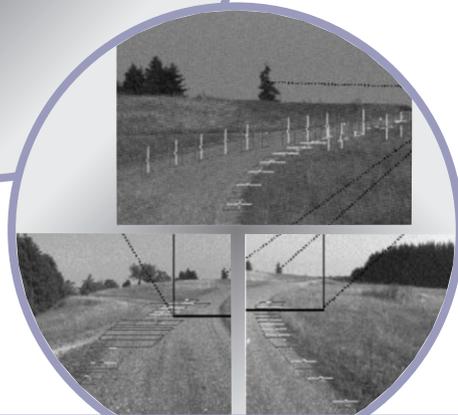
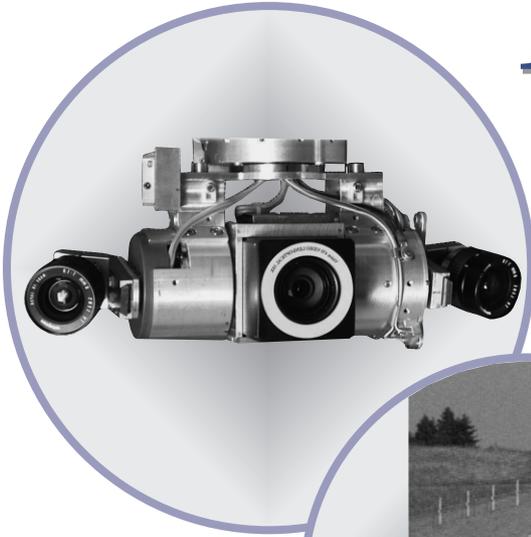


# Fahrzeuge lernen sehen



## 25 Jahre Forschung und Lehre Ernst D. Dickmanns

Professor für Steuer- und Regelungstechnik  
an der Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik

1. Oktober 1975 - 31. Januar 2001  
Neubiberg, Oktober 2001



# Filmsequenzen

## Fahrzeuge lernen sehen

Bitte auf die blau gekennzeichneten Zeilen oder auf den Hinweis (blauer Textblock) im entsprechenden Beitrag auf den folgenden Seiten klicken.

		Seite
<i>Film &lt;Self Drive Van&gt; from BBC ('Tomorrow's World', ~4 minutes)</i>	(1988)	26
<i>Film &lt;Maschinen lernen Sehen&gt; (~15 minutes, engl. version)</i>	(1995)	39
<i>Film &lt;Wiesel 2&gt; (~1 minute)</i>	(1999)	55
<i>Film &lt;Stop in front of ditch&gt; (~1 minute, no sound)</i>	(2000)	61
<i>Film &lt;Philip Morris Preis '97&gt; (~3 minutes, narration in German)</i>	(1997)	67
<i>Film &lt;Autonomously Guided Vehicle&gt; (~2 minutes)</i>	(1994)	68
<i>Film &lt;HACC-day&gt; (~1 minute)</i>	(1999)	73
<i>Film &lt;HACC-night&gt; (~1 minute)</i>	(1999)	73
<i>Film &lt;Helicopter Landmark Navigation&gt; (~4 minutes)</i>	(1997)	81
<i>Film &lt;Turn-off VaMoRs_EMS&gt; (~2 minutes, no sound)</i>	(2000)	91



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort</b>	7
<b>Forschungsaktivitäten 1975 – 2001</b>	
Einleitung	9
<b>Optimale Steuerungen und Regelungen</b>	
<b>Bahnoptimierung und numerische Verfahren</b>	10
Kollozierte Hermite-Approximationen 3. und 5. Ordnung	11
Grundzüge des Verfahrens	11
Anwendungen auf den dynamischen Segelflug	12
Automatische Gitteranpassung	14
Weitere Entwicklung der Kollokationsverfahren	14
<b>Reglerauslegung</b>	
Beobachterregler für mehrschleifige Eingrößensysteme	15
Digitale Beobachterregler	16
Der linear-quadratische Reglerentwurf mit Strukturvorgaben	17
<b>Dynamisches maschinelles Sehen</b>	24
<b>Der 4-D Ansatz</b>	26
<i>Film &lt;Self Drive Van&gt; from BBC ('Tomorrow's World', ~4 minutes)</i> (1988)	26
Überblick	27
Situationen zur Fallunterscheidung	29
Gemeinsame inertielle/visuelle Wahrnehmung	30
Repräsentation von Raum und Zeit	32
Das Konzept zur Gesamtsystemarchitektur für sehende autonome Fahrzeuge	35
<i>Film &lt;Maschinen lernen Sehen&gt; (~15 minutes, engl. version)</i> (1995)	39
Das Hardware-Konzept zur Bildfolgenverarbeitung	40

---

## Experimentelle Ergebnisse

<b>Der balancierte Stab, das Stab-Wagen-System (SWS)</b>	42
Beobachter oder Schätzer	43
<b>Andocken eines Luftkissenfahrzeugs (Satellitenmodell)</b>	44
Weiterentwicklung der visuellen Andockfähigkeit	46
<b>Führung von Straßenfahrzeugen</b>	47
Fahrbahