$$

Legt man - wie in Abbildung 7.5 dargestellt - die Ackermann-Steuerung zu Grunde, kann der Zusammenhang zwischen Lenkwinkel δ , Achsabstand l_{Achse} und dem Kurvenradius des Hinterachsmittelpunktes $r_H(l)$ bzw. der äquivalenten Krümmung $c_H(l)$ angegeben werden:

$$l_{Achse} \cdot c_H(l) = \frac{l_{Achse}}{r_H(l)} = \tan(\delta(l)) \quad (7.6)$$

Der über die Lauflänge definierte Lenkwinkel $\delta(l)$ in Gl. 7.9 ergibt sich durch Integration der konstanten lauffängenabhängigen Lenkrate δ'_l (Gl. 7.8), welche sich ihrerseits aus der Geschwindigkeit v und der bezüglich der Zeit definierten Lenkrate $\dot{\delta}_t$ ermitteln lässt:

$$\dot{\delta}_t := \dot{\delta}(t) = \frac{d\delta}{dt} \quad (7.7)$$

Mit:

$$\delta'_l := \delta'(l) = \frac{d\delta}{dl} = \frac{\dot{\delta}_t}{v} = const. \quad (7.8)$$

folgt für den Lenkwinkel des Einspurmodells gemäß Abbildung 7.5:

$$\delta(l) = \delta_0 + \int \delta'_l(l) dl = \delta_0 + \delta'_l \cdot \int dl = \delta_0 + \delta'_l \cdot l \quad (7.9)$$

Betrachtet man das Verhalten eines Fahrzeugs bei Kurvenfahrt, so ist es zunächst ausreichend, nur die Kurveneinfahrt zu betrachten, da sich die Ausfahrt symmetrisch zur Kurveneinfahrt darstellt.

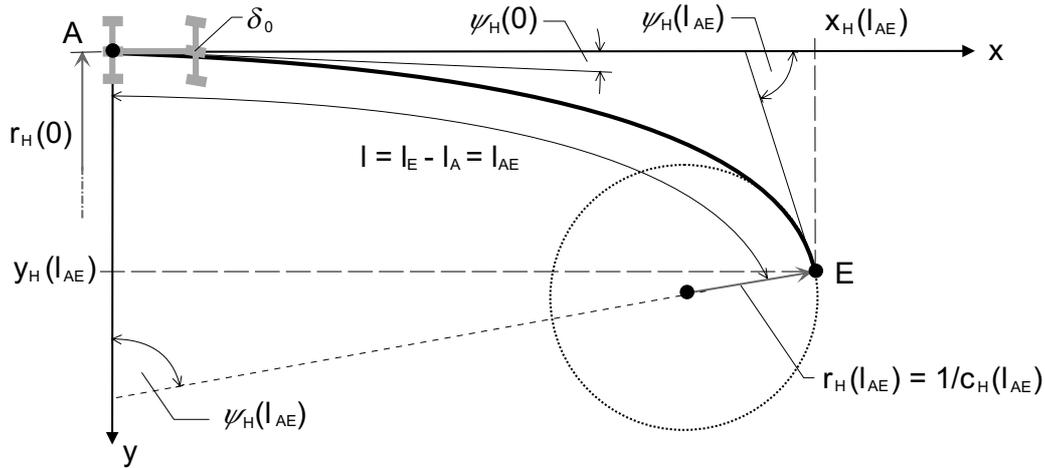


Abbildung 7.6: Modell der Kurveneinfahrt

Bewegt sich ein nicht-holonomes frontgelenktes Radfahrzeug mit der Geschwindigkeit v und wird zu Beginn der Kurveneinfahrt am Punkt A damit begonnen, das Vorderrad mit der konstanten wegabhängigen Lenkwinkelgeschwindigkeit δ'_l zu drehen, so kann die Bahn des Hinterachsschwerpunkts durch eine Klothoide beschrieben werden (siehe Abschnitt 4.2.1). Am Punkt E - nach Durchfahren der Strecke l_{AE} - stimmt der Krümmungsradius $r_H(l = l_{AE}) = r_H(l_{AE})$ der Klothoide des Hinterachsmittelpunkts mit dem erforderlichen Radius der zu durchfahrenden Kurve überein (durch den Kreis in Abb. 7.6 angedeutet). Die Strecke $l_{AE} = l_E - l_A$, die der Hinterachsschwerpunkt zwischen den Punkten A und E auf der Klothoide zurücklegt, kann durch folgende Beziehung, welche sich aus den Gleichungen 7.6 und 7.9 ergibt, bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \delta(l_{AE}) &= \arctan\left(\frac{l_{Achs}}{r_H(l_{AE})}\right) = \delta_0 + \delta'_l \cdot l_{AE} \\ l_{AE} &= \frac{1}{\delta'_l} \cdot \left(\arctan\left(\frac{l_{Achs}}{r_H(l_{AE})}\right) - \delta_0\right) \end{aligned} \quad (7.10)$$

Ein von Null verschiedener Anfangslenkwinkel δ_0 im Punkt A - stets bezogen auf das Einspurmodell - bedeutet, dass nicht aus einer Geradeausfahrt heraus in die Kurvenfahrt übergegangen wird, sondern dass bei Beginn des Einlenkens gemäß Gl. 7.6 von einer Anfangskrümmung $c_H(l = 0) = c_H(0) \neq 0$ ausgegangen werden muss.

Der Tangentialwinkel $\psi_H(l_{AE})$ des Hinterachsmittelpunkts im Punkt E der Kurveneinfahrt-Klothoide gemäß Abb. 7.6 berechnet sich unter Verwendung von Gl. 7.3 zu:

$$\psi_H(l_{AE}) = \frac{1}{l_{Achs}} \int_0^{l_{AE}} \tan(\delta_0 + \delta'_l \cdot l) dl = -\frac{1}{\delta'_l \cdot l_{Achs}} \cdot \ln\left(\frac{\cos(\delta_0 + \delta'_l \cdot l_{AE})}{\cos(\delta_0)}\right) \quad (7.11)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 7.10 in 7.11 ergibt sich:

$$\psi_H(l_{AE}) = -\frac{1}{\delta'_l \cdot l_{Ach_s}} \cdot \ln \left(\frac{\cos \left(\arctan \left(\frac{l_{Ach_s}}{r_H(l_{AE})} \right) \right)}{\cos(\delta_0)} \right) \quad (7.12)$$

Allgemein kann der Tangentenwinkel eines beliebigen Punktes zwischen dem Klothoidenanfang (Punkt A) und dem Klothoidenende (Punkt E) in Abhängigkeit der Laufvariablen l angegeben werden. Dieser Winkel $\psi_H(l)$ entspricht dem Bahnazimutwinkel aus Abb. 7.5:

$$\psi_H(l) = -\frac{1}{\delta'_l \cdot l_{Ach_s}} \cdot \ln \left(\frac{\cos \left(\arctan \left(\frac{l_{Ach_s}}{r_H(l)} \right) \right)}{\cos(\delta_0)} \right) \quad (7.13)$$

Es liegt somit ein Zusammenhang zwischen $\psi_H(l)$ und den Lenkungsgrößen δ_0 , δ'_l des Einspurmodells vor, der noch vom Radius $r_H(l)$ am Ort l abhängig ist. Neben der in Gl. 7.13 vorgestellten Form kann der Bahnazimutwinkel des Hinterachsschwerpunkts $\psi_H(l)$ aber auch unter Nutzung der Klothoidengeometrie in Abhängigkeit von der Bahnkrümmung $c_H(l) = c_{0,H} + c_{1,H} \cdot l$ (siehe Gl. 4.1) bestimmt werden:

$$\psi_H(l) = \int c_H(l) dl = \left(c_{0,H} + \frac{c_{1,H} \cdot l}{2} \right) \cdot l \quad (7.14)$$

Auch diese Form der Gleichung für den Bahnazimutwinkel $\psi_H(l)$ des Hinterachsschwerpunkts macht die Lösung der Gleichungen 7.4 und 7.5 für $x_H(l)$ und $y_H(l)$ nicht trivial, da wegen des quadratischen Arguments der Gl. 7.14 in den trigonometrischen Funktionen der Gleichungen 7.4 und 7.5 sogenannte Fresnel-Integrale gelöst werden müssen.

Durch Verwendung der Reihenentwicklung für $\sin()$ - und $\cos()$ -Funktionen, welche nach dem Polynomglied 3. Ordnung abgebrochen wird

$$\sin(\psi) \cong \psi - \frac{\psi^3}{6} \quad \text{und} \quad \cos(\psi) \cong 1 - \frac{\psi^2}{2} \quad (7.15)$$

in den Gleichungen 7.4 und 7.5, kann eine Näherungslösung hergeleitet werden:

$$\begin{aligned} x_H(l) &= \int \cos(\psi_H(l)) dl \\ &\cong l - \frac{1}{6} c_{0,H}^2 l^3 - \frac{1}{8} c_{0,H} c_{1,H} l^4 - \frac{1}{40} c_{1,H}^2 l^5 \end{aligned} \quad (7.16)$$

$$\begin{aligned} y_H(l) &= \int \sin(\psi_H(l)) dl \\ &\cong \frac{1}{2} c_{0,H} l^2 + \frac{1}{6} c_{1,H} l^3 - \frac{1}{24} c_{0,H}^3 l^4 - \frac{1}{20} c_{0,H} c_{1,H} l^5 - \frac{1}{48} c_{0,H} c_{1,H}^2 l^6 - \frac{1}{336} c_{1,H}^3 l^7 \end{aligned} \quad (7.17)$$

In [BEHRINGER 96] wurde gezeigt, dass bei $l = 1/\sqrt{c_1}$ gegenüber dem tatsächlichen Verlauf der Klothoide mit einem 3-prozentigen Fehler bei der x -Koordinate und mit einem Fehler von etwa 2 Prozent bei der y -Koordinate zu rechnen ist, wenn die Gleichungen 7.16 und 7.17 nach dem Polynomglied 3. Ordnung abgebrochen werden:

$$x_H(l) \cong l - \frac{1}{6}c_{0,H}^2 l^3 \quad (7.18)$$

$$y_H(l) \cong \frac{1}{2}c_{0,H} l^2 + \frac{1}{6}c_{1,H} l^3 \quad (7.19)$$

Unter der Annahme, dass $r_H(0)$ im Anfangspunkt A der Klothoide gemäß Abbildung 7.6 bekannt ist und aufgrund der Beziehung $c_{0,H} = 1/r_H(0)$ kann das Gleichungssystem bestehend aus den beiden Gleichungen 7.18 und 7.19 gelöst werden.

7.2.1.2 Festlegung der Bahnkurve beim Ausweichen

Es ist nun eine Ausweichtrajektorie unter Verwendung der im vorherigen Abschnitt mathematisch beschriebenen Klothoiden so festzulegen, dass stets eine wegabhängige Lenkrate δ'_l gemäß Gleichung 7.20 angegeben werden kann, welche zur gewünschten Bahnkurve führt. Hierzu ist aus den Größen, welche die Lage des Hindernisses relativ zum Eigenfahrzeug beschreiben (siehe Abb. 7.7), auf die in Gleichung 7.20 notwendigen Größen zu schließen. Gleichung 7.20 ergibt sich durch Umformen von Gleichung 7.13.

$$\delta'_l = -\frac{1}{\psi_H(l) \cdot l_{Achse}} \cdot \ln \left(\frac{\cos \left(\arctan \left(\frac{l_{Achse}}{r_H(l)} \right) \right)}{\cos(\delta_0)} \right) = const. \quad (7.20)$$

Je nachdem in welcher Entfernung ein Hindernis entdeckt wird, sind unterschiedliche Ausweichtrajektoren möglich, welche aus mehreren Klothoiden bestehen können. In Abbildung 7.7 sind exemplarisch drei mögliche Bahnkurven des Hinterachsmittelpunktes zum Umfahren eines Hindernisses dargestellt, die abhängig davon, in welcher Entfernung mit dem 'Ausweichen' begonnen wird, zum Einsatz kommen.

Ist aufgrund der vorgegebenen Ziele und der geometrischen Konstellation zwischen Fahrzeug und Hindernis die Entscheidung gefallen, dem Hindernis links oder rechts auszuweichen, wird ein Punkt (Punkt Z in Abbildung 7.7) festgelegt, der auf der Ausweichkurve des Hinterachsmittelpunktes liegen soll und an dem das Fahrzeug dem Hindernis beim Umfahren am nächsten kommt. Dazu wird um das Hindernis ein Sicherheitskorridor gelegt, der nicht befahren werden darf und dessen Breite b_{Sec} beliebig z.B. in Abhängigkeit von der Hindernisart, der Güte der Hinderniswahrnehmung, der Fahrzeugart etc. festgelegt werden kann. Aus den Koordinaten und der Geometrie des Hindernisses, der Breite

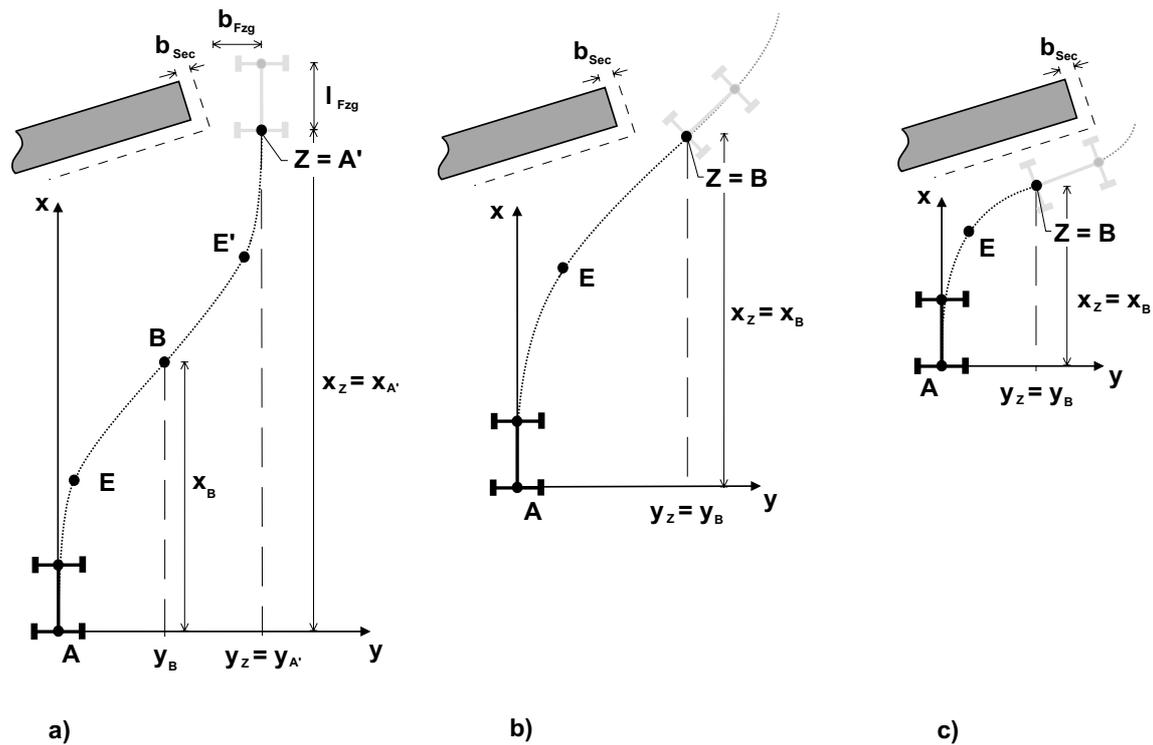


Abbildung 7.7: Spezielle Bahnkurven beim Ausweichen

des Sicherheitskorridors b_{Sec} , der Breite des Fahrzeugaufbaus b_{Fzg} und der Fahrzeuglänge l_{Fzg} können die Koordinaten (x_Z, y_Z) des Trajektorienpunktes Z bestimmt werden.

Zwischen dem Startpunkt, an dem sich der Hinterachsschwerpunkt bei Beginn des 'Ausweich'-Manövers befindet (Punkt A in Abbildung 7.7) und dem Trajektorienpunkt Z, an dem sich der Hinterachsmittelpunkt am Fahrmanöverende befinden soll, gilt es nun, eine Folge von Klothoiden zu legen, durch die sich eine passende Ausweichtrajektorie ergibt. Dabei wechseln sich in der Regel Klothoiden, welche die Kurveneinfahrt beschreiben, mit Klothoiden für die Kurvenausfahrt ab. Ausgehend von den geometrischen Verhältnissen sind jeweils für die Anfangs- und Endpunkte der einzelnen Klothoiden die kartesischen Koordinaten zu bestimmen. Hierzu nutzt man die Annahme, dass das 'Ausweich'-Manöver symmetrisch abläuft und somit nur die Klothoide für die Kurveneinfahrt betrachtet werden muss.

Je eine Klothoide für die Kurveneinfahrt und eine für die Kurvenausfahrt können zu einem gemeinsamen Kurvenzug zusammengefasst werden. Es ergibt sich die in Abbildung 7.8 dargestellte Konstellation, wobei der Fall skizziert ist, bei dem keine Anfangskrümmung $c_H(0)$ vorhanden und somit der Tangentenwinkel im Punkt A Null ist ($\psi_H(0) = \psi_0 = 0$).

Aufgrund der geometrischen Verhältnisse des Drachenvierecks (A-E-B-F) kann die Strecke d_{AE} aus x_B und y_B berechnet werden:

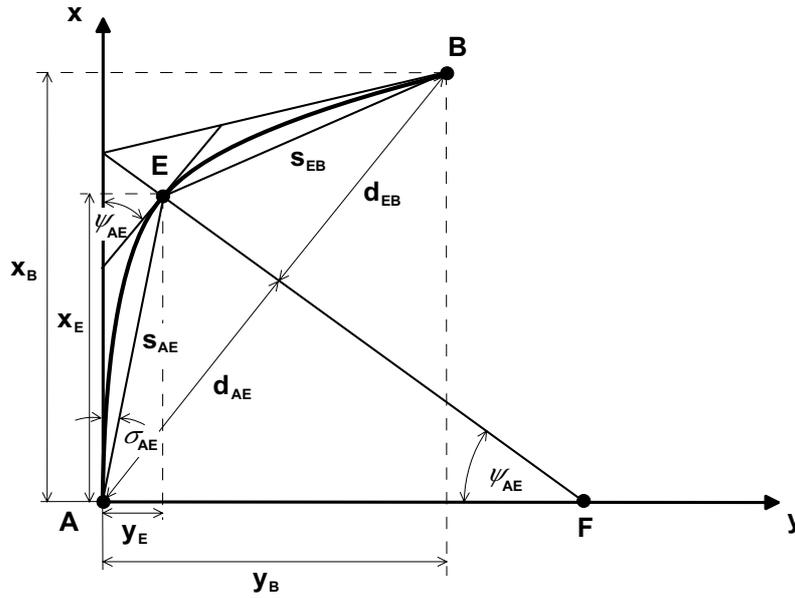


Abbildung 7.8: Geometrie eines Kurvenzuges

$$d_{AE} = \frac{\sqrt{x_B^2 + y_B^2}}{2} \quad (7.21)$$

Der Sehnwinkel σ_{AE} der Einfahrtklothoide kann gemäß [KASPER ET AL. 68, S. 45] durch folgende Näherungsformel aus den Tangentenwinkeln $\psi_H(0) = \psi_0$ am Punkt A und $\psi_H(l_{AE}) = \psi_{AE}$ am Punkt E bestimmt werden:

$$\sigma_{AE} \cong \frac{1}{3} \cdot \left(\psi_0 - \sqrt{\psi_0 \cdot \psi_{AE} + \psi_{AE}} \right) \quad (7.22)$$

Mit Hilfe trigonometrischer Beziehungen und unter Verwendung der Gleichungen 7.21 und 7.22 lässt sich die Länge s_{AE} der Klothoidensehne angeben:

$$s_{AE} = \frac{d_{AE}}{\cos(\psi_{AE} - \sigma_{AE})} \quad (7.23)$$

Mit der Klothoidensehne s_{AE} und dem Sehnwinkel σ_{AE} ist nunmehr die Bestimmung der Koordinaten des Punktes E möglich:

$$x_E = s_{AE} \cdot \cos(\sigma_{AE}) \quad (7.24)$$

$$y_E = s_{AE} \cdot \sin(\sigma_{AE}) \quad (7.25)$$

Setzt man $x_H(l_{AE}) = x_E$ und $y_H(l_{AE}) = y_E$, so kann mit Hilfe der Gleichungen 7.18, 7.19 und 4.1 der Krümmungsradius $r_H(l_{AE})$ der Bahnkurve des Hinterachsschwerpunkts im Punkt E bestimmt werden:

$$r_H(l_{AE}) = \frac{l_{AE}^2}{6 \cdot s_{AE} \cdot \sin(\sigma_{AE}) - 2 \cdot c_{0,H} \cdot l_{AE}^2} \quad (7.26)$$

mit l_{AE} aus Gleichung 7.18 und 7.24.

Für den Fall, dass aus einer Geradeausfahrt ins 'Ausweichen' gewechselt wird und somit für die Anfangskrümmung $c_{0,H} = 0$ gesetzt werden kann, vereinfacht sich die Gleichung 7.26 zu:

$$r_H(l_{AE}) = \frac{1}{6} \cdot s_{AE} \cdot \cos(\sigma_{AE}) \cdot \cot(\sigma_{AE}) \quad (7.27)$$

Eingesetzt in Gleichung 7.20 erhält man die wegabhängige Lenkrate δ'_l und mit Gleichung 7.8 unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit die Lenkrate $\dot{\delta}_t$ bezüglich der Zeit, die an den Lenkaktor geleitet wird. Die Lenkrate δ'_l ist jeweils über die Lauflänge l_{AE} einer Teilklothoide, die sich gemäß Gleichung 7.10 berechnet, konstant.

7.2.1.3 Kinematische und fahrdynamische Randbedingungen

Der Bestimmung einer Ausweichtrajektorie sind allerdings Grenzen gesetzt. So kann der Hinterachsschwerpunkt eines Kraftfahrzeugs keine kleineren Kurvenradien als den minimalen Wendekreisradius fahren. Dies hat Auswirkungen auf den in Gleichung 7.26 bzw. 7.27 bestimmten Radius $r_H(l_{AE})$ im Punkt E. Ist dieser kleiner als der Wendekreisradius, so ist die geplante Trajektorie nicht fahrbar. Es muss eine andere Trajektorie gemäß Abbildung 7.7 berechnet werden. Ist dies nicht möglich, so kann das 'Ausweich'-Manöver nicht durchgeführt werden.

Der Radius $r_H(l_{AE})$ hat auch unmittelbar Auswirkungen auf die während des 'Ausweich'-Manövers fahrbare Geschwindigkeit $v_{Ausweichen}$. Da der Radius entlang der Ausweichtrajektorie im Punkt E bzw. E' seinen minimalen Wert besitzt, ist an diesen Punkten die Querschleunigung a_y während des Ausweichens am höchsten. Die maximal mögliche Geschwindigkeit $v_{Ausweichen,Max}$ lässt sich wie folgt bestimmen:

$$v_{Ausweichen,Max} = \sqrt{a_{y,Max} \cdot r_H(l_{AE})} \quad (7.28)$$

Dies hat unmittelbar zur Folge, dass die Geschwindigkeit gedrosselt werden muss, falls diese über der maximalen Ausweichgeschwindigkeit ($v > v_{Ausweichen,Max}$) liegt, da sonst das Fahrzeug ins Rutschen gerät.

7.2.1.4 Darstellung als Fortbewegungs-Fähigkeit

Wie in Abschnitt 7.1.2.1 dargestellt, erfolgt die Umsetzung der für das 'Ausweichen' festgelegten Trajektorien durch Steuerungen oder Regelungen, deren Funktionalität auf der 'regelbasierten Ebene' in Form von grundlegenden Fertigkeiten repräsentiert sind. Aufgrund von Symmetrien (Kurveneinfahrt - Kurvenausfahrt) während des 'Ausweich'-Manövers speziell in der Querdynamik werden gleiche Querführungsfertigkeiten, wie sie auch bei anderen Fahrmanövern wie dem 'Spurwechsel' oder dem 'Abbiege'-Manöver verwendet werden, zur Umsetzung der Ausweichtrajektorie mehrmals eingesetzt.

Für die formale Beschreibung von Fahrhandlungen auf der 'regelbasierten Ebene' stehen die hierarchisch angeordneten Zustandskarten gemäß Abschnitt 6.3.2.2 bzw. 7.1.2.1 zur Verfügung. Einzelne Fahrhandlungen unterscheiden sich in diesem Abstraktionsgrad nur durch die Ausprägungen der Automaten für die Längs- bzw. Querführung sowie in den für die jeweilige Fahrhandlung typischen Berechnungsvorschriften zur Trajektorien-generierung, welche in demjenigen Funktionsblock auf der '4D-Ebene' umgesetzt werden, der zum Zustand Calculation der 'regelbasierten Ebene' korrespondiert. Es ergibt sich der schematische Verlauf, der für Fahrmanöver charakteristisch ist.

In Abbildung 7.9 ist ein Ausschnitt der hierarchisch angeordneten Zustandskarten für das Fahrmanöver 'Ausweichen' dargestellt. Im Zustand Calculation des 'Ausweich'-Manövers werden gemäß Abschnitt 7.1.2.1 im korrespondierenden Funktionsblock auf der '4D-Ebene' sämtliche für den Ablauf der Fahrhandlung notwendigen Vorsteuer- oder Führungsgrößen berechnet. Außerdem werden Transitionsbedingungen für die Zustandsautomaten der Längs- und Querführung bestimmt, die nicht aufgrund fester Regeln vorgegeben sind, sondern sich aus den lokalen Gegebenheiten ableiten.

Als Beispiel für eine derartige, von der jeweiligen Situation abhängige Transitionsbedingung sei hier im Bereich der Querführung die Festlegung, wie lange unterlagerte Fortbewegungs-Fertigkeiten wie 'Einlenken' oder 'Auslenken' genutzt werden sollen, angeführt. Die Ausführdauer ergibt sich aus der auf die Lauflänge bezogenen Größe l_{AE} gemäß Gl. 7.10.

Der Automat für die Längsführung besteht beim 'Ausweich'-Manöver nur aus den Zuständen 'Geschwindigkeithalten' und 'Verzögern', was auf der '4D-Ebene' gemäß Tabelle 7.1 durch den 'Tempomaten' bzw. durch die 'Vorgabe einer Verzögerungstrajektorie' umgesetzt wird. Ist die Geschwindigkeit für das 'Ausweich'-Manöver zu hoch, so wird zunächst v_{Ist} reduziert. Lässt sich die Geschwindigkeit allerdings nicht innerhalb der verbleibende Strecke bis zum Hindernis nicht abgebaut werden, so ist das 'Ausweich'-Manöver nicht realisierbar.

Im Rahmen der Querführung kommen vier Fertigkeiten zum Einsatz. Die Fertigkeit 'Passieren' wird dazu genutzt, bei Hindernissen mit größerer Ausdehnung an diesem entlang zu fahren (vgl. Abbildung 7.7c). Aus regelungstechnischer Sicht ist in diesem Automatenzustand auf der '4D-Ebene' der Querregler aktiv, dessen Solltrajektorie sich aus der Kontur des Hindernisses und dem einzuhaltenden Sicherheitsabstand b_{Sec} ergibt. Der Zustand

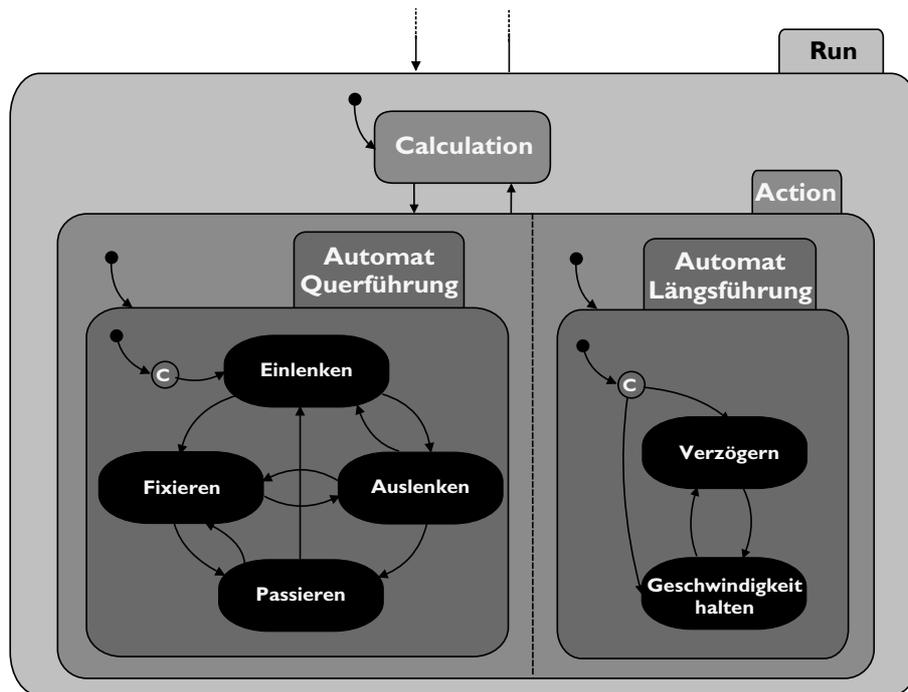


Abbildung 7.9: Hierarchische Zustandskarten des 'Ausweich'-Manövers

'Fixieren' dient dazu, einen konstanten Lenkeinschlag beizubehalten. Auf der '4D-Ebene' entspricht dies einem Vorsteuerwert von $\dot{\delta}_t = 0$ für die Lenkrate. Beim 'Einlenken' und beim 'Auslenken' wird der Vorsteuerwert $\dot{\delta}_t$ an die Lenkung gegeben, der sich mittels der Gleichungen 7.8 und 7.20 als spezifische Lenkungssollgröße für die jeweils aktuelle Manöverphase ('Einlenken' oder 'Auslenken') aus der Ausweichtrajektorie ergibt. Speziell beim 'Auslenken' kann der Vorsteuergröße für die Lenkung ein Regleranteil überlagert werden, um Abweichungen von der Solltrajektorie, welche sich während der Ausführung des 'Ausweich'-Manövers aufgrund nichtmodellierter Störungen (Windeinflüsse, Bodenbeschaffenheit, ...) ergeben haben, zu kompensieren.

Experimentelle Ergebnisse zum Thema 'Ausweichen', welche von Fahrversuchen mit dem Versuchsfahrzeug VAMORS stammen, sind in Abschnitt 9.2.1 dokumentiert.

7.2.2 Stop&Go

Wie beim 'Ausweichen' handelt es sich beim 'Stop&Go'-Manöver um eine taktische Fahrhandlung. In den meisten Fällen steht bei der Planung einer Route nicht fest, ob und wo genau ein 'Stop&Go'-Fahren notwendig ist. Für die Durchführung autonomer Fahrmissionen ist es aber unerlässlich, dass ein autonomes Fahrzeug über derartige Fahrhandlungsfähigkeiten verfügt, um auf Fahrsituationen, welche ein 'Stop&Go'-Fahren erfordern, adäquat reagieren zu können.

Das 'Stop&Go'-Manöver zeichnet sich dadurch aus, dass mit niedriger Geschwindigkeit in dichtem, stockendem Verkehr gefahren wird. Dazu gehört neben dem 'Hinterherfahren' auch das 'Stoppen' hinter einem anhaltenden Fahrzeug und das 'Wiederauffahren'. Dies ist typisches Fahrverhalten in Stausituationen. Andere häufig im Stau zu sehende Fahrmanöver wie der 'Spurwechsel' werden im Rahmen des 'Stop&Go'-Manövers nicht betrachtet. Die Querführung beim 'Stop&Go' beschränkt sich somit darauf, das Fahrzeug in der eigenen Fahrspur zu halten. Weitere Querführungsaktivitäten wie das versetzte Fahren in der Fahrspur, um z.B. eine Rettungsgasse zu bilden, wurden nicht explizit untersucht, können aber mit der genutzten Querführungsfertigkeit 'Spurhalten' realisiert werden, indem ein Sollablage ungleich Null vorgegeben wird. Charakteristisch für das 'Stop&Go'-Manöver sind demnach die Längsführungsaktivitäten im niederen Geschwindigkeitsbereich.

Fahrten mit niedriger Geschwindigkeit stellen allerdings eine große Herausforderung an die Fahrzeugregelung dar. Zum einen sind in diesem Geschwindigkeitsbereich extreme Nichtlinearitäten im Antriebsstrang vorhanden, zum anderen muss bei Geschwindigkeiten nahe 0 km/h ständig leicht gebremst werden, da ein Fahrzeug mit Automatikgetriebe bei Standgas stets rollen würde. Wie die Längsführung für diesen Geschwindigkeitsbereich gelöst wurde, wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

7.2.2.1 Auslegung der Längsregelung

Charakteristisch für die Längsregelung im Rahmen des 'Stop&Go'-Manövers sind zum einen niedrige Geschwindigkeiten und zum anderen ein relevantes vorausfahrendes Fahrzeug, dem hinterhergefahren wird. Dieses Fahrverhalten kann mit Hilfe einer Abstandsregelung realisiert werden, die für diesen Geschwindigkeitsbereich auszulegen ist.

Gemäß [BRÜDIGAM 94] kann ein Abstandsregler als Zustandsregelung mit Störgrößenaufschaltung realisiert werden. In [SIEDERSBERGER 96b] wurde der Abstandsregler für die 'Folgefahrt' bei Geschwindigkeiten über 30 km/h um zusätzliche Totzonenglieder erweitert. Die Struktur dieses Reglers kann durch das in Abbildung 7.10 gezeigte Blockschaltbild dargestellt werden.

Das Übertragungsverhalten des geschwindigkeitsgeregelten Eigenfahrzeugs kann näherungsweise durch ein System erster Ordnung angegeben werden. Realisiert wird dies durch einen Längsregler, der zum Einregeln der Sollgeschwindigkeit sowohl auf den Geschwindigkeits- als auch auf den Verzögerungsregler zurückgreift (vgl. Abbildung 7.3). In [SIEDERSBERGER 96b] wird gezeigt, wie in Abhängigkeit von der aktuellen Geschwindigkeit v_{Ist} und der Straßenneigung γ der passendste der beiden Regler ausgewählt wird. Bei sehr kleinen Geschwindigkeiten ergibt sich zusätzlich die Notwendigkeit ständig zu bremsen, um diese kleinen Geschwindigkeiten zu ermöglichen, da bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe ohne aktiven Bremseingriff keine Geschwindigkeiten unter einer bestimmten fahrzeugabhängigen Schwelle möglich sind. Durch den Einsatz zweier unterschiedlicher Regler, welche zum Längsregler zusammengefasst sind, ergeben sich allerdings für

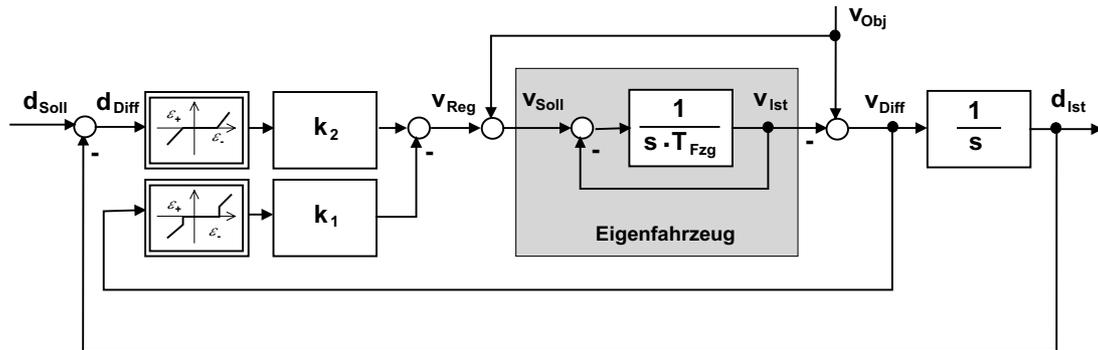


Abbildung 7.10: Abstandsregler mit vollständiger Zustandsgrößenrückführung, Störgrößenaufschaltung und Totzonengliedern

den Verzögerungs- bzw. Beschleunigungsfall zwei unterschiedliche Zeitkonstanten T_{Gas} und T_{Bremse} für das geschwindigkeitsgeregelt Eigenfahrzeug, die bei der Auslegung des Abstandsreglers berücksichtigt werden müssen.

Durch Aufschaltung der als Störgröße wirkenden Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs auf den Eingang des Eigenfahrzeug-Systems erreicht man eine Angleichung der Eigenfahrzeug- an die Führungsfahrzeuggeschwindigkeit.

Der Abstandsregler ist als Zustandsregler ausgelegt. Der Abstand d_{Ist} wird zusammen mit der Differenzgeschwindigkeit v_{Diff} aus Eigenfahrzeug- und Führungsfahrzeuggeschwindigkeit zurückgeführt. Die Regeldifferenzen d_{Diff} und v_{Diff} werden über Totzonenglieder geführt, um kleine Schwankungen der Regeldifferenzen um den Nullpunkt nicht zu berücksichtigen. Für die Auslegung der Abstandsregelung werden die Totzonenglieder zunächst vernachlässigt, ihre Wirkung wird im Anschluss an die Reglerauslegung diskutiert.

Die Zustandsgleichungen für den geschlossenen Regelkreis lauten ohne die Totzonenglieder:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} \cdot u(t) + \mathbf{g} \cdot z(t) \quad (7.29)$$

mit:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} v_{Ist} \\ d_{Ist} \end{bmatrix}, \quad u(t) = d_{Soll}, \quad z(t) = v_{Obj} \quad \text{und}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_{Fzg}} \cdot (1 - k_1) & -\frac{k_2}{T_{Fzg}} \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{k_2}{T_{Fzg}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \frac{1-k_1}{T_{Fzg}} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Die Pole des geschlossenen Regelkreises berechnen sich gemäß [FÖLLINGER 94]:

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0. \quad (7.30)$$

Damit ergibt sich:

$$\det \begin{bmatrix} s + \frac{1-k_1}{T_{Fzg}} & \frac{k_2}{T_{Fzg}} \\ 1 & s \end{bmatrix} = s^2 + \frac{1-k_1}{T_{Fzg}}s - \frac{k_2}{T_{Fzg}}. \quad (7.31)$$

Aufgrund der Tatsache, dass die Pole des geschlossenen Regelkreises den Wurzeln der charakteristischen Gleichung entsprechen, können durch Vorgabe einer gewünschten Pollage für den geschlossenen Regelkreis die Reglerparameter k_1 und k_2 mittels Koeffizientenvergleich bestimmt werden. Bei der Vorgabe der Pollage ist bei einem Abstandsregler für den niederen Geschwindigkeitsbereich besonders darauf zu achten, dass der einzuregelnde Abstand im Vergleich zur Auslegung für hohe Geschwindigkeiten stärker zu gewichten ist, da aufgrund kleiner Geschwindigkeiten auch die zu fahrenden Abstände gering sind und daher ein zu starkes Abweichen vom Sollabstand - speziell ein Unterschreiten - ein Sicherheitsrisiko darstellt.

Wegen der unterschiedlichen Zeitkonstanten T_{Gas} und T_{Bremse} der Regelstrecke (geschwindigkeitsgeregeltes Eigenfahrzeug) im Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsfall sind zwei verschiedene Vorgehensweisen bei der Reglerparameterbestimmung möglich.

Bei der ersten Variante werden jeweils optimierte Pole für den Beschleunigungs- sowie für den Verzögerungsfall vorgegeben. Mit den jeweils passenden Zeitkonstanten werden die Reglerparameter k_1 und k_2 berechnet, wodurch sich für den Beschleunigungs- und den Verzögerungsfall unterschiedliche Reglerparametersätze ergeben. Je nachdem, welcher Regler (Verzögerungs- oder Geschwindigkeitsregler) vom Längsregler ausgewählt wird, ist auch der passende Parametersatz für den Abstandsregler auszuwählen. Beim Umschalten zwischen den beiden Parametersätzen für den Abstandsregler ist darauf zu achten, dass es zu keinen Instabilitäten oder zu Überschwingern kommt.

Im zweiten Fall wird die Pollage für den geschlossenen Abstandsregelkreis so gewählt, dass ein Parametersatz für den Abstandsregler bestimmt werden kann, der sowohl im Beschleunigungs- als auch im Verzögerungsfall stabiles und robustes Reglerverhalten garantiert und annähernd die gewünschte Dynamik, nämlich den Abstand stärker zu gewichten, aufweist. Diese Vorgehensweise wurde bei der Realisierung des Abstandsregler für den niederen Geschwindigkeitsbereich angewandt (siehe [SIEDERSBERGER 96b]).

Ebenso ist in [SIEDERSBERGER 96b] nachzulesen, wie die Grenzwerte ϵ_- und ϵ_+ der Totzonenglieder in Abhängigkeit der aktuellen Fahrgeschwindigkeit bestimmt werden. Die untere Grenze ϵ_- ist außerdem um die Hälfte kleiner als die obere, wodurch früher auf eine Abstandsverringerung als auf eine Erhöhung des Abstands zwischen Eigenfahrzeug und Vorausfahrendem reagiert wird:

$$\epsilon_+ = k_\epsilon \cdot v_{Ist} \quad \text{und} \quad \epsilon_- = \frac{\epsilon_+}{2} \quad (7.32)$$

Ein Wert von $0.1 \frac{s}{m}$ für den Parameter k_ϵ hat sich in Rahmen von Fahrversuchen als günstig erwiesen. Mit der Einführung der Totzonenglieder wird letztendlich erreicht, dass nicht

auf jedwede Schwankung von d_{Diff} und v_{Diff} um deren Nullpunkt reagiert wird. Dem Abstandsregler werden im Bereich der Totzonen Regeldifferenzen von Null vorgegeben, wodurch keine Regelaktivität in diesen Phasen stattfindet. Es ergibt sich ein ruhiges Regelverhalten. Die Sprünge der Differenzwerte d_{Diff} und v_{Diff} an den Grenzen der Totzonen führen zu keinen Instabilitäten des Abstandsreglers, da sie durch die geschwindigkeitsabhängige Festlegung der Totzonengrenzen in einem Bereich liegen, wie sie auch durch Schwankungen bei der Messung der Relativgeschwindigkeit und des Abstands entstehen können.

Neben dem Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs eignet sich der Abstandsregler auch zum Anfahren, wenn das Zielfahrzeug seinerseits losfährt. Es sind keine Änderungen an den Parametern oder an der Struktur des Reglers notwendig. Besondere Maßnahmen wie sie beispielsweise beim Anfahren an einer Steigung notwendig sind, müssen an dieser Stelle nicht getroffen werden, da derartige Effekte bereits durch den unterlagerten Längsregler kompensiert werden (siehe [SIEDERSBERGER 96b]).

Anders verhält es sich, wenn das vorausfahrende Fahrzeug anhält. Um ein zu großes Unterschreiten des Anhalteabstands $d_{Stillstand}$ zu verhindern, was mit dem vorgestellten Abstandsregler aufgrund der Berücksichtigung der Geschwindigkeit der Fall sein kann, wird in der letzten Phase des Anhaltens auf einen Annäherungsregler umgeschaltet. Beim Annäherungsregler (siehe [SIEDERSBERGER 96b]) wird ausschließlich der Abstand geregelt, wodurch ein exaktes Anhalten in einem vorgegebenen Abstand hinter einem Fahrzeug möglich ist. Die Abstandsdifferenz d_{Diff} wird dabei nicht über nichtlineare Totzonenglieder geführt.

Mit dem Abstands- und Annäherungsregler sind die regelungstechnischen Grundlagen geschaffen, ein 'Stop&Go'-Manöver auf der '4D-Ebene' auszuführen. Es gilt nun, diese regelungstechnische Repräsentation des Fahrmanövers mit der schematischen Darstellung in Form von Zustandsautomaten auf der 'regelbasierten Ebene' zu fusionieren.

7.2.2.2 Fähigkeitenbasierte Repräsentation

Wie der Tabelle 7.1 zu entnehmen ist, werden die für die Ausführung des 'Stop&Go'-Manövers notwendigen Regelungen 'Abstandsregler' und 'Annäherungsregler' auf der 'regelbasierten Ebene' in Form der Fortbewegungsfertigkeiten 'Abstandhalten' und 'Annähern' repräsentiert. Die schematische Abfolge der einzelnen Fertigkeiten der Längs- und Querführung wird im Zustandsautomaten für das 'Stop&Go'-Manöver organisiert (Abbildung 7.11).

In Rahmen der Querführung werden die Fertigkeit 'Spurhalten' und 'Fixieren' verwendet, wobei die Querführungsfertigkeit 'Fixieren' nur für Standphasen benötigt wird, damit in diesen Phasen keine Lenkaktivität erfolgt und somit die Lenkung nicht beansprucht wird. Der Zustandsautomat für die Querführung gestaltet sich deshalb denkbar einfach, da er nur die beiden Automatenzustand enthält.

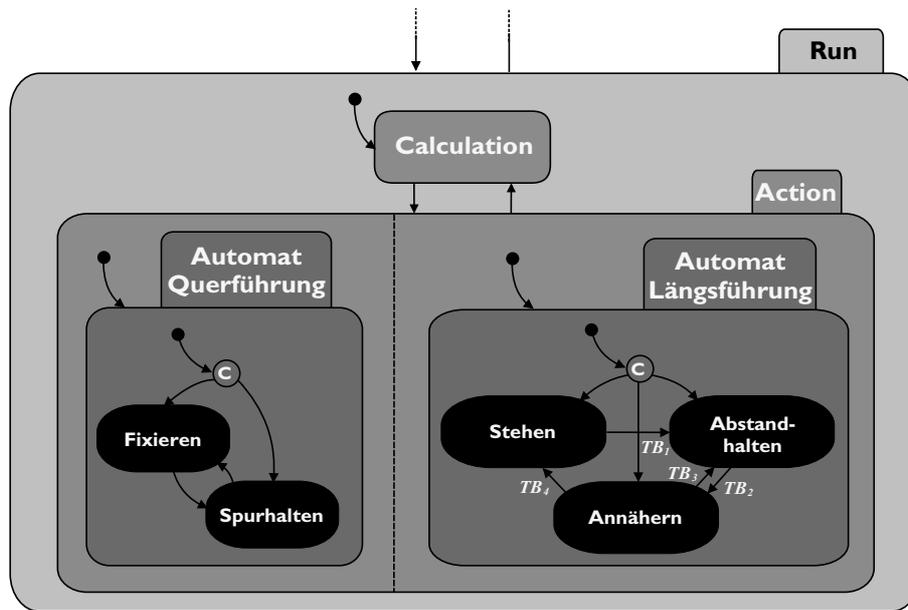


Abbildung 7.11: Zustandskarten des 'Stop&Go'-Manövers

Der Automat für die Längsführung umfasst die drei Zustände 'Abstandhalten', 'Annähern' und 'Stehen', welche durch die in Tabelle 7.1 beschriebenen steuerungs-/regelungstechnischen Lösungen realisiert werden. In Abbildung 7.11 sind im Längsführungsautomaten zusätzlich zu den Pfeilen, welche die Transitions symbolisieren, auch die zugehörigen Transitionsbedingungen $TB_1 \dots TB_4$ explizit angegeben, die exemplarisch für dieses Manöver diskutiert werden.

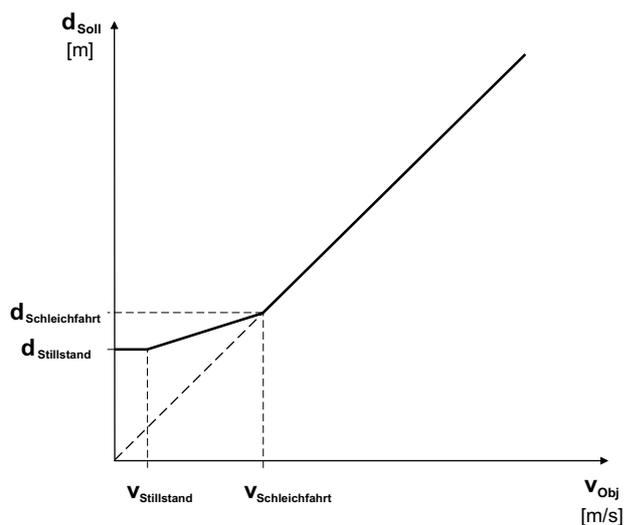


Abbildung 7.12: Kennlinie des Sollabstands beim 'Stop&Go'-Manöver

Eine wichtige Größe nicht nur für den Abstandsregler sondern auch für die Festlegung der Transitionsbedingungen ist der Sollabstand d_{Soll} , der geschwindigkeitsabhängig zum Vorfahrenden eingehalten werden soll. Dieser wird gemäß Abbildung 7.12 durch eine stückweise lineare Kennlinie festgelegt. Die Segmentgrenzen ergeben sich aus den beiden Geschwindigkeitsgrenzwerten $v_{Stillstand}$ und $v_{Schleichfahrt}$ sowie aus dem Stillstandsabstand $d_{Stillstand}$, die als frei wählbare Entwurfsparameter vorgegeben werden können. Für die einzelnen Segmente kann der Sollabstand wie folgt bestimmt werden:

$$d_{Soll} = \begin{cases} t_{Zeitlücke} \cdot v_{Obj} & : v_{Schleichfahrt} \leq v_{Obj} \\ d_{Stillstand} + m \cdot (v_{Obj} - v_{Stillstand}) & : v_{Stillstand} \leq v_{Obj} < v_{Schleichfahrt} \\ d_{Stillstand} & : v_{Obj} < v_{Stillstand} \end{cases} \quad (7.33)$$

mit:

$$m = \frac{d_{Schleichfahrt} - d_{Stillstand}}{v_{Schleichfahrt} - v_{Stillstand}} \quad (7.34)$$

und

$$d_{Schleichfahrt} = v_{Schleichfahrt} \cdot t_{Zeitlücke} \quad (7.35)$$

Die Vorgabe einer von Null verschiedenen Stillstandsgeschwindigkeit $v_{Stillstand}$ ist insofern notwendig, als dass bei niedrigen Geschwindigkeiten sowohl bei der Messung der Eigen- als auch der Relativgeschwindigkeit Fehler auftreten, wodurch weder eine genaue Detektion des Stillstands des Eigen- als auch des Zielfahrzeugs möglich ist.

Unter Zuhilfenahme der Größen aus den Gleichungen 7.33 und 7.34 lassen sich die Transitionsbedingungen für den in Abbildung 7.11 dargestellten Längsführungsautomaten des 'Stop&Go'-Manövers explizit formulieren:

$$\mathbf{TB}_1: \quad v_{Obj} > 3.0 \cdot v_{Stillstand} \vee d_{Ist} > d_{Schleichfahrt}$$

Aus dem 'Stehen' wird erst wieder angefahren, wenn ein gewisser Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug $d_{Schleichfahrt}$ überschritten wird oder wenn die Geschwindigkeit des Zielfahrzeugs v_{Obj} größer als eine bestimmte Schwelle wird. Dadurch wird verhindert, dass jede noch so kleine Anfahrbewegung des Zielfahrzeugs mitgemacht wird. Es kommt zu einem verzögerten Anfahren.

$$\mathbf{TB}_2: \quad v_{Obj} \leq v_{Schleichfahrt} \wedge d_{Ist} \leq d_{Schleichfahrt} \wedge v_{Ist} < 2.0 \cdot v_{Stillstand}$$

Geht der Vorausfahrende in eine Schleichfahrt über, so wird dies vom Abstandsregler für das eigene Fahrzeug ebenfalls realisiert. Allerdings nur bis zu einer Geschwindigkeit v_{Ist} von minimal $2.0 \cdot v_{Stillstand}$. Unterhalb dieser Geschwindigkeitsgrenze soll keine Schleichfahrt erfolgen, sondern es wird angehalten. Dazu wird ins 'Annähern' gewechselt. Dies entspricht der Tatsache, dass keine Schleichfahrten mit extrem niedriger Geschwindigkeit im Stau zu beobachten sind, sondern in derartigen Fahrsituationen eher kurz angehalten und nach einer gewissen Standzeit wieder angefahren wird.

Aber nicht nur aus einer Schleichfahrt heraus sondern auch bei einem Anhaltevorgang aus höheren Geschwindigkeiten wird ab der angegebenen Geschwindigkeitsgrenze ins 'Annähern' gewechselt, um ein exaktes Anhalten zu realisieren.

$$\mathbf{TB}_3: \quad d_{Ist} \geq 1.5 \cdot d_{Soll} \wedge v_{Obj} \geq 2.0 \cdot v_{Stillstand}$$

Eine Geschwindigkeitserhöhung des vorausfahrenden Fahrzeugs, während dessen das Eigenfahrzeug sich im Anhaltevorgang befindet, führt dazu, dass nicht bis zum Stillstand gebremst wird, sondern bei Vorliegen dieser Transitionsbedingung wieder in den Zustand 'Abstandhalten' zurückgewechselt wird.

$$\mathbf{TB}_4: \quad d_{Ist} \leq d_{Soll} \wedge v_{Ist} < v_{Stillstand}$$

Verringert das vorausfahrende Fahrzeug seine Geschwindigkeit weiterhin, so wird ab der Geschwindigkeit $v_{Stillstand}$ als konstanter Sollabstand der Abstand $d_{Stillstand}$ gefordert. Wird dieser unterschritten und ist auch die Eigenfahrzeuggeschwindigkeit v_{Ist} kleiner als die Stillstandsgeschwindigkeit, so wird in den Zustand 'Stehen' gewechselt.

Die in den Transitionsbedingungen verwendeten fixen Parameter wurden im Rahmen von Fahrversuchen ermittelt. Die Berechnung von variablen Größen wie dem geschwindigkeitsabhängigen Sollabstand erfolgt ebenso wie die Bestimmung sämtlicher Transitionsbedingungen in dem Funktionsblock auf der '4D-Ebene', der zum 'Calculation'-Zustand der 'regelbasierten Ebene' korrespondiert, was aus Abschnitt 7.1.2.1 bekannt ist.

Welche Ergebnisse sich mit einem derart ausgelegten 'Stop&Go'-Regler im Versuchsfahrzeug VAMP sowohl beim Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs als auch bei Anfahrt und Anhaltevorgängen erzielen lassen, ist in Abschnitt 9.2.2 detailliert dargestellt.

7.2.2.3 Ergänzende Bemerkungen

Im Zuge der Vorstellung des 'Stop&Go'-Manövers wurde speziell auf die Längsführung eingegangen, da bei diesem Fahrmanöver der Fortbewegung in Längsrichtung eine gewichtige Rolle zukommt. Die separate Betrachtung der Längsführung ist erlaubt, weil in diesem Geschwindigkeitsbereich keine starken Kopplungen zwischen Längs- und Querdynamik bestehen. Es treten nämlich in normalen Stausituationen keine großen Querbeschleunigungen auf, die zur Folge hätten, dass die Geschwindigkeit verringert werden müsste, was eine Einflussnahme der Quer- auf die Längsdynamik bedeuten würde. Die Querverführung kann daher wie die Längsführung losgelöst betrachtet werden.

Bei der Realisierung der Querverführung wird von der Annahme ausgegangen, dass das Eigenfahrzeug sich in der Mitte des eigenen Fahrstreifens bewegen soll. Daraus resultiert, dass nur die Querverführungsfertigkeit des 'Spurhaltens' zu nutzen ist, die in Form des Querreglers auf der '4D-Ebene' realisiert wird.

Es hat sich allerdings gezeigt, dass im realen Stau die Annahme des Fahrens in der Mitte des eigenen Fahrstreifens nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Grund hierfür ist, dass Stau aufgrund besonderer Ereignisse (Unfall, Baustelle, Fahrbahnverengung etc.) und hohem Verkehrsaufkommen entsteht. Hier kann es notwendig sein, öfters nicht in der

Spurmitte zu fahren, weil beispielsweise eine Rettungsgasse gebildet werden muss. Diese Ausnahmen sind jedoch so vielfältig, dass sie im Rahmen der vorliegenden Betrachtung nicht behandelt werden konnten.

Welche Bedeutung dem Fahrmanöver 'Stop&Go' mittlerweile im Zuge der zunehmenden Alltagsstaus zugemessen wird, verdeutlicht das große Engagement der Automobilindustrie. So ist dem Thema der 'Stauassistenten' im Rahmen der INVENT-Forschungsinitiative ein eigenes Teilprojekt gewidmet, in dem untersucht werden soll, inwieweit sich dieses Fahrmanöver sowohl in der Längs- als auch in der Querführung automatisieren lässt.

Kapitel 8

Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung

Für die Fortbewegung eines autonomen Kraftfahrzeugs sind in Tabelle 6.2 eine Reihe von typischen Fahrmanövern aufgelistet, die in Form von Fortbewegungs-Fähigkeiten explizit im autonomen System repräsentiert sind. Für die Generierung der Fahrhandlungen zeichnet das im Kapitel 7 näher beschriebene Modul zur autonomen Fahrzeugführung (VC) verantwortlich. Wann, zu welchem Anlaß oder in welcher Situation eine bestimmte Fortbewegungs-Fähigkeit eingesetzt werden soll, ist damit aber noch nicht geklärt.

Die Entscheidung, eine Fortbewegungs-Fähigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. bei gewissen internen wie externen Gegebenheiten zu aktivieren und die zugehörige Fahrhandlung von der Fahrzeugführung ausführen zu lassen, wird von der 'Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung' ('Behavior Decision for Locomotion', BDL) getroffen. Es handelt sich dabei in erster Linie um Routineentscheidungen, die aufgrund von Detailwissen über die auszuführende Fahrhandlung, aufgrund von Wissen über die aktuelle Situation und die verfolgten Ziele sowie unter Verwendung eines wohl definierten Regelwerks getroffen werden.

Um die Funktionsweise der auf die Fortbewegung spezialisierten Entscheidungsinstanz zu verstehen, kommt man nicht umhin, die Gesamtstruktur der Verhaltensentscheidung in einem autonomen System näher zu beleuchten. Welche Verfahren zur Strukturierung von verteilten Entscheidungskomponenten im vorgestellten System zur autonomen Fahrzeugführung angewandt werden und welche Aufgabe dabei der 'Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung' zufällt, wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

8.1 Verhaltensentscheidung in autonomen Systemen

Zur Strukturierung von Entscheidungssystemen in autonomen Robotern gibt es eine Vielzahl von Ansätzen (u.a. nachzulesen in [ARKIN 98], [MEYSTEEL 91] und

[MESAROVIC ET AL. 70]). Die hierarchischen Beschreibungsebenen innerhalb des bis dato vorgestellten Gesamtsystems (vgl. Abschnitt 3.3) und die spezialisierten Entscheidungskomponenten für separate Teilbereiche (z.B. BDL) legen es nahe, die Entscheidungsinstanzen in Form einer 'organisatorischen Hierarchie' nach [MESAROVIC ET AL. 70] zu organisieren, wie es auch von [MAURER 00] vorgeschlagen wird.

8.1.1 Organisatorische Hierarchie der Entscheidungsinstanzen

Gemäß [MESAROVIC ET AL. 70] werden in einem Mehrebenen-Entscheidungssystem Entscheidungen gefällt, indem im Sinne einer vertikalen Gliederung komplexe Entscheidungsprobleme durch einen Satz von Unterproblemen ersetzt werden. Die einzelnen Teilprobleme werden spezialisierten Entscheidungskomponenten, welche auf das gesamte autonome System verteilt sein können, zur Entscheidung vorgelegt. Die für die Teilprobleme erzielten Lösungen ergeben in Summe die Lösung des ursprünglichen Entscheidungsproblems.

[MAURER 00] fasst weitere Grundprinzipien von hierarchisch strukturierten Systemen zusammen:

- „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 formulieren.“

Wird für die Entscheidungsfindung innerhalb eines Mehrebenen-Entscheidungssystems nicht nur ein, sondern werden mehrere Ziele vorgegeben, die den einzelnen Hierarchieebenen angepasst sein können, so spricht man von einer 'organisatorischen Hierarchie' der Entscheidungskomponenten. Wegen der unterschiedlichen Ziele kann es allerdings zu Entscheidungen der separaten Entscheidungskomponenten einer Hierarchieebene kommen, die in Widerspruch zueinander stehen. Diese Konflikte aufzulösen, ist Aufgabe von hierarchisch höher angesiedelten Entscheidungsinstanzen. Die größere Entscheidungsfreiheit für die hierarchisch organisierten Entscheidungseinheiten durch Vorgabe unterschiedlicher Ziele hat daher einen erhöhten Koordinationsaufwand zwischen den verteilten Entscheidungskomponenten zur Folge.

In der Hierarchie höher angesiedelte Entscheidungsinstanzen koordinieren die darunter liegenden, indem sie diesen Ziele, Parameter und zu lösende Teilaufgaben vorgeben. Sie

lassen ihnen größt möglichen Handlungsspielraum, damit diese die an sie gestellten Aufgaben auch lösen können. Unterlagerte Entscheidungsinstanzen ihrerseits bringen die erzielten Ergebnisse ihres Entscheidungsfindungsprozesses zur Ausführung, kommunizieren die Lösungen der von ihnen zu lösenden Entscheidungsprobleme zu hierarchisch höher angesiedelten Entscheidungsinstanzen und melden auftretende Konflikte. Aufgabe der übergeordneten Entscheidungsinstanzen ist es nun, gemeldete Konflikte oder erst auf dieser Hierarchieebene ersichtliche Konflikte zwischen Ergebnissen von unterlagerten Entscheidungsinstanzen zu lösen, indem Parameter oder Ziele geändert, Lösungen priorisiert oder Alternativen vorgegeben werden.

All diese Aspekte für Mehrebenen-Entscheidungssysteme flossen in das mitentwickelte, hierarchisch organisierte Entscheidungssystem ein, wie es in Abbildung 8.1 schematisch dargestellt ist und im Rahmen des EMS-Systems implementiert wurde.

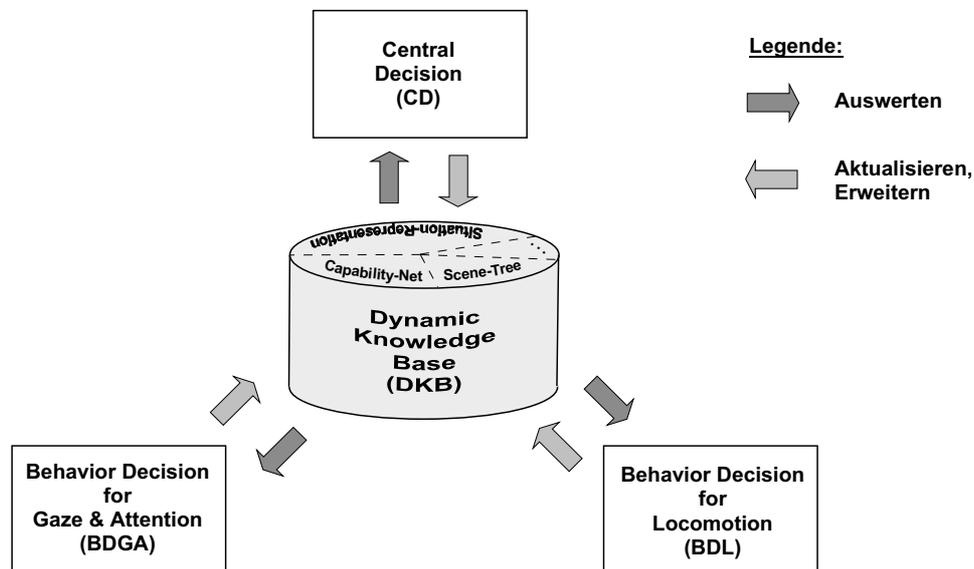


Abbildung 8.1: 'Organisatorische Hierarchie' der Entscheidungsinstanzen (in Anlehnung an [MAURER 00])

Das in Abbildung 8.1 dargestellte hierarchische Entscheidungssystem ist hinsichtlich der Belange eines sehenden, autonomen Kraftfahrzeugs ausgerichtet. Neben der auf die Fortbewegung spezialisierten Entscheidungsinstanz ('Behavior Decision for Locomotion', BDL) gibt es auf dem gleichen Hierarchieniveau eine Entscheidungskomponente ('Behavior Decision for Gaze and Attention', BDGA), welche speziell für die Lösung von Teilproblemen aus dem Bereich Wahrnehmung und Aufmerksamkeitsverteilung zuständig ist (siehe [PELLKOFER 03]). BDL und BDGA verfolgen jeweils lokal begrenzte, taktische Ziele. Die zentrale Entscheidungsinstanz ('Central Decision', CD) dagegen ist globaler ausgerichtet. CD gibt zum einen den hierarchisch untergeordneten Entscheidungsinstanzen BDL und BDGA Ziele und Aufgaben vor, zum anderen koordiniert sie die Ergebnisse

dieser Entscheidungsinstanzen, speziell im Falle eines Konflikts. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Entscheidungskomponenten erfolgt über die zentrale Wissensbasis ('Dynamic Knowledge Base', DKB).

Trotz der unterschiedlichen Hierarchiestufen denen CD, BDL und BDGA angehören, erfolgt die Entscheidungsfindung durch die einzelnen Entscheidungsinstanzen prinzipiell ähnlich.

8.1.2 Grundlagen für das Fällen von Entscheidungen

Für das Fällen von Entscheidungen in technischen Systemen gibt es eine Vielzahl von Ansätzen¹, auf die nicht im Detail eingegangen werden kann. Es können aber einige Grundprinzipien angegeben werden, welche neben der Theorie der hierarchischen Mehrebenensysteme nach [MESAROVIC ET AL. 70] für die Entwicklung des in Abbildung 8.1 vorgestellten Entscheidungssystems für autonome Kraftfahrzeuge maßgebend waren.

Grundlage einer jeden Entscheidung ist ein Ziel, welches erreicht werden soll. Ziele sollten, wie es u.a. von [MEYSTEEL 91] gefordert wird, explizit im System z.B. als Gütefunktionen repräsentiert sein, was häufig nicht der Fall ist, da diese meist nur implizit vorliegen. Je nach Systemausprägung kann es sich bei den Zielen, welche auf unterschiedlichen Hierarchieebenen verfolgt werden, um ein gemeinsames oder um mehrere eigenständige Teilziele handeln.

Darauf aufbauend ist die Situation hinsichtlich der zu verfolgenden Ziele zu überprüfen. Bei einer Situation handelt es sich im Sinne von [WERSHOFEN & GRAEFE 96] um 'die Gesamtheit der Umstände, die vom Roboter bei der Auswahl eines in dem jeweiligen Moment geeigneten Verhaltensmusters [= Fähigkeit, Anm. des Autors] zu berücksichtigen sind.' Zu den eine Situation beschreibenden Umständen gehört auf alle Fälle die Darstellung der physikalischen Gegebenheiten im und rund um den autonomen Agenten, welche im vorliegenden System in Form eines Szenenbaums als Teil der zentralen Wissensbasis erfolgt (vgl. Abschnitt 3.5).

Neben der physikalischen Sicht der Situation ist eine zentrale, abstrahierte Situationsbeschreibung in symbolischer Form vorzusehen, welche ebenfalls Teil der zentralen Wissensbasis ist. Eine Möglichkeit besteht darin, einzelne Situationsaspekte mit Hilfe von linguistischen Variablen zu umschreiben und damit die Situation zu repräsentieren, wie es [PELLKOFER 03] vorschlägt. Unabhängig von der Methode, mit welcher letztendlich eine abstrahierte Situationsbeschreibung erfolgt, ist es unabdingbar, dass es sich um eine gemeinsame symbolhafte Repräsentation der Situation handelt, die in Analogie zur physikalischen Szenenbeschreibung (Szenenbaum) systemweit im Rahmen einer gemeinsamen Wissensbasis zur Verfügung steht, damit keine unterschiedlichen Interpretationen ein und der selben physikalischen Szene erfolgen können.

¹Eine Einführung in die Theorie der Entscheidungsfindung bietet [GASS 85]. Weiterführende Themen werden in Tagungsbänden zu einschlägigen Konferenzen behandelt (z.B. [JEROSLOW 88]).

Ebenfalls Teil einer gemeinsamen Wissensbasis sollte die Repräsentation der prinzipiell und aktuell im System vorhandenen Fähigkeiten z.B. in Form des in Kapitel 6 vorgestellten Fähigkeitsnetzes sein. Das Wissen über die eigene Leistungsfähigkeit und die zur Verfügung stehenden Fähigkeiten ist elementarer Bestandteil, um sinnvolle Entscheidungen treffen zu können. Was nutzen Entscheidungen, bei denen nicht gewährleistet ist, dass die gefundenen Lösungen auch umsetzbar sind.

Das Fällen von Entscheidung an sich kann auf vielerlei Weisen erfolgen. Fallbasiertes Schließen [SCHAAF 98] sowie der Einsatz von unscharfen [ZADEH 65] bzw. scharfen (WENN-DANN) Regeln sind nur einige Methoden, um die an ein Entscheidungsmodul gestellten Aufgaben zu lösen. Als Ergebnis des Entscheidungsprozesses erhält man Lösungen beispielsweise in Form von zu nutzenden Fähigkeiten, mittels denen die aktuelle Situation im Hinblick auf die für das jeweilige Entscheidungsmodul gültigen Ziele gemeistert werden kann.

Die Nutzung der mit ausgewählten Fähigkeiten assoziierten Funktionalitäten kann in Bezug auf die für das jeweilige Entscheidungsmodul gültigen Ziele ideal erscheinen. Im Hinblick auf nicht bekannte Ziele anderer Entscheidungseinheiten bzw. Hierarchieebenen können die von einer Entscheidungsinstanz ausgewählten Fähigkeiten aber nicht zielführend sein. Es kommt zu Konflikten. Laut [BROCKHAUS 96, Band 12, S.262] handelt es sich bei einem Konflikt sinngemäß um das Aufeinandertreffen sich widersprechender Bedürfnisse, Interessen, Motivationen oder Aktionen. Treten Konflikte auf, so sind sie Teil der aktuellen Situation. Wird ein Konflikt von einem funktionalen Systemmodul erkannt, wird er in der abstrahierten Situationsbeschreibung der zentralen Wissensbasis z.B. als Situationsaspekt repräsentiert. Die Lösung von Konfliktfällen auf sämtlichen Hierarchieebenen ist elementarer Bestandteil für sinnvolle Reaktionen auf unvorhersehbare Situationen.

8.1.3 Aufgabenverteilung in einem hierarchisch organisierten Mehrebenen-Entscheidungssystem

Die in Abbildung 8.1 vorgestellten hierarchisch strukturierten Entscheidungseinheiten stellen eine feinere Auflösung des Blocks 'Verhaltensentscheidung' der funktionalen EMS-Systemarchitektur dar (vgl. Abbildung 3.2). Jeder der Entscheidungskomponenten CD, BDGA und BDL fallen spezifische Aufgaben zu. Die Aufgabenverteilung und Koordination zwischen den einzelnen Entscheidungsinstanzen wird speziell im Hinblick auf den Sachverhalt der Fortbewegung in diesem Abschnitt näher beschrieben und an Beispielen erläutert.

Oberste Aufgabe der zentralen Entscheidungsinstanz (CD) ist es, den an ein autonomes System gestellten Gesamtauftrag zu erfüllen. Zur Realisierung dieser Aufgabe stehen ihr eine Fülle von funktionalen Systemmodulen - angefangen von Wahrnehmungsmodulen (RDT, VDT, ...), über Planungsmodule (MP) und spezialisierte Entscheidungsmodule (BDGA, BDL) bis hin zu Modulen zur Generierung von Verhalten (VC, GC) - zur

Verfügung (vgl. Abbildung 3.2 und 3.3). Grundlage für Entscheidungen seitens CD sind eine physikalische Szenenrepräsentation, eine abstrahierte Situationsbeschreibung, die zur Verfügung stehenden Systemfähigkeiten und ein von 'Mission Planning' (MP) generierter Missionsplan (siehe [GREGOR 02]), die allesamt in der zentralen Wissensbasis (DKB) abgelegt sind.

Beim Missionsplan handelt es sich um ein Folge von Teilaufträgen (Missionselemente), deren Anordnung in Listenform den geplanten zeitlichen Ablauf der durchzuführenden Mission widerspiegelt. Dabei handelt es sich nicht zwangsläufig um eine ausschließliche Abfolge von Elementen einer Fahrroute, sondern einzelne Missionselemente können auch andere Aufträge als die puren Fortbewegungsaufgaben beinhalten.

Beispiel:

Handelt es sich beim betrachteten autonomen Agenten um ein mobiles Beobachtungssystem, so sind neben den Fortbewegungs- auch Beobachtungsaufgaben zu erledigen. Dies spiegelt sich im Missionplan wider, wo nicht nur Missionselemente, welche die Fortbewegung betreffen, sondern auch Teilaufträge für das Beobachtungssystem abgelegt sind.

Anhand des Missionsplans und der darin enthaltenen räumlichen und zeitlichen Abfolge der auszuführenden Teilaufträge, wählt die zentrale Entscheidungsinstanz CD orts- und zeitgerecht die als Fähigkeiten im System repräsentierten Funktionalitäten aus, die notwendig erscheinen, um die in den einzelnen Missionselementen formulierten Aufgaben zu erfüllen. Dabei ist darauf zu achten, dass es Abhängigkeiten zwischen einzelnen Fähigkeiten unterschiedlicher Fachdisziplinen geben kann (vgl. Kapitel 6). Es ist sicherzustellen, dass bei Nutzung einer Fähigkeit aus einem Bereich auch benötigte Fähigkeiten anderer Kategorien zur Anwendung gelangen. Diese Aufgabe fällt CD zu, da sie durch ihre exponierte Stellung den Überblick über das gesamte System besitzt und dadurch die einzelnen Teilbereiche koordinieren kann.

Beispiel:

Soll vom Experten für die Fortbewegung (VC) das Fahrmanöver 'Spurwechsel' ausgeführt werden, so ist von Seiten der zentralen Entscheidungsinstanz (CD) sicherzustellen, dass im Bereich 'Wahrnehmung' auch die Überwachung des rückwärtigen Verkehrsraums durchgeführt wird, damit die Entscheidungsinstanz und der Experte für die Fortbewegung davon ausgehen können, dass der rückwärtige Verkehrsraum auch frei ist, wenn kein sich von hinten annäherndes Fahrzeug in der physikalischen Szenenrepräsentation (Szenenbaum) vorhanden ist. Selbige Konstellation des Szenenbaums würde vorliegen, wenn die Fähigkeit zur Rückraumwahrnehmung gar nicht genutzt würde. Deshalb ist es unabdingbar, dass von CD die Ausführung einer Fähigkeit eines Fachbereichs nur angestoßen wird, wenn auch die notwendigen Fähigkeiten anderer Kategorien zur Verfügung stehen und eingesetzt werden.

Im Weiteren wird die Aufgabenteilung und Koordination hinsichtlich der Fortbewegung näher betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass sämtliche Fähigkeiten anderer Fachdisziplinen, welche zur Durchführung von Fahrhandlungen benötigt werden, zur Verfügung stehen und genutzt werden, sobald von CD die Ausführung einer Fahrhandlung beauftragt wird.

Ist gemäß Missionsplan ein Fortbewegungsauftrag zu erfüllen, so wählt CD passend zum jeweiligen Missionselement aus den in der Fähigkeitenrepräsentation (Fähigkeittennetz) als verfügbar gekennzeichneten Fortbewegungs-Fähigkeiten eine geeignete aus und instanziiert, parameterisiert und priorisiert über das Fähigkeittennetz die Anwendung der jeweiligen Fähigkeit. Die endgültige Entscheidung, wann genau ein von CD beauftragtes Fahrmanöver zur Ausführung gelangt, obliegt der auf die Fortbewegung spezialisierten Entscheidungsinstanz (BDL). Für die zu treffenden Entscheidungen nutzt BDL das Detailwissen der Fahrzeugführung (VC), welche für die Generierung des Fahrmanövers zuständig ist. Ist der Zeitpunkt gekommen, eine neue Fahrhandlung zu beginnen, so wird von BDL die Ausführung der bis dato von VC ausgeführten Fahrhandlung gestoppt und die Generierung des neuen Fahrmanövers angestoßen.

Beispiel:

Verlangt der Missionsplan ein Abbiegen auf eine Querstraße, so wird von CD das 'Abbiege'-Manöver angefordert, indem über das Fähigkeittennetz die Instanziierung der Fortbewegungs-Fähigkeit 'Abbiegen' erfolgt. Für VC als Experten für diese Art von Fähigkeiten bedeutet dies, dass die Nutzung der Fähigkeit 'Abbiegen' für die eigentliche Anwendung vorzubereiten ist. Dazu werden aufbauend auf den Geometriegrößen des Abzweigs und den aktuellen Fahrzeugzustandsgrößen, welche allesamt im Szenenbaum zur Verfügung stehen, für das 'Abbiege'-Manöver typische Trajekorienverläufe und charakteristische Größen wie z.B. der Abstand zum Abzweig berechnet, an dem mit dem 'Abbiege'-Manöver begonnen werden muss. Die für das jeweilige Fahrmanöver typischen Größen sind Grundlage für BDL, um die Ausführung des 'Abbiege'-Manövers durch VC orts- bzw. zeitgerecht anzustoßen.

Steht eine für die Realisierung des Missionsplans notwendige und zum Zeitpunkt der Missionsplanung noch verfügbare Fähigkeit aus irgendwelchen Gründen aktuell nicht mehr zur Verfügung, so tritt ein Konflikt hinsichtlich des im Missionsplan festgehaltenen Missionsziels auf. Diesen Konflikt aufzulösen ist Aufgabe der Missionsüberwachung ('Mission Monitoring', MM) und der zentralen Entscheidungsinstanz, indem z.B. eine Umplanung der Mission erfolgt (siehe dazu [GREGOR 02] und [PELLKOFER 03]).

Beispiel:

Kann z.B. vom Lenkaktuator nur noch eine begrenzte Lenkrate gestellt werden, die zwar für die Fahrhandlung 'Spurfahrt', wo keine großen Lenkraten zu stellen sind, aber nicht mehr für ein 'Abbiege'-Manöver ausreicht, so meldet

VC als Experte für die Fortbewegung die Nicht-Verfügbarkeit der Fähigkeit 'Abbiegen' über das Fähigkeitsnetz. Für CD bedeutet dies, dass die Mission nicht wie geplant durchgeführt werden kann und der daraus resultierende Konflikt gelöst werden muss. Während dieser Phase ist von CD zu gewährleisten, dass eine plausible Fahrhandlungsfähigkeit instanziiert ist. Wird die Nicht-Verfügbarkeit der Fähigkeit 'Abbiegen' weit vor dem Abzweig, an dem abgelenkt werden soll, signalisiert, so ist die noch verbleibende Restdauer der aktuellen Fahrhandlung 'Spurfahrt' eventuell für die Lösung des Konflikts ausreichend. Befindet man sich allerdings schon zu nah am betreffenden Abzweig, so sind von CD sinnvolle alternative Fahrhandlungsfähigkeiten zu instanziiieren wie beispielsweise das 'Anhalten am Straßenrand', während dessen die Konfliktlösung erfolgen kann.

Aber nicht nur systeminterne Fehlfunktionen und die damit verbundene Nicht-Verfügbarkeit von Systemfähigkeiten führen zu Konflikten mit den im Missionsplan festgehaltenen globalen Zielen. Viel häufiger ist es der Fall, dass externe Gegebenheiten die Ausführung einer geplanten Mission verhindern. CD muss in diesem Fall analog zum vorherigen Beispiel bei Bedarf eine alternative Fahrhandlungsfähigkeit instanziiieren, während deren Ausführung durch VC die Konfliktbehebung erfolgen kann.

Beispiel:

Wird bei der Vorbereitung oder Ausführung eines 'Abbiege'-Manövers festgestellt, dass sich im Abzweig ein Hindernis befindet, welches die Weiterfahrt auf der geplanten Route unmöglich macht, so ist in Analogie zur Nicht-Verfügbarkeit von Systemfähigkeiten von CD abhängig von der räumlichen bzw. zeitlichen Distanz zum Abzweig eine passende alternative Fahrhandlungsfähigkeit wie z.B. das 'Anhalten am Straßenrand' zu instanziiieren. Während der Ausführung dieser Fahrhandlung durch VC kann die Behebung des Konflikts durch CD erfolgen, indem beispielsweise eine Umplanung der Mission angestoßen wird.

Es ist nicht immer sinnvoll, die Behebung eines Konflikts erst dann anzugehen, wenn der Konfliktfall eingetreten ist. In vielen Fällen ist es effizienter, priorisierte Alternativen vorzuhalten, mit denen eventuell auftretende Konflikte, die typisch für bestimmte Domänen und Bedingungen sind, gelöst werden können. Welche Fähigkeiten als Alternativen in Frage kommen, hängt davon ab, in welcher Domäne man sich befindet, wie sich die aktuellen Rahmenbedingungen darstellen und welche Alternativen sich aus der Erfahrung heraus für die gegenwärtige Konstellation bereits als passend erwiesen.

Angewandt auf die zentrale Entscheidungsinstanz (CD) bedeutet dies, dass CD neben der Instanziiierung der für die Durchführung der Mission augenblicklich notwendigen Fortbewegungsfähigkeit noch weitere Fortbewegungsfähigkeiten als Alternativen für potenzielle Konfliktfälle vorhalten und priorisieren kann. Die endgültige Entscheidung, welche der alternativen Fähigkeiten beim Auftreten eines Konflikts anzuwenden ist, wird von der spezialisierten Entscheidungsinstanz (BDL) in Abhängigkeit von der Priorisierung der Alternativen gefällt.

Beispiel:

Für Fahrten im Gelände bedeutet dies, dass von CD neben der aktuellen Fahrhandlung 'Wegpunktfahrt' als Alternative für den Fall von Hindernissen im Fahrschlauch die Fahrhandlungsfähigkeit 'Stop' vorgehalten wird. Tritt tatsächlich der Fall ein, dass ein Hindernis im Fahrschlauch detektiert wird, so kann BDL unmittelbar die für diese Situation vorgehaltene Fahrhandlung anstoßen. Der Konflikt muss nicht erst an CD gemeldet und deren Lösungsvorschlag abgewartet werden, bevor eine Reaktion erfolgt.

Dieses Vorgehen sei an einem weiteren Beispiel nochmals erläutert.

Beispiel:

Bei einer Autobahnfahrt verhält es sich prinzipiell ähnlich. Gemäß Missionsplanelement besteht der Auftrag u.a. darin, einem Autobahnabschnitt mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu folgen. Dies wird von CD umgesetzt, indem die Fahrhandlungsfähigkeit 'Spurfahrt' instanziiert wird. Für den Fall, dass ein langsames Fahrzeug im eigenen Fahrstreifen detektiert wird, werden die Fahrhandlungsfähigkeiten 'Folgefahrt' und 'Spurwechsel' vorgehalten. Tritt dieser Konfliktfall tatsächlich ein, so kann BDL abhängig von der aktuellen Situation und der von CD vorgegebenen Priorisierung der Alternativen die geeignetste auswählen, ohne dass CD in Aktion treten muss.

Anhand dieser Beispiele wird ersichtlich, dass CD aufgrund der Domäne, der aktuellen Rahmenbedingungen und der eigenen Erfahrung eine Auswahl an Fortbewegungs-Fähigkeiten trifft, die für die Lösung von potenziellen Konfliktfällen unter passenden Bedingungen in Frage kommen könnten. BDL kann aus der Liste der alternativen Fahrhandlungsfähigkeiten die für die jeweilige Situation am besten geeignete auswählen, ohne dass CD in die Entscheidung involviert werden muss. Erst in Fällen, in denen auch die vorgehaltenen Alternativen zu keiner Lösung des Konflikts durch BDL führen, wird CD zur Konfliktlösung aufgefordert (siehe [PELLKOFER 03]).

Wichtigste Aufgabe von CD hinsichtlich der Fortbewegung eines autonomen Fahrzeugs ist es, dass sowohl im Nominal- als auch im Konfliktfall stets eine nutzbare Fortbewegungs-Fähigkeit beauftragt ist, welche von der Fahrzeugführung (VC) zusammen mit der zugehörigen spezialisierten Entscheidungsinstanz (BDL) realisiert werden kann. Bei der Auswahl der Fortbewegungs-Fähigkeiten verfolgt CD das in Form des Missionsplans formulierte globale Missionsziel. Von CD ist dabei darauf zu achten, dass die ausgewählten Fortbewegungs-Fähigkeiten konsistent im Hinblick auf andere benötigte Systemfähigkeiten sind. Dies wird durch die zentrale Stellung von CD als oberste Entscheidungsinstanz innerhalb des hierarchischen Entscheidungssystems gewährleistet.

BDL als spezialisierter Entscheidungsexperte für die Fortbewegung koordiniert die Ausführung der mit den Fortbewegungs-Fähigkeiten assoziierten Fahrhandlungen, die von CD beauftragt wurden und vom Fahrzeugführungs-Modul (VC) realisiert werden. Welche Aufgaben dies im Einzelnen umfasst, ist Inhalt des nächsten Kapitels.

8.2 Aufgaben von BDL

Primäre Aufgabe von BDL ist es, die von CD angeforderten Fortbewegungs-Fähigkeiten zum richtigen Zeitpunkt anzustoßen und von VC ausführen zu lassen. Stellt CD mehrere alternative, je nach Fall unterschiedlich priorisierte Fortbewegungs-Fähigkeiten zur Auswahl, so liegt es an BDL, in Abhängigkeit von der seitens CD vorgenommenen Priorisierung, von der momentanen Situation, von den aktuell verfügbaren Fortbewegungs-Fähigkeiten und von den für BDL geltenden Zielen, die passendste Fortbewegungs-Fähigkeit auszuwählen und deren Ausführung durch VC zu aktivieren.

Oberstes Ziel der 'Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung' (BDL) ist es, in allen Situationen sicheres Fahrverhalten zu gewährleisten.

Dies umfasst zum einen, dass stets eine Fortbewegungs-Fähigkeit aus einer Menge von möglichen Alternativen, welche von CD vorgegeben werden, genutzt wird, was bedeutet, dass für die jeweilige Fahrhandlung das typische Fahrverhalten von VC generiert wird. Gibt es in Ausnahmefällen seitens CD aus welchen Gründen auch immer keine Vorgabe einer Fortbewegungs-Fähigkeit, so stößt BDL eigenständig eine für die jeweilige Situation passende Notfallhandlung an und lässt sie von VC ausführen, um die Sicherheit des Fahrzeugs zu gewährleisten. Diese von BDL eingeleitete Notfallhandlung kann allerdings zu einer Abweichung im Missionsverlauf führen, da keine weiteren Ziele wie etwa das globale Missionsziel bei dieser Entscheidung berücksichtigt werden, sondern nur das primäre BDL-Ziel beachtet wird, stets sicheres Fahrverhalten zu gewährleisten.

Das Ziel, größtmögliche Sicherheit zu gewährleisten, ist zum anderen auch bei der Ausführung der einzelnen Fahrmanöver zu verfolgen. Treten hier Instabilitäten oder Abweichungen vom nominellen Sollverlauf in einem nicht mehr tolerierbaren Maße auf, die nicht bereits vom Experten für Fortbewegungs-Fähigkeiten (VC) abgefangen werden, oder zeichnen sich aufkommende Instabilitäten ab, so kann in vielen Fällen durch Vorgabe geänderter Parameter z.B. der Sollgeschwindigkeit ein sicherer Systemzustand erreicht werden. Führt dies nicht zum Ziel, so ist entweder eine andere Fortbewegungs-Fähigkeit aus der Menge der von CD vorgeschlagenen Alternativen anzustoßen oder eine Notfallbehandlung einzuleiten.

Im Grunde handelt es sich bei der Aufgabe, sicheres Fahrverhalten während der Ausführung des jeweiligen Fahrmanövers zu gewährleisten, um eine Überwachung der Fahrzeugführung, wie sie in Abschnitt 6.1.4 gefordert wurden.

8.2.1 Überwachung der Fahrzeugführung

Gemäß Abschnitt 6.1.4 gibt es in einem hierarchisch strukturierten System eine gestaffelte Überwachung von Systemfunktionalitäten. Für BDL leitet sich daraus die bekannte Aufgabe ab, die Generierung der Fahrhandlungen durch die Fahrzeugführung (VC) im Hinblick auf sicheres Fahrverhalten zu überwachen und Fehler, die nicht bereits durch VC

kompensiert wurden, zu korrigieren. Als wichtige Beurteilungskriterien dienen BDL die in Abschnitt 6.1.4.2 vorgestellten Fortschrittsmaße für die Ausführung von Fahrhandlungen. BDL wertet die Fortschrittsmaße für die jeweilige Fahrhandlung ständig aus und leitet unter anderem daraus notwendige Entscheidungen ab. Hier ist zu berücksichtigen, dass sich eine robuste Ausübung einer Fahrhandlung dadurch auszeichnet, dass trotz eventueller Anpassung von Reglerparametern zur Laufzeit Abweichungen in einem bestimmten Umfang vom Nominalwert toleriert werden.

Die Festlegung der Grenzen des Bandes (vgl. Abbildung 6.6) innerhalb dessen sich der Istwert bewegen darf, ist keine triviale Aufgabe, da sich diese in Abhängigkeit von der Situation und anderen Faktoren ändern können. Für die Festlegung der Grenzwerte ist es daher sinnvoll, Lernkomponenten zu installieren, die es ermöglichen, Erfahrungen aus ähnlichen vorangegangenen Situation mit in die aktuelle Entscheidung einfließen zu lassen.

8.2.2 Koordinierung der Fahrzeugführung

Lernkomponenten sind generell dazu geeignet, Erfahrungen in Entscheidungen einfließen zu lassen, indem Entscheidungsschwellen nicht statisch vorgegeben, sondern dynamisch aufgrund der aktuellen Situation und dem gespeicherten Wissen variiert werden. Dies trifft auch auf BDL zu, wenn es darum geht zu entscheiden, wann mit einer neuen Fahrhandlung begonnen werden soll. Die Bedingungen für einen Wechsel von einer Fahrhandlung zur nächsten sind in der Regel nicht statisch, sondern können aufgrund unterschiedlichster Einflüsse schwanken. In [PELLKOFER 03] ist exemplarisch für den Fall des 'Stop'-Manövers dargestellt, wie die Entscheidungsschwelle, wann mit dem Anhalten begonnen werden soll, durch eine Lernkomponente dynamisch festgelegt werden kann, wenn Schwankungen beim Anhalteweg aufgrund von nichtkompensierten Störungen auftreten.

Bis es allerdings seitens BDL zu einer auf den jeweiligen Bedingungen basierenden Entscheidung kommt, eine neue Fahrhandlung zu aktivieren, sind bereits einige Maßnahmen zur Koordinierung des Kontrollflusses innerhalb des hierarchischen Entscheidungssystems ergriffen worden. Mit Hilfe der Abbildung 8.2 soll dieses Zusammenspiel von CD, BDL und VC veranschaulicht werden, das letztlich die Grundlage dafür ist, eine bestimmte Fortbewegungs-Fähigkeit zur Ausführung zu bringen. Es handelt sich dabei um eine vereinfachte Darstellung der Abläufe zur Aktivierung von Systemfähigkeiten, wie sie in Abschnitt 6.1.3 und Abbildung 6.5 vorgestellt wurden.

Wird von CD aufgrund der Vorgaben aus dem Missionsplan oder als Reaktion auf einen aufgetretenen Konflikt eine bestimmte Fortbewegungs-Fähigkeit angefordert, so wird eine Instanz der jeweiligen Fähigkeit angelegt und die damit assoziierte Fahrhandlung (in Abbildung 8.2 Fahrhandlung 2) von VC zur Ausführung vorbereitet. Anschließend befindet sich die Fahrhandlung im Vorbereitungszustand *Prep* (vgl. Abbildung 6.2). Ist die Vorbereitung seitens VC abgeschlossen, so wird dies an BDL gemeldet (Meld. über *VORBEREITUNG* abgeschlossen). Ist der richtige Zeitpunkt gekommen, der sich u.a. aus den von VC im Vorbereitungszustand *Prep* durchgeführten Berechnungen ergibt, so aktiviert BDL die

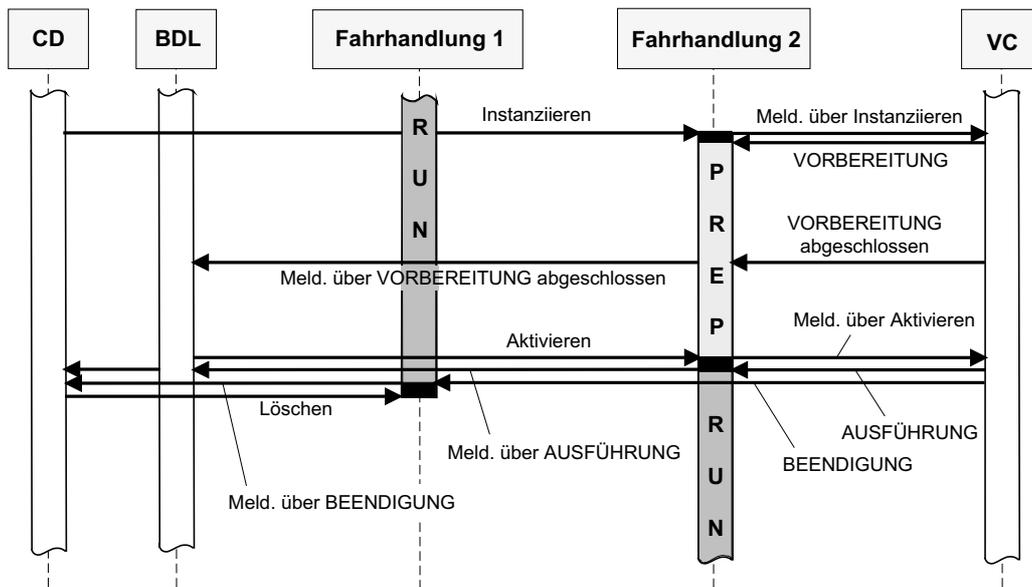


Abbildung 8.2: Sequenzdiagramm zur Verdeutlichung der Entscheidungsschritte bei Aktivierung einer Fortbewegungs-Fähigkeit

Ausführung der gewünschten Fahrhandlung. Für VC bedeutet dies, dass Fahrhandlung 1 beendet (Zustand Run wird verlassen) und statt dessen Fahrhandlung 2 ausgeführt wird (Zustand Run wird eingenommen). Sämtliche sich aus der Ausführung der Fahrhandlung 2 ergebenden Steuergrößen werden von VC exklusiv an die Aktuatoren weitergeleitet. Über die Beendigung von Fahrhandlung 1 und die Ausführung von Fahrhandlung 2 wird CD informiert, was dazu führt, dass die Instanz der nicht mehr benötigten Fähigkeit (in Abbildung 8.2 Fahrhandlung 1) gelöscht wird.

Kapitel 9

Experimentelle Ergebnisse

Die Validierung der entwickelten Komponenten zur autonomen Fahrzeugführung von sehenden Landfahrzeugen erfolgte mittels Testfahrten auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr München (UBM) in Neubiberg und auf Autobahnen rings um München.

Außerdem wurden Versuchskampagnen auf anderen Testgeländen wie dem Standortübungsplatz in Pfullendorf (siehe [LÜTZELER 02]) unternommen oder zusammen mit Projektpartnern durchgeführt. So wurde im Herbst 2000 im Rahmen des deutsch-amerikanischen AUTONAV-Programms ('Autonomous Navigation') eine Versuchsreihe auf dem UBM-Gelände durchgeführt, wo u.a. Anhalten vor natürlichen negativen Hindernissen (z.B. Bachläufen oder Gräben) demonstriert wurde. Der Fokus der Experimente lag dabei auf der Wahrnehmung von Hindernissen [SIEDERSBERGER ET AL. 01] und der Entwicklung eines Moduls zur Situationsanalyse [PELLKOFER 03].

Ihren Höhepunkt fanden die Entwicklungen des EMS-Vision Systems in der Abschlusspräsentation der dritten Phase des IFF-Projekts ('Intelligente Fahrfunktionen') im Oktober 2001. Es konnte die in Abbildung 9.1 skizzierte zusammenhängende Fahrmission mit dem Versuchsfahrzeug VAMORS im Beisein eines internationalen Fachpublikums vollständig autonom abgefahren werden. Angefangen bei der Missionplanung und -überwachung [GREGOR 02], über die Umfeldwahrnehmung [LÜTZELER 02] und [HOFMANN], bis hin zur Situationsanalyse und Blickrichtungssteuerung [PELLKOFER 03] konnten in vielen Teilbereichen autonomer mobiler Roboter aktuelle Entwicklungsergebnisse gezeigt werden, so auch sämtliche im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Komponenten zur autonomen Fahrzeugführung.

Zentrales Element des vorgestellten Systems zur autonomen Fahrzeugführung ist das Fähigkeitenkonzept, worüber die Koordinierung von Wahrnehmung, Fahrzeugführung und Blickrichtungssteuerung erfolgt. Die während der Ausführung der skizzierten Mission genutzten Fortbewegungs-Fähigkeiten sind in der Legende zu Abbildung 9.1 angegeben. Die Generierung der mit den ausgewählten Fortbewegungs-Fähigkeiten assoziierten Fahrhandlungen war ebenso von Bedeutung wie die Bestimmung der lokalen und globalen Position. Außerdem konnten mit Hilfe der inertialen/visuellen Eigenzustandsschätzung interne Fahrzeugzustände bestimmt werden.

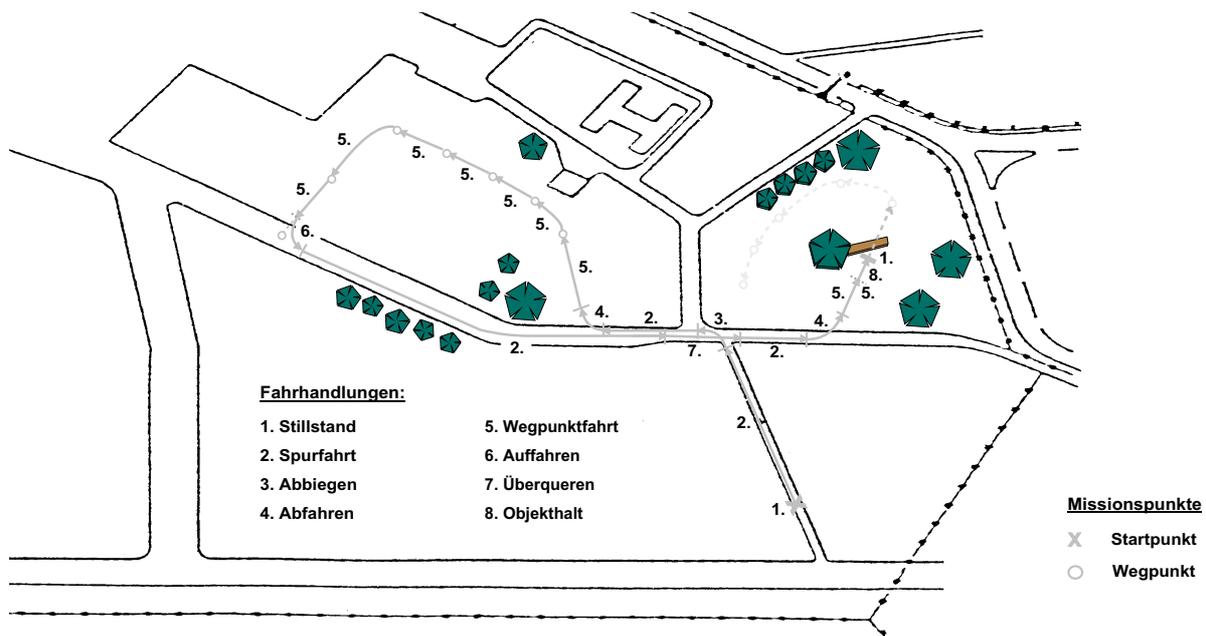


Abbildung 9.1: Zusammenhängende Fahrmission I

In den folgenden Abschnitten werden spezifische Ergebnisse zu den einzelnen Themenbereichen dieser Arbeit vorgestellt. Abschnitt 9.1 beschäftigt sich mit der Koordination von Fortbewegungs-Fähigkeiten und dem Zusammenspiel der einzelnen Entscheidungsinstanzen (CD und BDL). In Abschnitt 9.2 werden Ergebnisse zur Generierung ausgewählter Fahrmanöver präsentiert. Aus der Vielzahl und Vielfalt von Ergebnissen zur inertialen/visuellen Eigenzustandsschätzung werden einige repräsentative Beispiele herausgegriffen und in Abschnitt 9.3 ausführlich erläutert.

9.1 Koordinierte Abfolge von Fahrhandlungen

Die Fahrmission gemäß Abbildung 9.1 war mit dem Erreichen des Grabens und dem dortigen Anhalten erfolgreich beendet. Das Anfahren von Wegpunkten, die hinter dem Graben lagen (wie in Abb. 9.1 angedeutet), war in diesem Szenario nicht vorgesehen. Für weitere Entwicklungen, speziell was die komplexe Problematik des Umfahrens eines Grabens angeht, wurde deshalb die in Abb. 9.2 skizzierte Fahrmission II definiert. Diese gekürzte Variante der Fahrmission I besteht annähernd aus den gleichen Missionselementen wie die Mission gemäß Abb. 9.1. Welche Fortbewegungs-Fähigkeiten hierbei genutzt werden, kann der Legende zu Abbildung 9.2 entnommen werden.

Für die Fahrmission II wird nun dargestellt, wie die einzelnen Fahrhandlungen von VC ('Vehicle Control') nacheinander abgearbeitet werden und wie die Koordination zwischen

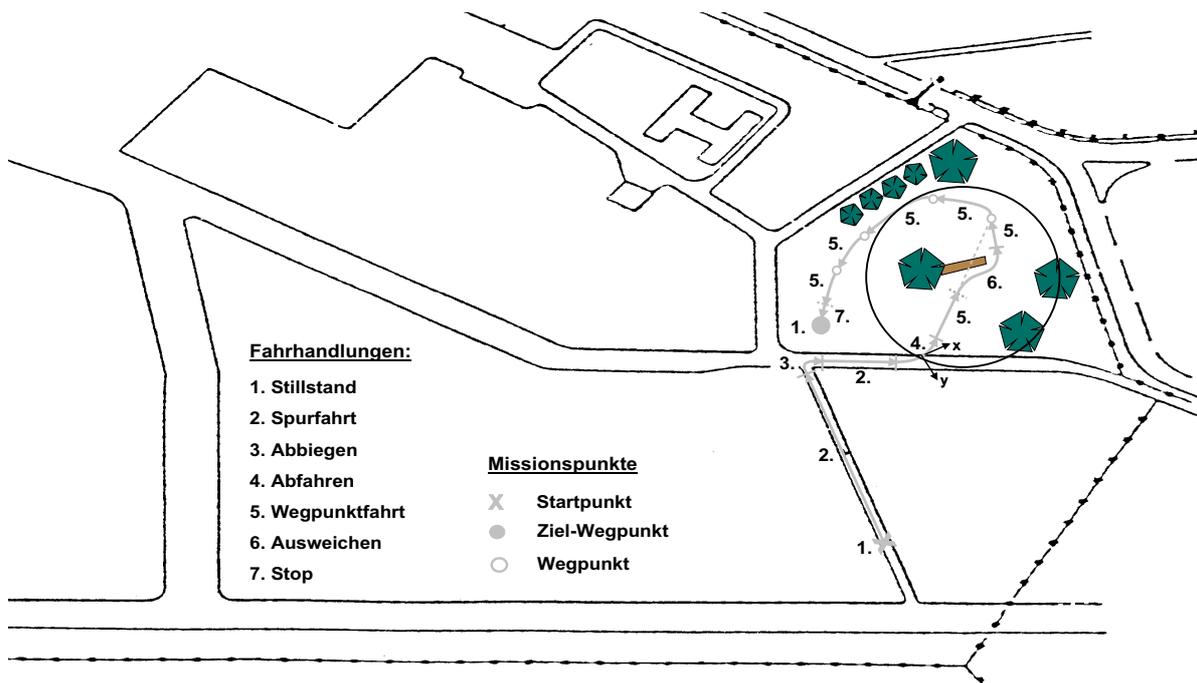


Abbildung 9.2: Fahrmission II

CD ('Central Decision') und BDL ('Behavior Decision for Locomotion') vonstatten geht (siehe zur Aktivierung von Fortbewegungs-Fähigkeiten auch Abschnitt 8.2.2).

Abbildung 9.3 zeigt, wie die für die Durchführung der Fahrmission II benötigten Fahrhandlungen aufeinanderfolgen. Dazu sind sämtliche Fahrhandlungen, wie sie auch in der Legende zu Abb. 9.2 aufgelistet sind, mit je einer eigenen Teilgrafik vertreten. Die Teilgrafiken umfassen jeweils die Zustände des Zustandsautomaten für den operativen Teil des Fähigkeiten-Zustandsautomatenmodells (vgl. Abb. 6.2). Im Zustand *Operation.Passive* ist zwar eine Instanz der jeweiligen Fähigkeit angelegt, sie wird aber vom zuständigen Experten nicht unterstützt. Im Zustand *Prep* bereitet der Experte, in diesem Fall ist dies VC, den Einsatz einer Fortbewegungs-Fähigkeit vor. Im *Operation*-Zustand *Run* kommt die jeweilige Fähigkeit zur Anwendung, indem von VC das zugehörige Fahrmanöver generiert wird.

Wenn die Anwendung einer Fortbewegungs-Fähigkeit von CD etwa aufgrund der Vorgaben aus dem Missionsplan angefordert wird (vgl. [PELLKOFER 03]), was durch die einseitig offenen Pfeile in Abb. 9.3 angedeutet ist, so beginnt VC mit der Vorbereitung der angeforderten Fortbewegungs-Fähigkeit. Diese befindet sich dann im Zustand *Operation.Prepare*. Exemplarisch ist dies für die Fortbewegungs-Fähigkeit 'Abbiegen' in Abb. 9.3 hervorgehoben. Ist der richtige Zeitpunkt gekommen und bestehen keine Bedenken gegen den Einsatz der jeweiligen Fähigkeit, so veranlasst BDL, dass die vorbereitete Fortbewegungs-Fähigkeit von VC umgesetzt wird. VC generiert nun die neue Fahrhandlung, was bedeutet,

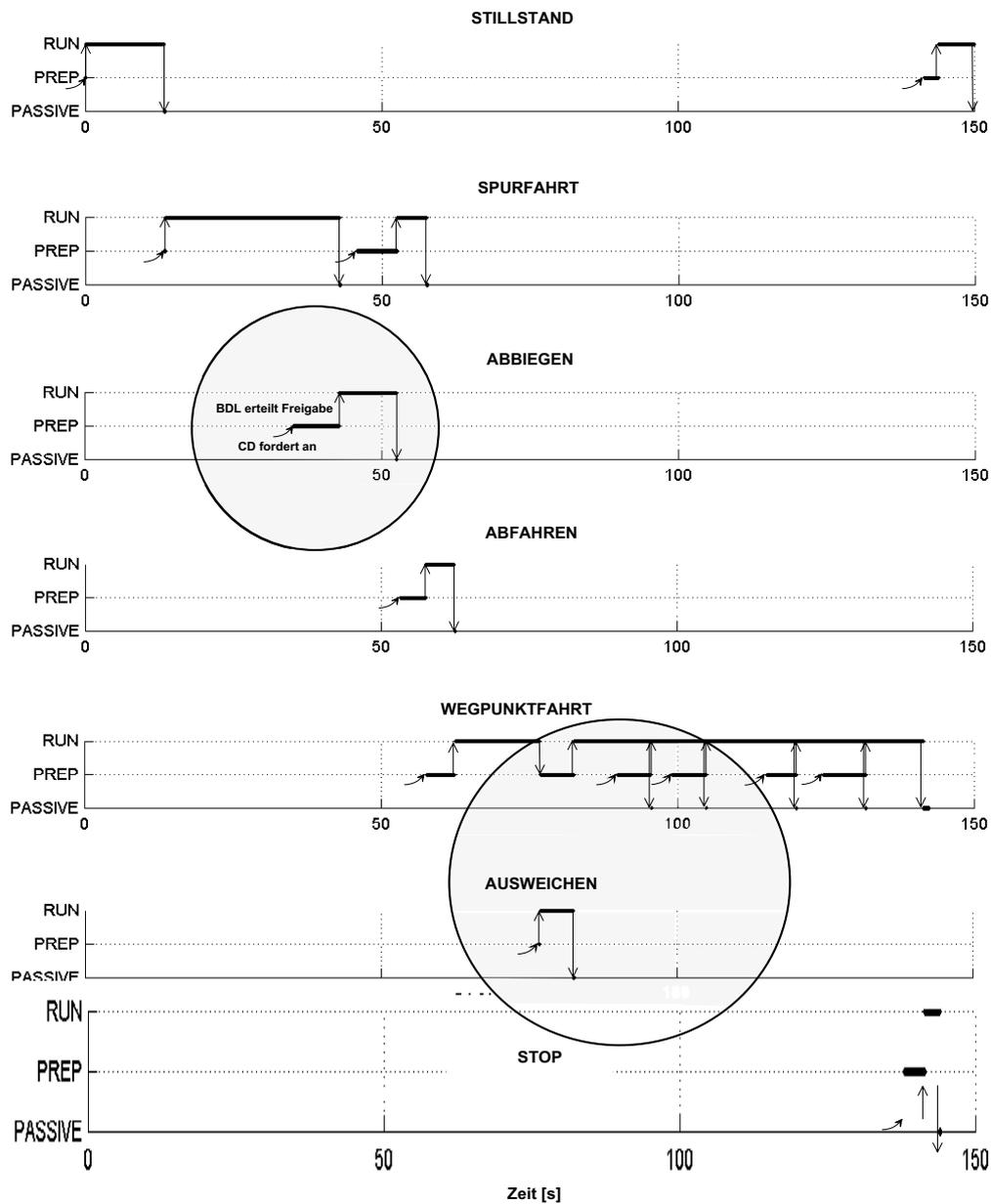


Abbildung 9.3: Koordinierte Abfolge von Fahrhandlungen

dass der Zustand von Prep auf Run wechselt. Gleichzeitig wird die Ausführung der vorangegangenen Fortbewegungs-Fähigkeit gestoppt. Wird diese nicht mehr benötigt, wie es bei der 'Spurfahrt' der Fall ist, nachdem mit dem 'Abbiege'-Manöver begonnen wurde, so wird diese in den Zustand Passive versetzt.

Etwas anders verhält es sich, wenn die vorangegangene Fähigkeit noch nicht zur vollen Zufriedenheit genutzt wurde, wie dies im zweiten eingekreisten Bereich beim ersten Einsatz

der Fortbewegungs-Fähigkeit 'Wegpunktfahrt' der Fall ist. Die Ausführung der Fahrhandlung wird vor Erreichen des Wegpunkts durch das 'Ausweich'-Manöver unterbrochen. Die 'Wegpunktfahrt' wird in diesem Fall nicht ins **Passive** gesetzt, sondern solange im Zustand **Prep** gehalten, bis das 'Ausweichen' abgeschlossen ist und dann wieder fortgesetzt. Dieser Ablauf ist typisch, wenn strategische Fahrhandlungen durch taktische unterbrochen werden. Im weiteren Verlauf wird die Fähigkeit 'Wegpunktfahrt' noch mehrmalig genutzt, jedoch mit unterschiedlichen Wegpunkten.

Grundlage für die Entscheidung seitens CD, unmittelbar aus der 'Wegpunktfahrt' das 'Ausweichen' zu initiieren (siehe [PELLKOFER 03]), wie es beim in Abbildung 9.3 dargestellten Beispiel der Fall ist, ist zum einen die Tatsache, dass im Szenenbaum (vgl. Abschnitt 3.5) ein Hindernis eingegangen und zum anderen, dass dieses Hindernis vom zuständigen Wahrnehmungsexperten als 'VERMESSEN' gekennzeichnet wurde. Wird von Seiten der Wahrnehmung jedoch ein Hindernis gemeldet, dieses aber zunächst als 'WIRD VERMESSEN' gekennzeichnet, da der Wahrnehmungsexperte das Hindernis als solches zwar erkannt hat, es aber noch nicht vollständig vermessen konnte, so ist eine andere Entscheidung von CD zu erwarten. Als oberste koordinierende Entscheidungsinstanz ist von CD in Abhängigkeit der Bedürfnisse der einzelnen Experten abzuwägen, wie auf das vorhandene aber noch nicht vermessene Hindernis reagiert werden soll. So ist auf Seiten der Fahrzeugführung zunächst ein 'Stop' mit anschließendem 'Stillstand' denkbar, wie es in [HOFMANN & SIEDERSBERGER 03] beschrieben ist. Während der 'Stillstands'-Phase besteht nun genügend Zeit, das Hindernis sorgfältig zu vermessen. CD kann anschließend das weitere Vorgehen festlegen und das 'Ausweichen' initiieren.

Die Vorgabe von CD wird von BDL und VC entsprechend der hier geltenden Ziele umgesetzt. Würde von CD, aus was für Gründen auch immer keine Reaktion auf ein wahrgenommenes Hindernis erfolgen, anders wie es in diesem Beispiel gemäß Abbildung 9.2 und 9.3 der Fall ist, so würde BDL zum letzt möglichen Zeitpunkt einen 'Nothalt' initiieren, getreu dem Ziel, stets einen sicheren Fahrzustand zu gewährleisten, ohne dabei auf globale Zusammenhänge Rücksicht zu nehmen.

9.2 Ausgewählte Fahrmanöver

Aus den in Tabelle 6.2 aufgelisteten Fahrhandlungen sind in Kapitel 7.2 das 'Ausweichen' und das 'Stop&Go'-Manöver ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden Ergebnisse zu diesen beiden Fahrmanövern präsentiert. Das 'Ausweichen' wurde im Rahmen der im letzten Abschnitt vorgestellten Fahrmission realisiert, welche mit VAMORS durchgeführt wurde. 'Stop&Go'-Versuchsfahrten wurden mit dem Versuchsfahrzeug VAMP durchgeführt.

9.2.1 Ausweich-Manöver

Das hier vorgestellte 'Ausweich'-Manöver wurde im Zuge der Durchführung einer Fahrmission gemäß Abb. 9.2 ausgeführt. Es handelt sich dabei um eine Variante, wie sie in

[HOFMANN & SIEDERSBERGER 03] beschrieben ist, bei der das 'Ausweich'-Manöver im Anschluss an eine Stillstandsphase auszuführen war. Die Stillstandsphase war in diesem Fall notwendig, um der Umfeldwahrnehmung die nötige Zeit zu geben, ein als Graben identifiziertes Hindernis genau zu vermessen, was Voraussetzung für ein sicheres 'Ausweichen' ist. Details zur Wahrnehmung des Grabens können in [HOFMANN] nachgelesen werden.

Nach der Vermessung des Grabens, währenddessen das Fahrzeug stand, wurde von CD entsprechend den Ausführungen von Abschnitt 9.1 ein 'Ausweichen' rechts um den Graben vorgeschlagen (siehe [PELLKOFER 03]). Das 'Ausweich'-Manöver wurde von VC vorbereitet und, nachdem von BDL nach Prüfung sämtlicher Bedingung die Freigabe zur Durchführung erteilt wurde, auch ausgeführt. Grundlage für die Generierung der Ausweichtrajektorie sind die vom zuständigen Wahrnehmungsexperten gelieferten geometrischen Größen des Hindernisses und dessen Lage bezüglich des Eigenfahrzeugs.

Für den vorliegenden Fall ergab sich für die Position des privilegierten Punktes Z (vgl. Abschnitt 7.2.1.2) eine Anfangsentfernung entlang der Fahrzeuglängsachse von $12,48m$ vor dem Fahrzeug und ein Querversatz nach rechts von $5,16m$. Es handelt sich dabei um den Punkt der Bahnkurve des Hinterachsmittelpunktes, der dem Graben am nächsten liegt. Seine Position berechnet sich sowohl aus der Lage und Geometrie des Grabens als auch aus einem Sicherheitskorridor der Breite d_{sec} um den Graben. Aufgrund dieser geometrischen Verhältnisse und der kinematischen Grenzen des Fahrzeugs ergaben die Vorabberechnungen von VC, dass Variante B gemäß Abbildung 7.7 für diese Konstellation am zweckmäßigsten ist. Bei dieser Variante des 'Ausweich'-Manövers entspricht der Punkt Z annähernd dem Wendepunkt B der Ausweichtrajektorie.

Durch Anwenden der Formeln aus Abschnitt 7.2.1 konnten die für die Durchführung des 'Ausweichens' notwendigen Größen für die Fahrzeugregelung berechnet werden. Für die konstante wegabhängige Lenkrate δ'_l ergibt sich gemäß Gl. 7.20 der in Abb. 9.4 dargestellte Verlauf, wobei die erste Wegphasen l_{AE} mit $6,7m$ um ca. $0,8m$ länger ist als die übrigen Phasen l_{EB} , $l_{BE'}$ und $l_{E'A'}$, die ca. $5,9m$ lang sind. Die letzte Phase wird allerdings nicht mehr vollständig ausgeführt, da, wie in Abb. 9.6 zu sehen ist, vor dem eigentlichen Ende bereits das unterbrochene Fahrmanöver 'Wegpunktfahrt' wieder aufgenommen wird. Die längere erste Phase liegt darin begründet, dass wie in Abb. 9.5 zu sehen ist, ein anfänglicher Lenkwinkel $\delta_0 < 0$ vorlag, der zusätzlich abgebaut werden musste.

Da die zeitabhängige Lenkrate $\dot{\delta}_t$ gemäß Gl. 7.8 sowohl von δ'_l als auch von der Fahrgeschwindigkeit abhängt, ergibt sich der charakteristische geschwindigkeitsabhängige Verlauf, wie er in Abb. 9.4 zu sehen ist. Dies wirkt sich in diesem Beispiel besonders in der Anfangsphase aus, wo aus dem Stillstand losgefahren und die Lenkrate $\dot{\delta}_t$, die dem Lenkaktor zugeführt wird, mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls stetig größer wird. Der aus der kommandierten Lenkrate $\dot{\delta}_t$ resultierende Lenkwinkel δ ist in Abb. 9.5 dargestellt.

Die Lenkrate $\dot{\delta}_t$ steigt in der ersten Phase mit zunehmender Geschwindigkeit stetig an, bis ein nahezu konstanter Wert von ca. $0,06rad/s$ erreicht ist. Der Rückgang der zeitabhängigen Lenkrate in der darauffolgenden Phase hat seine Ursache in einem Geschwindigkeitseinbruch. In den beiden letzten Phasen ist die Lenkrate $\dot{\delta}_t$ wieder nahezu konstant.

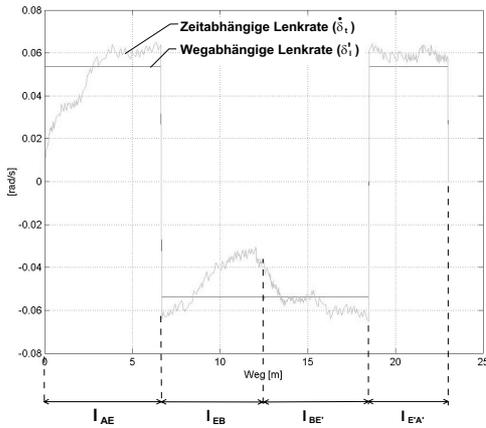


Abbildung 9.4: Lenkraten bei einem Ausweich-Manöver

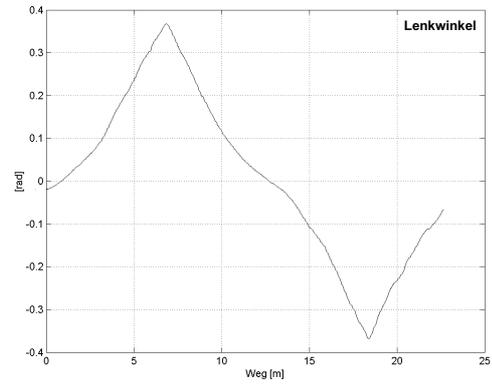


Abbildung 9.5: Resultierender Lenkwinkel bei einem Ausweich-Manöver

Für das vorgestellte 'Ausweich'-Manöver ergibt sich die in Abbildung 9.6 abgebildete Trajektorie bezüglich eines lokalen, geodätischen Koordinatensystems, welches in diesem Beispiel beim Verlassen der Straße angelegt wird.

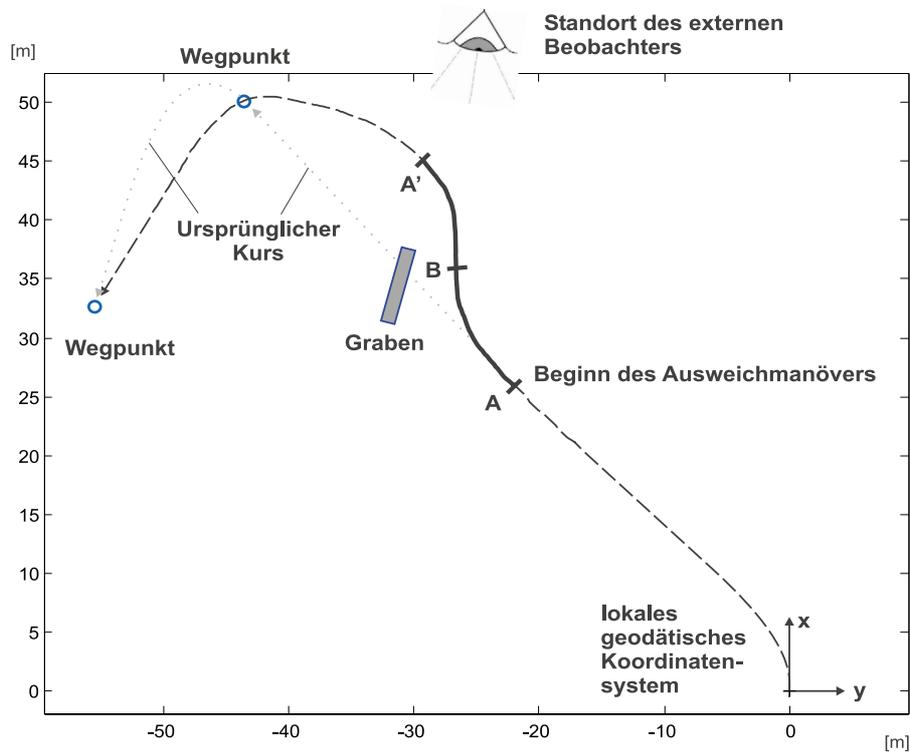


Abbildung 9.6: Trajektorie eines Ausweich-Manövers

Das 'Ausweich'-Manöver aus der Sicht eines externen Beobachters ist in Abbildung 9.7 dargestellt.



Abbildung 9.7: Durchführung eines Ausweich-Manövers

9.2.2 Stop&Go

Als eine weitere neu implementierte Fahrhandlung soll das 'Stop&Go'-Manöver vorgestellt werden. Hierbei handelt es sich um das typische Fahrmanöver, welches im Stau eingesetzt wird, um hinter einem langsam vorausfahrenden Fahrzeug, welches hin und wieder auch anhalten und wiederanfahren kann, herzufahren.

Es wurden hierzu Versuchsfahrten auf der Taxiway des ehemaligen Flugfeldes durchgeführt, das zum Gelände der UBM gehört. Dabei stand die Entwicklung des Fahrmanövers und hier im Speziellen die Längsführung im Vordergrund. Für die Auslegung der Längsregelung ist es zunächst ausreichend, ein Zielfahrzeug zu simulieren. Für das simulierte Längsführungsreferenzobjekt wurden typische Geschwindigkeitsverläufe vorgegeben, wie sie charakteristisch für Stauszenarien sind. Einzelne Sequenzen daraus werden im Folgenden näher erläutert. Die Querführung wurde nicht näher untersucht, da während der Ausführung des 'Stop&Go'-Manövers davon ausgegangen wird, dass sich das Fahrzeug innerhalb der eigenen Fahrspur bewegt, was mit der implementierten Querregelung realisiert werden kann (siehe [MAURER 00] und [THEILIG 00]).

9.2.2.1 Anhalten und Anfahren

Das in Abbildung 9.8 dargestellte Szenario mit kurz hintereinander ausgeführtem Anfahren und wieder Anhalten ist typisch für Stausituationen mit stockendem Verkehr. Als Anhalteabstand wurden $3m$ gewählt, was zum einen noch Sicherheitsreserven bietet, zum anderen aber ein Einscheren von Fahrzeugen aus Nachbarspuren minimiert.

Fährt der Vordermann an, so erfolgt das Anfahren im 'Stop&Go'-Betrieb erst, wenn entweder der Abstand größer als eine vorgegebene Abstandsschwelle $d_{Schleichfahrt}$, die in diesem Beispiel bei $4m$ liegt, ist oder wenn die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs v_{Obj} die Schwelle $3.0 \cdot v_{Stillstand}$ überschreitet ($v_{Stillstand} = 1.2km/h$). In diesem Beispiel trifft die zweite Bedingung zu. Durch die parametrisierbaren Schwellen wird verhindert,

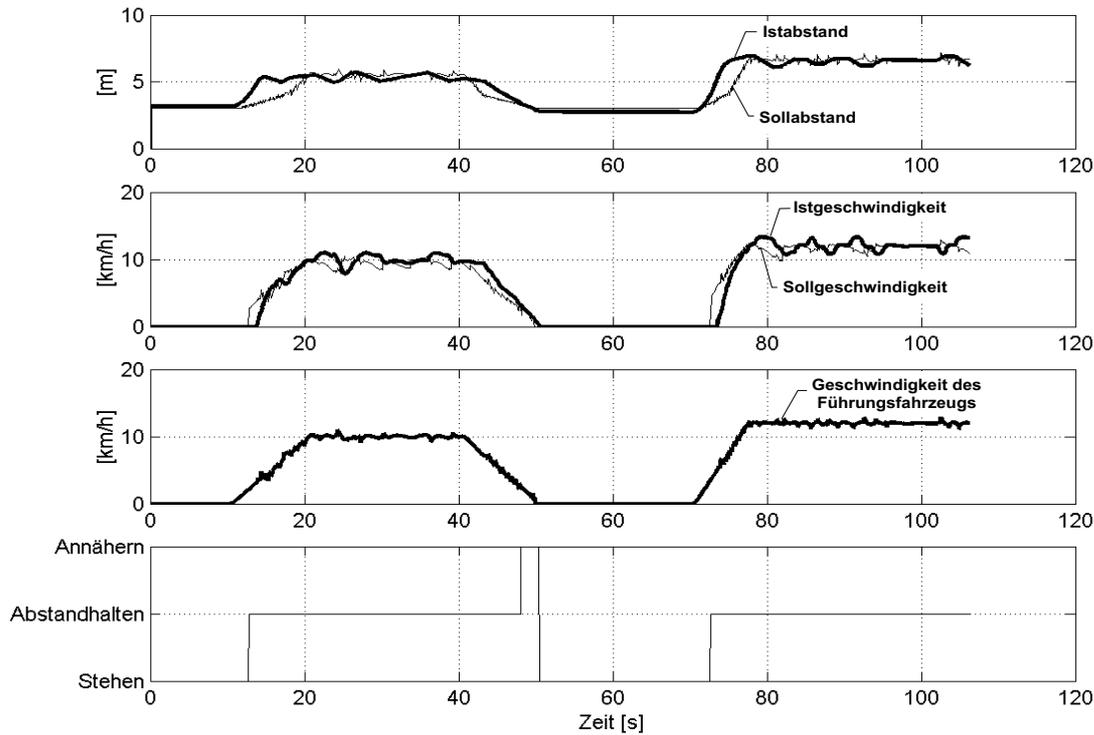


Abbildung 9.8: Anhalten und Anfahren

dass das längsgeführte Fahrzeug jede Bewegung des Vorderfahrzeugs unmittelbar mitmacht (Abschleppstangen-Effekt).

$v_{Stillstand}$ wird, wie in Abschnitt 7.2.2.2 erläutert, ungleich Null gewählt, da die verwendete Sensorik - im Versuchsfahrzeug VAMP ist die Geschwindigkeit auf dem CAN-Bus mit einer Quantisierung von 1.2 km/h verfügbar - Geschwindigkeiten unter der angegebenen Schwelle nicht mehr auflösen kann.

Das Anfahren wie auch das nachfolgende Konstanthalten des Abstands erfolgt mittels der Längsführungsfertigkeit 'Abstandhalten'. Zur Umsetzung dieser Fertigkeit ist der in Abschnitt 7.2.2.1 beschriebene Abstandsregler aktiv. Mit ihm ist es auch möglich, die Geschwindigkeit bis zu einer Grenze von $v_{Ist} < 2.0 \cdot v_{Stillstand}$ unter Einhaltung des notwendigen Sicherheitsabstands zu verringern, wenn der Vorausfahrende die Geschwindigkeit reduziert.

Unterschreitet v_{Ist} die angegebene Grenze, was im aktuellen Beispiel ungefähr zum Zeitpunkt $t = 47\text{ s}$ der Fall ist, so wird auf einen speziellen Annäherungsregler umgeschaltet, der für den Anhaltevorgang bis in den Stillstand optimiert ist.

Beim Anhalten hat sich speziell in Fällen, in denen der Vordermann stark bremst, gezeigt, dass der Anhalteabstand unterschritten wird, wenn die Beschleunigung des Zielfahrzeugs

im Regleralgorithmus nicht berücksichtigt wird. Dies setzt aber voraus, dass die Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs erfasst wird.

9.2.2.2 Folgefahrt mit minimalem Abstand

In einem zweiten Beispiel soll das Folgeverhalten der Abstandsregelung veranschaulicht werden, wenn das vorausfahrende Fahrzeug wie in Abbildung 9.9 die Geschwindigkeit v_{Obj} erhöht. Dieses Szenario ist für zähfließenden Verkehr typisch, der sich aufgrund von hohem Verkehrsaufkommen bildet.

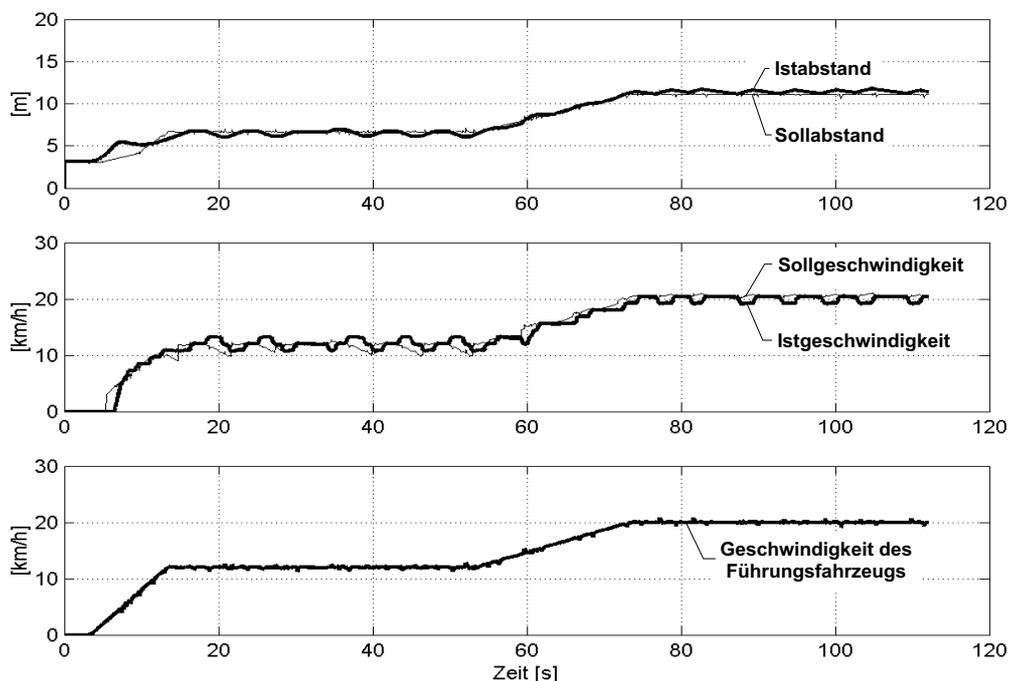


Abbildung 9.9: Folgefahrt mit minimalem Abstand

Man erkennt in Abbildung 9.9 das gute Folgeverhalten der Abstandsregelung. Es ist jedoch darauf zu achten, dass das abstandsgeregelte Fahrzeug nicht jede Geschwindigkeitsänderung des Vorderfahrzeugs unmittelbar umsetzt und sich so der sogenannte 'Abschleppstangen'-Effekt ausprägen kann. Dies wird bei dem hier vorgestellten Abstandsregler durch die Einführung der in Abschnitt 7.2.2.1 vorgestellten Totzonenglieder für Relativgeschwindigkeit und -abstand verhindert.

Für die Güte einer 'Stop&Go'-Fahrt ist neben dem Regelverhalten bezüglich dem Zielobjekt auch wichtig, wie komfortabel die Umschaltung zwischen den beiden Aktuatoren für die Längsführung (Gas und Bremse) erfolgt. Speziell bei Fahrten mit sehr niedrigen

Geschwindigkeiten (Schleichfahrt), bei denen stets leicht gebremst werden muss, damit die vorgegebene Geschwindigkeit v_{sol} nicht überschritten wird, ist dies von Bedeutung.

9.3 Inertiale/visuelle Eigenzustandsschätzung

Im Rahmen der Entwicklung der inertialen/visuellen Eigenzustandsschätzung, welche u.a. Daten für die in den vorherigen Abschnitten präsentierten Ergebnisse liefert, wurden ein Vielzahl von Testfahrten durchgeführt. Im Anschluss wird eine Auswahl von Ergebnissen präsentiert, die dokumentieren sollen, welche Vorteile sich aus der Fusion von inertialer und visueller Eigenzustandsschätzung ergeben. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung der inertialen Komponenten und der Fusion mit dem visuellen Kanal (vgl. Abb. 5.1).

9.3.1 Inertiale Eigenzustandsschätzung

Zur Validierung der inertialen Eigenzustandsschätzung, für welche das Kraftfahrzeug als starrer Körper modelliert wird (vgl. Abschnitt 5.4.2), fanden eine Reihe von Testfahrten auf der Autobahn München-Salzburg (A8) im Bereich des Irschenbergs statt. In Abbildung 9.10 ist sowohl der Verlauf der gemessenen $a_{x, Mess}$ als auch der geschätzten Längsbeschleunigung a_x bei einer Fahrt über den Irschenberg in Richtung Salzburg aufgetragen.

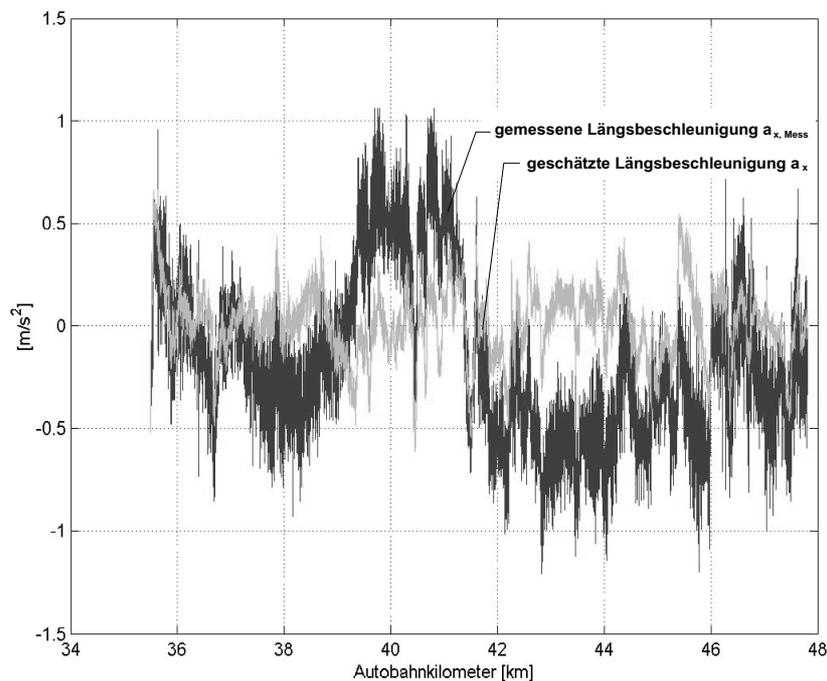


Abbildung 9.10: Gemessene $a_{x, Mess}$ und geschätzte Längsbeschleunigung a_x

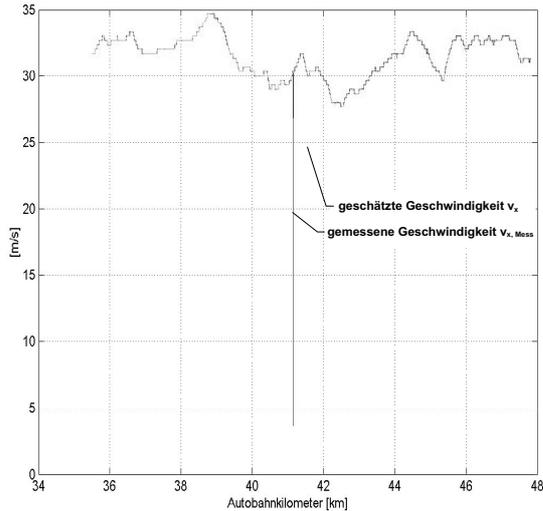


Abbildung 9.11: Gemessene $v_{x, Mess}$ und geschätzte Längsgeschwindigkeit v_x

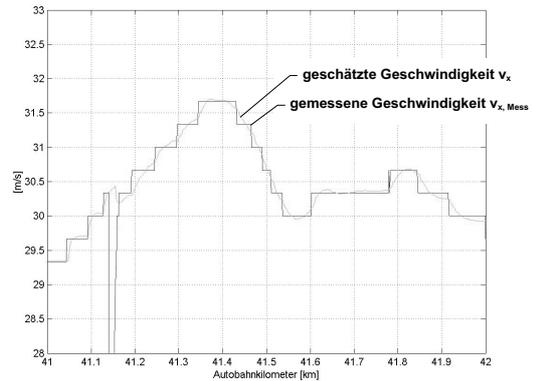


Abbildung 9.12: Detailausschnitt der gemessenen $v_{x, Mess}$ und geschätzten Längsgeschwindigkeit v_x

Die Geschwindigkeit wurde ebenfalls gemessen $v_{x, Mess}$ und geschätzt v_x . Die entsprechenden Zeitverläufe sind in Abb. 9.11 dargestellt. Man erkennt, dass Messausreißer, wie der bei Kilometer 41.15, durch die Schätzung ausgeglichen werden. Grund für den falschen Geschwindigkeitsmesswert war eine fehlerhafte Übermittlung der Geschwindigkeit über den CAN-Bus. Zur besseren Veranschaulichung ist der Bereich zwischen Kilometer 41 und 42 in Abbildung 9.12 vergrößert dargestellt. Neben der Überbrückung bei Ausfällen von Messwerten ist die glättende Wirkung des Kalman-Filters im Vergleich zu den quantisierten Messsignalen zu erkennen.

Die geschätzten Größen v_x für die Längsgeschwindigkeit und a_x für die tatsächliche Längsbeschleunigung dienen unter anderem schnellen Stabilisierungsregelkreisen als Regelgrößen (siehe Abbildung 5.1).

Die tatsächliche Längsbeschleunigung a_x des Fahrzeugs konnte aufgrund der Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung geschätzt werden. Die zusätzlichen Signalkomponenten in der Beschleunigungsmessung $a_{x, Mess}$ resultieren aus einem inertialen Nickwinkel θ , den das Fahrzeug und im Speziellen die Fahrzeugkarosserie gegenüber einem geodätischen Bezugssystem aufweist, wodurch das Messsignal schwerkraftabhängige Anteile enthält. Der inertielle Nickwinkel θ besteht aus zwei Komponenten. Der niederfrequente Anteil entspricht der Fahrbahnneigung γ , der hochfrequente dem Fahrzeugnickenwinkel θ_{Fzg} zwischen der Längsachse des Fahrzeugaufbaus und der lokalen Tangentialebene (vgl. Abschnitt 5.1). In Abbildung 9.13 ist der Verlauf des inertialen Nickwinkel θ für eine Fahrt über den Irschenberg in Richtung Salzburg aufgetragen. Mittels Tiefpassfilterung kann der niederfrequente Anteil des inertialen Nickwinkels θ ermittelt werden, der nahezu der Straßensteigung bzw. dem Straßengefälle γ entspricht. Zum Vergleich ist das Profil des Straßenverlaufs im Bereich des Irschenbergs im unteren Teil der Abbildung 9.13 aufgetragen. Die Daten über das Straßenprofil stammen aus Unterlagen der Autobahndirektion Süd.

eingeführt, welches die Nickbewegung des Fahrzeugaufbaus bezüglich der lokalen Tangentialebene beschreibt. Mit den für das Versuchsfahrzeug VAMP bekannten Fahrzeuggrößen dient das so gewonnene Nickdynamikmodell als Grundlage für die fusionierende Nickdynamikschätzung.

Verwendet man im Rahmen der fusionierenden Nickdynamikschätzung zur Innovation ausschließlich Messgrößen, die von der inertialen Zustandsschätzung gemäß Abschnitt 5.4.2 und 9.3.1 geliefert werden, so erhält man den in Abbildung 9.14 dargestellten Verlauf des Fahrzeugnickwinkels $\theta_{Fzg,Inertial}$. Als Messgrößen dienen die Längsbeschleunigung a_x und die um den niederfrequenten Anteil kompensierte Nickwinkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}_{Fzg,Inertial}$ gemäß Gleichung 5.4. Man erkennt die Drift des Fahrzeugnickwinkels $\theta_{Fzg,Inertial}$ von etwa $0.02^\circ/min$, die sich aufgrund der Aufintegration gestörter inertialer Messdaten ergibt.

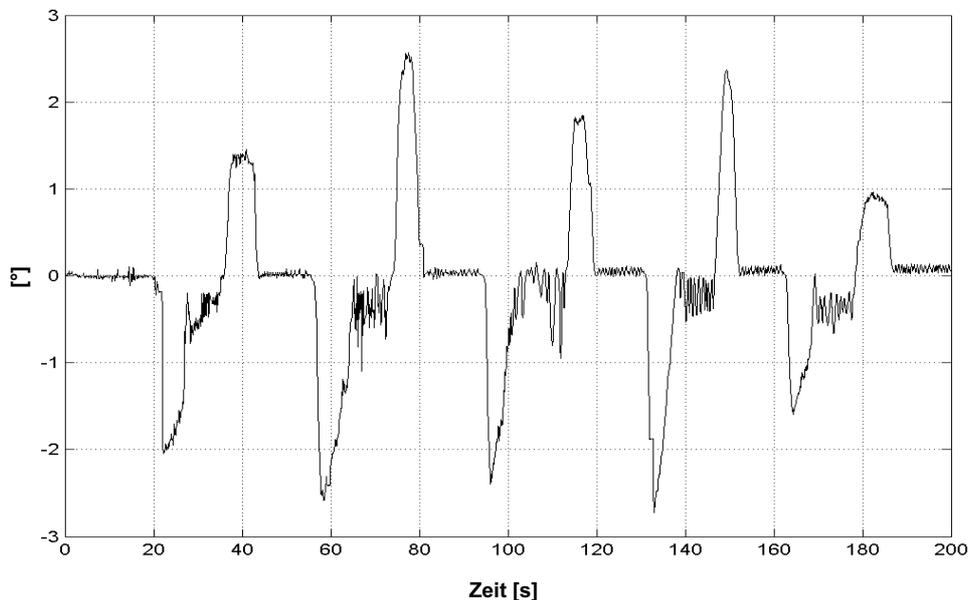


Abbildung 9.14: Ausschließlich auf inertialen Messungen basierende Schätzung des Fahrzeugnickwinkels $\theta_{Fzg,Inertial}$

Vergleicht man den Verlauf des ausschließlich aus inertialen Messgrößen gewonnenen Fahrzeugnickwinkels $\theta_{Fzg,Inertial}$ aus Abbildung 9.14 mit dem in Abbildung 9.15 dargestellten, rein mittels des visuellen Kanals bestimmten Nickwinkel $\theta_{Fzg,Vision}$, der in diesem Fall vom Straßenwahrnehmungsmodul ausschließlich anhand von visuellen Merkmalen der Straße bestimmt wurde (vgl. [HOFMANN]), so fällt auf, dass die bloße visuelle Nickwinkelschätzung weniger dynamisch als die inertielle ist. Dies trifft besonders auf die Phasen zu, in denen sich Systemgrößen aufgrund von Beschleunigen bzw. Bremsen in einem kurzen Zeitraum erheblich ändern. Im direkten Vergleich beider Kurven ergibt sich, dass die rein visuelle Zustandsschätzung Zustandsgrößenänderungen bis etwa $2.5Hz$ folgen

kann, wohingegen die ausschließlich auf inertialen Signalen beruhende Zustandsschätzung weitaus höherfrequente Zustandsänderungen verkraftet. Dies hat seine Ursache darin, dass die für das Nicken verantwortliche Ursache nämlich die Beschleunigungsänderung bei der inertialen Nickdynamikschätzung direkten Einfluss auf das Nickmodell in Form einer Eingangsgröße hat und mit den Inertialsensoren nahezu verzugsfrei gemessen werden kann. Es muss nicht erst, wie es bei der visuellen Nickwinkelschätzung der Fall ist, die Wirkung auf Beschleunigungsänderungen im Bild wahrgenommen werden muss.

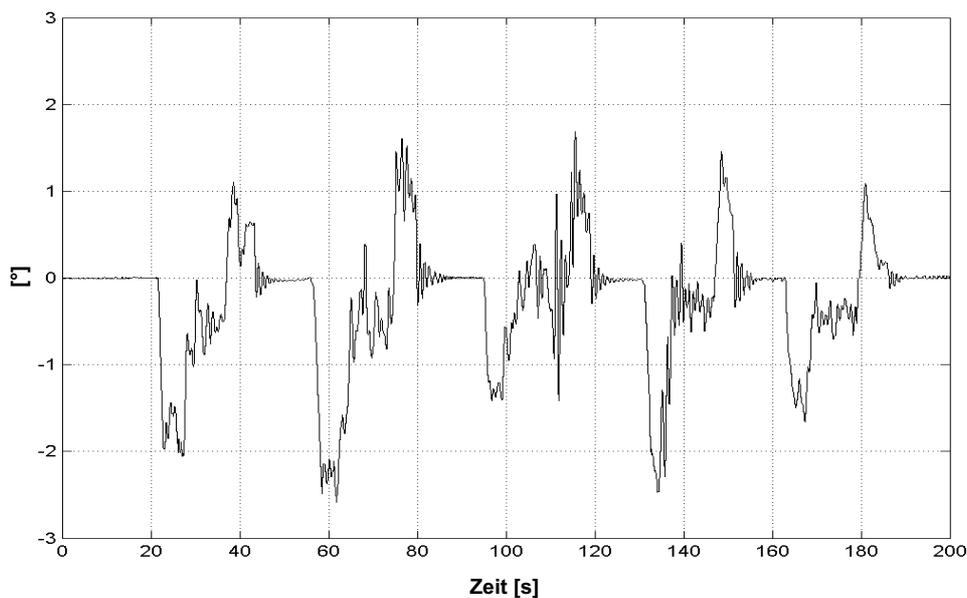


Abbildung 9.15: Ausschließlich auf visuellen Messungen basierende Schätzung des Fahrzeugnickwinkels $\theta_{Fzg, Vision}$

Es zeigt sich, dass in Phasen, in denen die visuelle Nickwinkelschätzung den auftretenden Nickbewegungen folgen kann, die Qualität der Schätzgrößen, welche von der visuellen Zustandsschätzung geliefert werden, äußerst gut ist, was bereits in [BEHRINGER 96] nachgewiesen wurde. Dies hat seine Ursache u.a. darin, dass sich Störungen, die etwa von Motorvibrationen stammen, im Bild nicht so stark auswirken wie bei Messungen mittels Inertialsensoren. Außerdem unterliegen die rein visuell geschätzten Zustandsgrößen keinerlei Drift.

Es ist daher naheliegend, die Ergebnisse der inertialen und visuellen Nickdynamikschätzung zu fusionieren, um die hohe Dynamik der inertialen Zustandsschätzung mit der stationären Genauigkeit der visuellen Nickdynamikschätzung zu kombinieren. Dazu wird zur Innovation im Rahmen der fusionierenden Zustandsschätzung neben den inertialen Größen wie der Fahrzeugnickgeschwindigkeit $\dot{\theta}_{Fzg, Inertial}$ auch der visuell ermittelte Fahrzeugnickwinkel $\theta_{Fzg, Vision}$ verwendet. Der so gewonnenen fusionierte Fahrzeugnickwinkel $\theta_{Fzg, Fusion}$ ist in Abbildung 9.16 dargestellt.

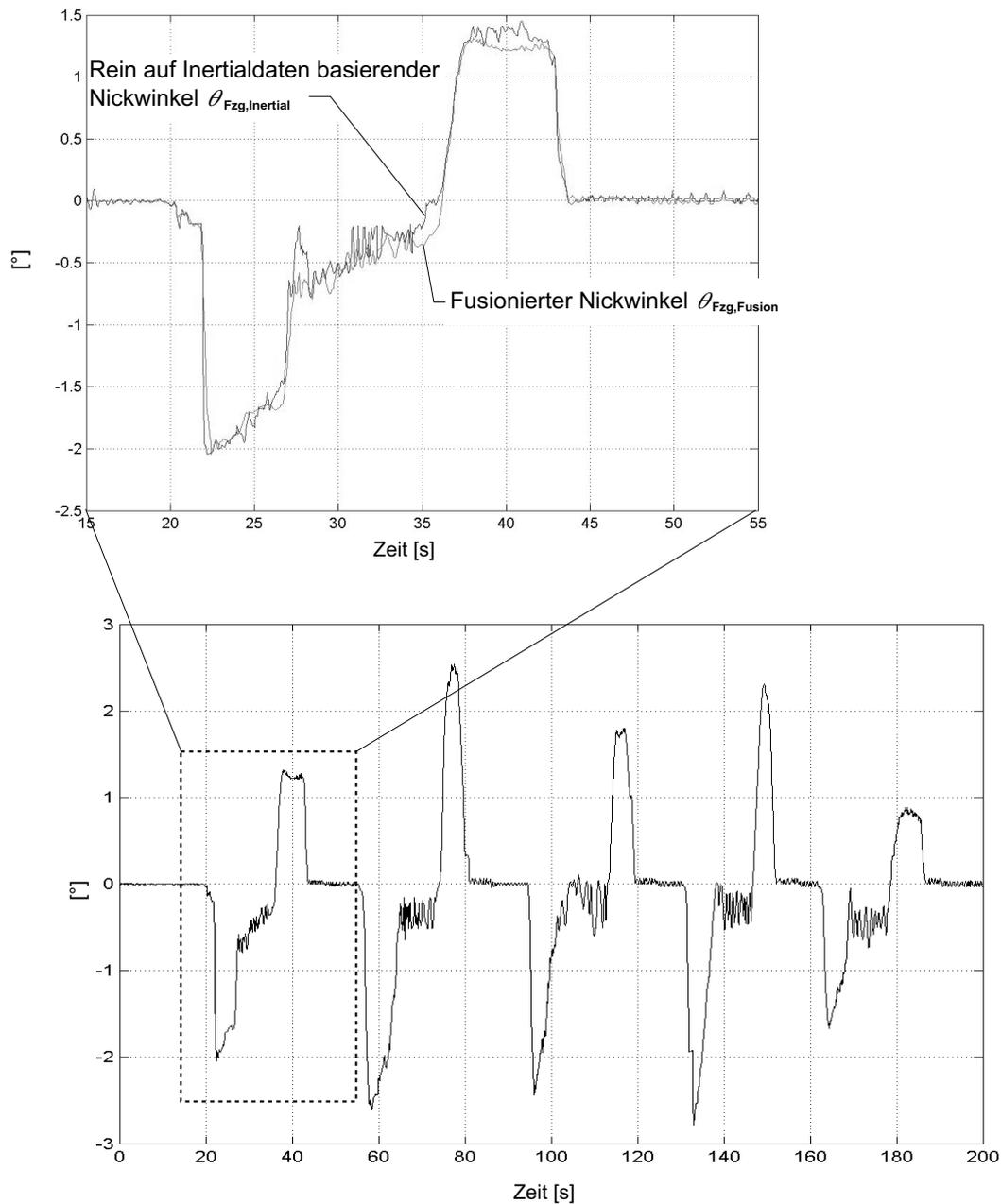


Abbildung 9.16: Fusionierter Fahrzeugnickenwinkel $\theta_{Fzg,Fusion}$

Im Vergleich zu den Verläufen des rein inertial (Abbildung 9.14) bzw. rein visuell (Abbildung 9.15) geschätzten Nickwinkels sieht man, dass die nahezu verzugsfreie Reaktion auf Zustandsänderungen, welche vom inertialen Kanal herrührt, erhalten bleibt. Die sich im inertialen Kanal ergebende Drift wird durch den visuellen Kanal kompensiert. Dies

wird besonders in Stillstandsphasen deutlich, wo das Driftverhalten bei rein inertialer Nickwinkelbestimmung klar erkennbar ist (vgl. Abbildung 9.14). Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen rein inertial bestimmtem Nickwinkel $\theta_{Fzg,Inertial}$ und dem fusionierten Fahrzeugnickwinkel $\theta_{Fzg,Fusion}$ dient der in Abbildung 9.16 vergrößert dargestellt Ausschnitt.

Der auf diese Weise fusionierte Fahrzeugnickwinkel $\theta_{Fzg,Fusion}$, der den hochfrequenten Anteil des inertialen Nickwinkels θ repräsentiert, wird allen funktionalen Komponenten des autonomen Systems zugänglich gemacht. Im EMS-Vision System geschieht dies in Form des Szenenbaumes, indem die entsprechende Stelle der 6DOF's zwischen den Szenenbaumknoten 'Fahrzeugbasis' und 'Fahrzeugaufbau' besetzt wird. Änderungen des Fahrzeugnickwinkels werden automatisch an die Systemkomponenten weitergeleitet, die Bedarf angemeldet haben.

Mittels dieses Mechanismus' ist es möglich, die in Abbildung 5.1 angedeutete Rückführung von fusionierten Zustandsgrößen - im vorliegenden Fall des Fahrzeugnickwinkels - zu den Zustandsschätzungen des inertialen und des visuellen Kanals zu realisieren. So kann auch die visuelle Nickwinkelschätzung profitieren, indem durch die Rückführung des fusionierten Fahrzeugnickwinkels $\theta_{Fzg,Fusion}$ speziell bei dynamischen Nickbewegungen die inertialen Anteile im fusionierten Nickwinkelsignal zur Geltung kommen und somit die visuelle Nickwinkelschätzung für dynamischere Vorgänge genutzt werden kann.

Kapitel 10

Zusammenfassung und Ausblick

Wie die Auswertung einschlägiger Literatur über sehende (semi-)autonome Fahrzeuge ergeben hat, wird zwar weltweit vielfach an einzelnen Bereichen wie der Umweltwahrnehmung mittels verschiedenster Sensoren oder der Fahrzeugsteuerung gearbeitet. Hierzu wurde auch eine Vielzahl von Versuchsfahrzeugen aufgebaut. Systeme, die einen ganzheitlichen Ansatz zur automatischen Führung von (semi-)autonomen Fahrzeugen verfolgen, findet man aber nur wenige.

Eines dieser Systeme ist **EMS-Vision**, das an der UBM entwickelt wurde. Es handelt sich dabei um ein primär auf visueller Wahrnehmung basierendes System zur autonomen Fahrzeugführung, das neben dem Wahrnehmungsteil sämtliche Komponenten umfasst, die für die Realisierung eines autonomen Agenten notwendig sind. Einige dieser Komponenten werden in dieser Arbeit vorgestellt.

Neben einer umfangreichen Umfeldwahrnehmung ist für einen autonomen Roboter auch das Wissen über die eigenen dynamischen Zustandsgrößen von Bedeutung. Diese werden im Rahmen einer Eigenzustandsschätzung gewonnen, welche primär auf Inertialsensordaten basiert. Zur Kompensation der unweigerlich durch die Aufintegration von inertialen Signalen entstehenden Drift, wird ein Verfahren vorgestellt, diese Drift mittels des visuellen Kanals zu kompensieren.

Das so gewonnene tiefere Verständnis der internen dynamischen Zusammenhänge des (semi-)autonomen Eigenfahrzeugs äußert sich in einer detaillierten Repräsentation des Eigenfahrzeugs im Szenenbaum. Das Hyperobjekt 'Eigenfahrzeug' wird dazu in seine Bestandteile zerlegt und diese werden jeweils durch ein eigenes Teilobjekt im Szenenbaum repräsentiert. Der Szenenbaum ist dabei eine Komponente einer zentralen dynamischen Wissensbasis.

Die zentrale dynamische Wissensbasis umfasst noch weitere Bestandteile wie das Fähigkeitsnetz. Dieses entstand im Zuge der Entwicklung des Fähigkeitskonzeptes als Medium zur Repräsentation und Verwaltung sämtlicher in einem autonomen System vorhandener Fähigkeiten. Ziel des Fähigkeitskonzeptes ist es, eine einheitliche, abstrakte Beschreibungsform für Systemfunktionalitäten zur Verfügung zu stellen, unabhängig davon, ob

diese der Wahrnehmung, der Fahrzeugsteuerung oder anderen Aufgabenfeldern zuzuordnen sind.

Die Umsetzung des Fähigkeitskonzepts wird exemplarisch im Rahmen der Fahrzeugsteuerung/-regelung vorgestellt. Es werden dazu Fahrmanöver als Fähigkeiten repräsentiert. Neben der Generierung der Fahrmanöver steht deren koordinierte Abfolge im Vordergrund der Untersuchungen. Experte für Fortbewegungs-Fähigkeiten ist das Modul 'Vehicle Control', welches für die Realisierung der angeforderten Fahrmanöver zuständig ist.

An der koordinierten Abfolge von Fortbewegungs-Fähigkeiten ist die Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung maßgeblich beteiligt. Sie ist Teil der hierarchischen Entscheidungsstruktur, wie sie in EMS-Vision umgesetzt ist. Aufgabe der Verhaltensentscheidung für die Fortbewegung ist es, die von hierarchisch höher angesiedelten Entscheidungsinstanzen angeforderten Fortbewegungs-Fähigkeiten fristgerecht und sicher anzustoßen. Sicher bedeutet in diesem Zusammenhang, dass stets ein sicherer fahrdynamischer Fahrzeugzustand zu gewährleisten ist.

Sämtliche der vorgestellten Komponenten und Verfahren haben sich in zahlreichen Fahrversuchen bewährt. Höhepunkt dabei war die vollkommen autonome Durchführung von Fahrmissionen, welche sowohl das Fahren auf befestigten Straßen wie auch im Gelände beinhalteten. Dabei stellten speziell das Erkennen von negativen Hindernissen und deren Umfahrung hohe Anforderungen an das autonome System.

Für die heute auf dem Markt und in Entwicklung befindlichen Fahrerassistenzsysteme mögen die für autonome Fahrzeuge entwickelten Verfahren und Komponenten überzogen erscheinen. Zukünftige Fahrerassistenzsysteme, die verschieden komplexe Funktionen vereinigen, werden aber ohne derart umfassende Ansätze nicht auskommen.

Literaturverzeichnis

- [ALBUS & MYSTEL 97] J.S. Albus & A. Mystel: *Behavior Generation in Intelligent Systems*. Techn. Bericht, NISTIR 6083, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1997.
- [AMELING 02] C. Ameling: *Steigerung der aktiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen durch ein Kollisionsvermeidungssystem*. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2002.
- [AMMON 97] D. Ammon: *Modellierung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik*. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1997.
- [ANTSAKLIS & PASSINO 93] P.J. Antsaklis & K.M. Passino: *Introduction to Intelligent Control Systems with High Degrees of Autonomy*. In Antsaklis et al. (Ed.): *An Introduction to intelligent and autonomous control*, S. 1-26, Boston, 1993. Kluwer Academic Publishers.
- [ARKIN 98] R.C. Arkin: *Behavior-based Robotics*. MIT-Press, Cambridge, Mass., 1998.
- [BATAVIA, 99] P. Batavia: *Driver-Adaptive Lane Departure Warning Systems*. Dissertation, Carnegie Mellon University, The Robotics Institute, Pittsburgh, 1999.
- [BECKER ET AL. 98] J.C. Becker, A. Simon, I. Söhnitz, H. Göllinger & W. Schumacher: *A Decentralized Path Planning and Control Structure for an Autonomous Vehicle*. In *Proc. of the 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '98*, S. 457-462, Stuttgart, 1998.
- [BEHRINGER 96] R. Behringer: *Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1994.
- [BERTOZZI ET AL. 97] M. Bertozzi, A. Broggi, G. Conte & A. Fascioli: *Obstacle and Lane Detection on ARGO*. In *Proc. of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC '97*, Boston, 1997.

- [BERTOZZI ET AL. 98a] M. Bertozzi, A. Broggi, G. Conte & A. Fascioli: *The Experience of the ARGO Autonomous Vehicle*. In *Proc. of the 1998 SPIE Conference on Enhanced and Synthetic Vision*, Orlando, 1998.
- [BERTOZZI ET AL. 98b] M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli & S. Tommesani: *Experiments using MMX-Based Processors for Real-Time Image Processing on the ARGO Vehicle*. In *Proc. of the 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '98*, S. 505-510, Stuttgart, 1998.
- [BIERMAN 77] G.J. Bierman: *Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation*. In *Mathematics in Science and Engineering*, Vol. 128, Academic Press, New York, 1977.
- [BINFET-KULL ET AL. 98] M. Binfet-Kull, P. Heitmann & C. Ameling: *System Safety for an Autonomous Driving Vehicle*. In *Proc. of the 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '98*, S. 469-474, Stuttgart, 1998.
- [BÖRNER ET AL. 00] M. Börner, S. Semmler, H. Straky & R. Isermann: *Bordintegrierte Überwachung und Fehlerdiagnose von Kfz-Komponenten*. In *Thema Forschung*, Ausgabe 1/00, Technische Universität Darmstadt, 2000.
- [BOSCH 01] R. Bosch GmbH: *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. R. Bosch GmbH, 22. Auflage, 2001.
- [BOSCH 02] R. Bosch GmbH: *Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC*. R. Bosch GmbH, Technische Unterrichtungen, 2002.
- [BRAESS & REICHART 95a] H.-H. Braess & G. Reichart: *Prometheus: Vision des „intelligenten Automobils“ auf „intelligenter Straße“?* Teil 1, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 97, S. 200-205, 1995.
- [BRAESS & REICHART 95b] H.-H. Braess & G. Reichart: *Prometheus: Vision des „intelligenten Automobils“ auf „intelligenter Straße“?* Teil 2, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 97, S. 330-343, 1995.
- [BRANICKY 95] M.S. Branicky: *Studies in hybrid systems: Modeling, Analysis, and Control*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Elec. Eng. and Com. Sci., Cambridge, Mass., 1995.
- [BROCKHAUS 96] Brockhaus: *Brockhaus - Die Enzyklopädie*. 20. Auflage, F.A. Brockhaus Verlag, Leipzig, 1996.
- [BROCKHAUS 82] Brockhaus: *Brockhaus - Deutsches Wörterbuch*. F.A. Brockhaus Verlag, Mannheim, 1982.

-
- [BROGGI ET AL. 99] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli & G. Conte: *Automatic Vehicle Guidance: The Experience of the ARGO Autonomous Vehicle*. World Scientific Publishing, Singapore, 1999.
- [BROOKS 86] R. Brooks: *A Robust Layered Control System for a Mobile Robot*. In *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Bd. 2, Nr. 1, S. 14-23, 1986.
- [BRÜDIGAM 94] C. Brüdigam: *Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1994.
- [COOMBS ET AL. 00] D. Coombs, K. Murphy, A. Lacaze & S. Legowik: *Driving Autonomously Offroad up to 35 km/h*. In *Proc. of the 2000 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '00*, S. 186-191, Dearborn, 2000.
- [DAVIET & PARENT 96] P. Daviet & M. Parent: *Longitudinal and Lateral Servoing of Vehicles in a Platoon*. In *Proc. of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '96*, Tokio, 1996.
- [DICKMANN & ZAPP 86] E.D. Dickmanns & A. Zapp: *A curvature-based scheme for improving road vehicle guidance by computer vision*. In *Proc. of the 1986 SPIE Conference on Mobile Robots*, 1986.
- [DICKMANN 87a] E.D. Dickmanns: *4D-Szenenanalyse mit integralen raumzeitlichen Modellen*. In Paulus (Ed.): *9. DAGM-Symposium Mustererkennung*, Informatik Fachberichte, Nr. 149, Braunschweig, September 1987. Springer-Verlag.
- [DICKMANN 87b] E.D. Dickmanns & A. Zapp: *Autonomous high speed road vehicle guidance by computer vision*. In R. Isermann (Ed.): *Automatic Control - World congress, 1987: Selected Papers from the 10th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control*, S. 221-226, München, 1987. Pergamon-Press.
- [DICKMANN 89] E.D. Dickmanns: *Subject-Object Discrimination in 4D-Dynamic Scene Interpretation for Machine Vision*. In *Proc. of the IEEE Int. Workshop on Visual Motion*, S. 298-304, Irvine, 1989.
- [DICKMANN ET AL. 94] E.D. Dickmanns, R. Behringer, D. Dickmanns, T. Hildebrandt, M. Maurer, F. Thomanek & J. Schiehlen: *The seeing passenger car VaMoRs-P*. In *Proc. of the 1994 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '94*, S. 68-73, Paris, 1994.
- [DICKMANN 95] E.D. Dickmanns: *Road vehicle eyes for high precision navigation*. In Linkwitz et al. (Ed.): *High Precision Navigation*, S. 329-336, Bonn, 1995. Dümmler-Verlag.
- [DICKMANN 97] D. Dickmanns: *Rahmensystem für die visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Informatik, Neubiberg, 1997.

- [DUBROVIN ET AL. 00] A. Dubrovin, J. Lelevé, A. Prevost, M. Canry, S. Cherfan, P. Lecocq, J.M. Kelada. A. Kemeny: *Application of Real-Time Lighting Simulation for Intelligent Front-Lighting Studies*. In *Proc. of Conference on Driving Simulation*, Paris, 2000.
- [EBERL 87] G. Eberl: *Automatischer Landeanflug durch Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1987.
- [ENGMANN 00] K. Engmann: *Technologie des Flugzeugs*. 2. Auflage, Leuchtturm-Verlag, Alsbach, 2000.
- [ENKELMANN 97] W. Enkelmann: *Entwicklung von Systemen zur Interpretation von Straßenverkehrsszenen durch Bildfolgenauswertung*. Infix Verlag, Sankt Augustin, 1997.
- [FAGERER 96] C. Fagerer: *Automatische Teleoperation eines Tracking- und Greifvorgangs im Weltraum basierend auf Bilddatenauswertung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1996.
- [FARKAS ET AL. 97] D. Farkas, J. Young, B. Baertlein & Ü. Özgüner: *Forward-Looking Radar Navigation System for 1997 AHS Demonstration*. In *Proc. of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC '97*, Boston, 1997.
- [FLETCHER ET AL. 01] L. Fletcher, N. Apostoloff, J. Chen & A. Zelinsky: *Computer Vision for Vehicle Monitoring and Control*. In *Proc. of Australian Conference on Robotics & Automation*, Sydney, November, 2001.
- [FÖLLINGER 94] O. Föllinger: *Regelungstechnik*. 8. überarbeitete Auflage, Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 1994.
- [FRANKE ET AL. 98] U. Franke, D.M. Gavrila, S. Görzig, F. Lindner, F. Paetzold, & C. Wöhler: *Bildverstehen im innerstädtischen Verkehr*. In H. Wörn et al. (Ed.): *Autonome Mobile Systeme 1998*, 14. Fachgespräch, Karlsruhe, Informatik Aktuell, 1999. Springer-Verlag.
- [FÜRST] S. Fürst. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Angekündigt für 2004.
- [FUJIOKA 00] T. Fujioka: *ITS Demonstration by the University of Tokyo Team at DEMO 2000*. In *KOYO Engineering Journal*, English Edition, No.160E, 2002.
- [GASS 85] S.I. Gass: *Decision Making, Models and Algorithms*. Wiley-Interscience Publications, New York, 1985.
- [GAVRILA & GIEBEL 02] D.M. Gavrila & J. Giebel: *Shape-based Pedestrian Detection and Tracking*. In *Proc. of the 2002 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '02*, Versailles, 2002.

- [GELB 74] A. Gelb: *Applied Optimal Estimation*. MIT Press, Cambridge & London, 1974.
- [GIACOMINI ET AL. 98] F. Giacomini, T. Amundsen, A. Bogaerts, B.D. Johnsen, R. Nordstrøm & P. Werner: *Low-level SCI software requirements, analysis and pre-design*. Esprit-Project 12174. 1998.
- [GILL & BLYTHE 00] Y. Gill & J. Blythe: *How Can a Structured Representation of Capabilities Help in Planning?* In *Proc. of the 2000 AAAI Workshop on Representational Issues for Real-time Planning Systems*, Austin, 2000.
- [GÖBEL 94] F. Göbel: *Sicherheitsanalyse eines transputerbasierten Lenkungssystems für Kraftfahrzeuge*. Diplomarbeit, Fachhochschule Kempten. Durchgeführt bei der Daimler-Benz AG, Stuttgart, F1M/IS, 1994.
- [GOLDBECK ET AL. 98] J. Goldbeck, G. Draeger, B. Huertgen, S. Ernst & F. Wilms: *Lane Following Combining Vision and DGPS*. In *Proc. of the 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '98*, S. 445-450, Stuttgart, 1998.
- [GÖRZIG & FRANKE 98] S. Görzig & U. Franke: *ANTS - Intelligent Vision in Urban Traffic*. In *Proc. of the 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '98*, S. 545-549, Stuttgart, 1998.
- [GRAEFE 84] V. Graefe: *Two Multiprocessor-Systems for Low-Level Real-Time Vision*. In Brady et al. (Ed.): *Robotics and Artificial Intelligence*, S. 301-308, 1984. Springer-Verlag.
- [GREGOR 02] R. Gregor: *Fähigkeiten zur Missionsdurchführung und Landmarkennavigation*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 2002.
- [HAAS 82] G. Haas: *Meßwertgewinnung durch Echtzeitauswertung von Bildfolgen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1982.
- [HAREL 87] D. Harel: *Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems*. In *Science of Computer Programming*, Bd. 8, S. 231-274, 1987.
- [HASKARA ET AL. 97] I. Haskara, C. Hatipoğlu & Ü. Özgüner: *Combined Decentralized Longitudinal and Lateral Controller Design for Truck Convoys*. In *Proc. of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC '97*, Boston, 1997.
- [HATIPOĞLU ET AL. 97] C. Hatipoğlu, K. Redmill & Ü. Özgüner: *Steering and Lane Change: A Working System*. In *Proc. of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC '97*, Boston, 1997.

- [HEBERT ET AL. 97] M.H. Hebert, C. Thorpe & A. Stentz: *Intelligent Unmanned Ground Vehicles - Autonomous Navigation Research at Carnegie Mellon*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- [HEIMES 00] F. Heimes: *Sichtsystemgestützte Fahrerassistenz im innerstädtischen Straßenverkehr*. Infix Verlag, Sankt Augustin, 2000.
- [HEINRICH 02] S. Heinrich: *Fast Obstacle Detection using Flow/Depth Constraint*. In *Proc. of the 2002 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '02*, Versailles, 2002.
- [HEMA 93] Hema: *Dokumentation Vita II Fahrzeugrechner*. Technische Dokumentation, Hema, Aachen, 1993.
- [VON HINÜBER & JANOCHA 95] E. von Hinüber & H. Janocha: *Leistungspotential moderner inertialer Meßsysteme*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 97, S. 30-35, 1995.
- [HOCK 94] C. Hock: *Wissensbasierte Fahrzeugführung mit Landmarken für autonome Roboter*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1994.
- [HOFMANN ET AL. 01] U. Hofmann, A. Rieder & E.D. Dickmanns: *Radar and Vision Data Fusion for Hybrid Adaptive Cruise Control on Highways*. In Schiele et al. (Ed.): *Computer Vision Systems*, S. 125-138, Vancouver, 2001. Springer-Verlag.
- [HOFMANN & SIEDERSBERGER 03] U. Hofmann & K.-H. Siedersberger: *Stereo and photometric image sequence interpretation for detecting negative obstacles using active gaze control and performing an autonomous jink*. In *Proc. of the 2003 SPIE Conference on Unmanned Ground Vehicle Technology V*, Orlando, 2003.
- [HOFMANN] U. Hofmann. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, Angekündigt für 2004.
- [VON HOLT 93] V. von Holt: *System- und Kommunikationsstruktur im VITA-Transputersystem des ISF/UniBwM*. Interner Bericht, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1993.
- [VON HOLT & THOMANEK 96] V. von Holt & F. Thomanek: *Robust Object Tracking*. Deliverable D2.3.6 ESPRIT Project 8329 CLEOPATRA, Universität der Bundeswehr München, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Neubiberg, 1996.
- [HORN 68] J.L. Horn: *Organization of Abilities and the Development of Intelligence*. In *Psychological Review*, Bd. 75, Nr. 3, S. 242-259, 1968.
- [IKA 99] Institut für Kraftfahrwesen (Ika): *Adaptive Cruise Control - Series Introduction and Future Development*. Euromotor Seminar - Telematic, Vehicle and Environment, Institut für Kraftfahrwesen, Aachen, 1999.

-
- [ISO8855 94] Normenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA) im DIN e.V.: *ISO 8855: Straßenfahrzeuge, Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten*. Beuth-Verlags GmbH, Köln, 1994.
- [JEROSLOW 88] R.G. Jeroslow: *Approaches to Intelligent Decision Support*. In Hammer (Ed.): *Annals of Operational Research*, Bd. 12, Nr. 1-4, Scientific Publishing Company, Basel, 1988.
- [JOICHEM ET AL. 95] T. Jochem, D.A. Pomerleau & C.E. Thorpe: *Vision Guided Lane Transition*. In *Proc. of the 1995 IEEE Intelligent Vehicles Symposium -IV '95*, Detroit, 1995.
- [JÜRGENSOHN 97] T. Jürgensohn: *Hybride Fahrermodelle*. Pro Universitate Verlag, 1997.
- [JULA ET AL. 99] H. Jula, E. Kosmatopoulos & P. Ioannou: *Collision Avoidance Analysis for Lane Changing and Merging*. PATH UCB-ITS-PRR-99-13, April, 1999.
- [KAILATH ET AL. 00] T. Kailath, A.H. Sayed & B. Hassibi: *Linear Estimation*. Prentice Hall, New Jersey, 2000.
- [KALMAN 60] R.E. Kalman: *A new approach to linear filtering and prediction problems*. In *Trans. ASME Series D.J. Basic Eng.*, 82D(1), S. 34-45, März 1960.
- [KASPER ET AL. 68] H. Kasper, W. Schürba & H. Lorenz: *Die Klotoide als Trassierungselement*. 5. Auflage, Dümmler-Verlag, Bonn, 1968.
- [KINZEL 94] W. Kinzel: *Präattentive und attentive Bildverarbeitungsschritte zur visuellen Erkennung von Fußgängern*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1994.
- [KNIERIEMEN 91] T. Knieriemen: *Autonome Mobile Roboter*. In Böhling (Hrsg.): *Reihe Informatik*, Band 80, Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1991.
- [KOICHEM ET AL. 02] M. Kochem, R. Isermann, N. Wagner & C.D. Hamann: *Ein intelligentes Parkassistenzsystem für Kraftfahrzeuge*. In *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2002*, VDI-Bericht 1672, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [KOPISCHKE 00] S. Kopischke: *Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Gemeinsame Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, Braunschweig, 2000.
- [KÖSECKÀ ET AL. 97] J. Köseckà, R. Blasi, C.J. Taylor & J. Malik: *Vision-based lateral control of vehicles*. In *Proc. of the 1997 Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC '97*, Boston, 1997.

- [LABAHN & BOEHLAU 01] N. Labahn & C. Boehlau: *Unterstützung des Fahrers durch Umweltsensorik und intelligente Lichtsteuerung*. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*, VDI-Bericht, S. 315-331, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [LACAZE ET AL. 98] A. Lacaze, Y. Moscovitz, N. DeClaris & K. Murphy: *Path Planning for Autonomous Vehicles Driving Over Rough Terrain*. In *Proc. of 1998 IEEE International Symposium on Intelligent Control - IV '98*, S. 50-55, Gaithersburg, 1998.
- [LATOMBE 98] J.-C. Latombe: *Robot Motion Planning*. 5. Auflage, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [LAUGIER ET AL. 96] C. Laugier, I. Paromtchik & M. Parent: *Developing Autonomous Maneuvering Capabilities for Future Cars*. In *Proc. of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '96*, Tokio, 1996.
- [LE MENTEC ET AL. 99] J.-C. Le Mentec, F. Glenn, W. Zachary & J. Eilbert: *Representing Human Sensory and Motor Action Behavior in a Cognitive Modeling Architecture*. In *Proc. of the 8th Conference on Computer Generated Forces and Behavioral Representation*, Orlando, 1999.
- [LN9300 90] Normenstelle Luftfahrt im DIN e.V.: *LN 9300: Luftfahrtnorm*. Beuth-Verlags GmbH, Köln, 1990.
- [LOFFELD 90] O. Loffeld: *Estimationstheorie*. Oldenbourg-Verlag, München, 1990.
- [LORENZ 75] K. Lorenz: *Die Rückseite des Spiegels - Versuch einer Naturgeschichte menschlichen Erkennens*. Piper-Verlag, München, 1943.
- [LÜTZELER & BATEN 00] M. Lützelner & S. Baten: *Road Recognition for a Tracked Vehicle*. In *Proc. of the 2000 SPIE Conference on Enhanced and Synthetic Vision*, Orlando, 2000.
- [LÜTZELER 02] M. Lützelner: *Fahrbahnerkennung zum Manövrieren auf Wegenetzen mit aktivem Sehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 2002.
- [MACH 01] E. Mach *Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen*. Nachdruck und Übersetzung der Ausgabe von 1875, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001.
- [MAURER ET AL. 96] M. Maurer, F. Behringer, S. Fürst, F. Thomanek & E.D. Dickmanns: *A Compact Vision System for Road Vehicle Guidance*. In *Proc. of 13th Int. Conference on Pattern Recognition*, S. 313-317, Wien, 1996.
- [MAURER 00] M. Maurer: *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnesehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 2000.

-
- [MAYBECK 82] P.S. Maybeck: *Stochastic models, estimation and control*. Bd. 1, Academic Press, New York, 1982.
- [MEISSNER 82] H.G. Meissner: *Steuerung dynamischer Systeme aufgrund bildhafter Informationen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1982.
- [MESAROVIC ET AL. 70] M. Mesarovic, D. Macko & Y. Takahara: *Theory of Hierarchical, Multilevel Systems*. Academic Press, New York, 1970.
- [MEYERS 71] Bibliographisches Institut: *MEYERS Enzyklopädisches Lexikon*. Lexikon-Verlag, Mannheim, 1971.
- [MEYSTEL 91] A. Meystel: *Autonomous Mobile Robots*. In *World Scientific Series in Automation*, Band 1, World Scientific Publishing, Singapore, 1991.
- [MITSCHKE 68] M. Mitschke: *Fahrtrichtungshaltung - Analyse der Theorien*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 70, S. 157-162, 1968.
- [MITSCHKE 82] M. Mitschke: *Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band A: Antrieb und Bremsung*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1982.
- [MITSCHKE 90] M. Mitschke: *Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C: Fahrverhalten*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [MITSCHKE 97] M. Mitschke: *Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band B: Schwingungen*. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [MOCK-HECKER 94] R. Mock-Hecker: *Wissensbasierte Erkennung kritischer Verkehrssituationen - Erkennung von Plankonflikten*. Dissertation, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [MÜLLER 94] N. Müller: *Die Fahrzeugschnittstelle über Transputerlink*. Interner Bericht, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1994.
- [MÜLLER 96] N. Müller: *Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Straßenfahrzeug*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1996.
- [MYSLIWETZ 90] B. Mysliwetz: *Parallelrechner-basierte Bildfolgen-Interpretation zur autonomen Fahrzeugsteuerung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1990.
- [NAAB & REICHART 98] K. Naab & G. Reichart: *Grundlagen der Fahrerassistenz und Anforderungen aus Nutzersicht*. Seminar „Fahrerassistenzsysteme“, Haus der Technik, Essen, 1998.

- [NAGEL & ENKELMANN 91] H.-H. Nagel & W. Enkelmann: *Generic Road Traffic Situations and Driver Support Systems*. In *Proc. of the 5th PROMETHEUS Workshop*, S. 76-85, München, 1991.
- [NAGEL 94] H.-H. Nagel: *A Vision of 'Vision and Language' Comprises Action: An Example from Road Traffic*. In *Artificial Intelligence Review 8*, S. 189-214, 1994.
- [NAGEL ET AL. 95] H.-H. Nagel, W. Enkelmann & G. Struck: *FhG-Co-Driver: From Map-Guided Automatic Driving by Machine Vision to a Cooperative Driver Support*. In *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 22, 1995.
- [OESTEREICH 97] B. Oestereich: *Objektorientierte Softwareentwicklung mit der Unified Modeling Language*. 3. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 1997.
- [ÖZGÜNER ET AL. 97a] Ü. Özgüner, B. Baertlein, C. Cavello, D. Farkas, C. Hatipoğlu, S. Lytle, J. Martin, F. Paynter, K. Redmill, S. Schneider, E. Walton & J. Young: *The OSU DEMO '97 Vehicle*. In *Proc. of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC '97*, Boston, 1997.
- [ÖZGÜNER ET AL. 97b] Ü. Özgüner, C. Hatipoğlu & K. Redmill: *Autonomy in a Restricted World*. In *Proc. of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC '97*, Boston, 1997.
- [OKUNO ET AL. 92] A. Okuno, K. Fujita, & A. Kutami: *Visual Navigation of an Autonomous On-Road Vehicle: Autonomous Cruising on Highways*. In Masaki (Ed.): *Vision-based Vehicle Guidance*, S. 222-237, Berlin, 1992. Springer-Verlag.
- [PAETZOLD & FRANKE 98] F. Paetzold & U. Franke: *Road Recognition in Urban Environment*. In *Proc. of the 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '98*, S. 87-91, Stuttgart, 1998.
- [PARSYTEC 92] Parsytec: *The Parsytec Transputer System*. Technische Dokumentation, Parsytec, Aachen, 1992.
- [PAUL 81] R.P. Paul: *Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control*. The MIT-Press, Cambridge, Mass., 1981.
- [PELLKOFER 03] M. Pellkofer: *Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 2003.
- [POMERLEAU 92] D.A. Pomerleau: *Neural Network Perception for Mobile Robot Guidance*. Dissertation, Carnegie Mellon University, The Robotics Institute, Pittsburgh, 1992.

-
- [POMERLEAU 95] D.A. Pomerleau: *RALPH: Rapidly Adapting Lateral Position Handler*. In *Proc. of the 1995 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '95*, S. 506-511, Detroit, 1995.
- [POMERLEAU & JOCHEM 96] D.A. Pomerleau & T. Jochem: *Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering*. In *IEEE Expert*, Bd. 11, Nr. 2, S. 19-27, 1996.
- [RASMUSSEN 83] J. Rasmussen: *Skills, Rules and Knowledge, Signals, Signs and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models*. In *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Bd. 13, Nr. 3, S. 257-266, 1983.
- [RIEDER 00] A. Rieder: *FAHRZEUGE SEHEN - Multisensorielle Fahrzeugerkennung in einem verteilten Rechnersystem für autonome Fahrzeuge*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 2000.
- [RIEKERT & SCHUNK 40] P. Riekert & T.E. Schunk: *Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs*. Ingenieur-Archiv, Bd. 11, S. 210-224, 1940.
- [RILL 94] G. Rill: *Simulation von Kraftfahrzeugen*. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1994.
- [RINGLER ET AL. 98] T. Ringler, J. Steiner, R. Belschner & B. Hedenetz: *Increasing System Safety for by-wire Applications in Vehicles by using a Time Triggered Architecture*. In Ehrenberger (Ed.): *Proc. of the 17th International Conference on Computer Safety, Reliability and Security*, S. 243-251, Heidelberg, 1998. Springer-Verlag.
- [RISACK ET AL. 00] R. Risack, P. Klausmann, W. Krüger & W. Enkelmann: *A Video-based Lane Keeping Assistant*. In *Proc. of the 2000 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '00*, S. 356-361, Dearborn, 2000.
- [ROPPENECKER 94] G. Roppenecker: *Fahrzeugdynamik: Grundlagen der Modellierung und Regelung*. In *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 10, Nr. 42, S. 429-441, 1994.
- [ROPPENECKER 00] G. Roppenecker: *Systemdynamik und Regelung von Kraftfahrzeugen*. Skript zur gleichnamigen Vorlesung, Lehrstuhl für Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 2000.
- [SÄGER ET AL. 98] P. Säger, H. Reuter & E. Schneider: *ACC - Automatische Abstands- und Geschwindigkeitsregelung*. VDO, Forschungsbericht, 1998.
- [SCHAAF 98] J. Schaaf: *Über die Suche nach situationsgerechten Fällen im fallbasierten Schließen*. Infix Verlag, Sankt Augustin, 1998.
- [SCHELL 92] R. Schell: *Bordautonomer automatischer Landeanflug aufgrund bildhafter und inertialer Meßdatenauswertung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1992.

- [SCHICK 92] J. Schick: *Gleichzeitige Erkennung von Form und Bewegung durch Rechnerehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1992.
- [SCHIEHLEN & DICKMANNNS 94] J. Schiehlen & E.D. Dickmanns: *A Camera Platform for Intelligent Vehicles*. In *Proc. of the 1994 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '94*, S. 393-398, Paris, 1994.
- [SCHRAUT 00] M. Schraut: *Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, München, 2000.
- [SCHRICK 77] K.-W. Schrick: *Anwendungen der Kalman-Filter-Technik*. Oldenbourg-Verlag, München, 1977.
- [SCHWARTZ 00] I. Schwartz: *PRIMUS: Autonomous Driving Robot for Military Applications*. In *Proc. of the 2000 SPIE Conference on Unmanned Ground Vehicle Technology II*, Orlando, 2000.
- [SCHWARZE ET AL. 98] K. Schwarze, H. Göllinger & A. Busch: *Actuator Concept for an Autonomous Robotic Driver*. In *Proc. of the 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '98*, S. 463-468, Stuttgart, 1998.
- [SHOEMAKER 97] C. Shoemaker: *The Future of Unmanned Ground Vehicles*. In *Proc. of the 30th International Symposium on Automotive Technology & Automation*, Florenz, 1997.
- [SHOEMAKER & BORNSTEIN 00] C. Shoemaker & J. Bornstein: *Overview and Update of the Demo II Experimental Unmanned Vehicle Program*. In *Proc. of the 2000 SPIE Conference on Unmanned Ground Vehicle Technology II*, Orlando, 2000.
- [SIEDERSBERGER 96a] K.-H. Siedersberger: *Entwurf eines Bremsdruckreglers für VaMoRs-P*. Studienarbeit, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1996.
- [SIEDERSBERGER 96b] K.-H. Siedersberger: *Entwicklung einer automatischen Längsführung für Kraftfahrzeuge auf Autobahnen*. Diplomarbeit, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1996.
- [SIEDERSBERGER & DICKMANNNS 00] K.-H. Siedersberger & E.D. Dickmanns: *EMS-Vision: Enhanced Abilities for Locomotion*. In *Proc. of the 2000 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '00*, S. 146-151, Dearborn, 2000.

-
- [SIEDERSBERGER 01] K.-H. Siedersberger: *Koordinaten und Koordinatensysteme für EMS-Vision*. Forschungsbericht, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2001.
- [SIEDERSBERGER ET AL. 01] K.-H. Siedersberger, M. Pellkofer, M. Lützel, E.D. Dickmanns, A. Rieder, R. Mandelbaum & L. Bogoni: *Combining EMS-Vision and Horopter Stereo for Obstacle Avoidance of Autonomous Vehicles*. In Schiele et al. (Ed.): *Computer Vision Systems*, S. 125-138, Vancouver, 2001. Springer-Verlag.
- [SÖHNITZ & SCHWARZE 99] I. Söhnitz & K. Schwarze: *Control of an Autonomous Vehicle: Design and First Practical Results*. In *Proc. of the 1999 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC '99*, Tokio, 1999.
- [SOTELO ET AL. 02] M.A. Sotelo, F.J. Rodriguez & L. Magdalena: *Vision-based Navigation System for Autonomous Urban Transport Vehicles in Outdoor Environments*. In *Proc. of the 2002 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '02*, Versailles, 2002.
- [SPOHR & WERBER 00] M. Spohr & J. Werber: *Herleitung und Validierung von Aufbaudynamikmodellen für Straßenfahrzeuge*. Diplomarbeit, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2000.
- [STENTZ 94] A. Stentz: *Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments*. In *Proc. of the 1994 IEEE International Conference on Robotics & Automation - ICRA '94*, 1994.
- [STILLER ET AL. 98] C. Stiller, J. Hipp, C. Rössig & A. Ewald: *Multisensor Obstacle Detection and Tracking*. In *Proc. of the 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '98*, S. 451-456, Stuttgart, 1998.
- [STRAKY ET AL. 02] H. Straky, M. Börner & R. Isermann: *Fehlerdiagnose von hydraulischen Kfz-Bremssystemen mit modellbasierten Methoden*. VDI-Bericht, Nr. 1672, S. 147-164, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [TAYLOR ET AL. 96] C.J. Taylor, J. Malik & J. Weber: *A real-time approach to stereopsis and lane-finding*. In *Proc. of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '96*, Tokio, 1996.
- [THEILIG 00] A. Theilig: *Entwicklung eines geschwindigkeitsadaptiven Querreglers bis 10 m/s für das Versuchsfahrzeug VaMoRs*. Diplomarbeit, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2000.
- [THOMANEK 96] F. Thomanek: *Visuelle Erkennung und Zustandsschätzung von mehreren Straßenfahrzeugen zur autonomen Fahrzeugführung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1996.

- [THOMPSON 77] A.M. Thompson: *The Navigation System of the JPL Robot*. In *Proc. of the 5th Int. Joint Conference on Artificial Intelligence*, S. 749-757, Cambridge, Mass., 1977.
- [THORPE 90] C.E. Thorpe: *Vision and Navigation - The Carnegie Mellon Navlab*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1990.
- [THORPE ET AL. 97a] C.E. Thorpe, T. Jochem & D.A. Pomerleau: *The 1997 Automated Highway Free Agent Demonstration*. In *Proc. of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC '97*, Boston, 1997.
- [THORPE ET AL. 97b] C.E. Thorpe, T. Jochem & D.A. Pomerleau: *Automated Highways and the Free Agent demonstration*. In *Proc. of International Symposium on Robotics Research*, Oktober 1997.
- [TÖLLE 96] W. Tölle: *Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*. VDI-Fortschrittsbericht, Reihe 12, Nr. 299, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [TSUGAWA ET AL. 79] S. Tsugawa, T. Yatabe, T. Hirose & S. Matsumoto: *An Automobile with Artificial Intelligence*. In *Proc. of the 6th Int. Joint Conference on Pattern Recognition*, S. 893-895, Tokoyo, 1979.
- [VOLLMAR 94] R. Vollmar: *Rechnergestützte Fahrzeuglängsführung für das VaMoRs-P*. Diplomarbeit, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1994.
- [WANG ET AL. 00] L. Wang, T. Emura & T. Ushiwata: *A Study on DGPS-GIS Navigated Driving for an Autonomous Land Vehicle*. In *Proc. of the 7th Mechatronics Forum International Conference*, Atlanta, September, 2000.
- [WASSON 99] G.S. Wasson: *Design of Representation Systems for Autonomous Agents*. Dissertation, University of Virginia, Faculty of the School of Engineering and Applied Science, 1999.
- [WEISSER ET AL. 98] H. Weisser, P.J. Schulenberg, R. Bergholz & U. Langes: *Autonomous Driving on Vehicle Test Tracks: Overview, Motivation and Concept*. In *Proc. of the 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV '98*, S. 439-443, Stuttgart, 1998.
- [WERNER 97] S. Werner: *Maschinelle Wahrnehmung für den bordautonomen automatischen Hubschrauberflug*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1997.
- [WERSHOFEN & GRAEFE 96] K.-P. Wershofen & V. Graefe: *Situationserkennung als Grundlage der Verhaltenssteuerung eines mobilen Roboters*. In *Fachgespräch AMS*, München, Nachdruck der UniBwM, 1996.

- [WILKINS & MYERS 95] D.E. Wilkins & K.L. Myers: *A Common Knowledge Representation for Plan Generation and Reactive Execution*. In *Journal of Logic and Computation*, Bd. 5, S. 731-761, 1995.
- [WÜNSCHE 87] H.-J. Wünsche: *Bewegungssteuerung durch Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1987.
- [XIANG & LOOK 02] C.F. Xiang & L.C. Look: *Design and Analysis of GPS/SINS Integrated System for Vehicle Navigation*. In *Proc. of Air Technologie Seminar - ATS '02*, Singapore, 2002.
- [YAO & CHELLAPPA 95] Y.-S. Yao & R. Chellappa: *Model-based Vehicular Motion and Structure Estimation*. In *Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA '95*, Nagoya, 1995.
- [ZADEH 65] L.A. Zadeh: *Fuzzy Sets*. In *Information and Control*, Bd. 8, S. 338-353, 1965.
- [ZAPP 88] A. Zapp: *Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 1988.
- [ZINKL 86] W. Zinkl: *Servo-gesteuertes Fahrzeug der Hochschule der Bundeswehr Neubiberg - Hinweise zum Betrieb der Steuerung*. Ingenieurbüro Wolfgang Zinkl GmbH, Wolfratshausen, Juni 1986.
- [ZOMOTOR 91] A. Zomotor: *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. In Reimpell (Hrsg.): *Vogel Fachbuch: Kraftfahrzeugtechnik*, 2. Auflage, Vogel-Verlag, Würzburg, 1991.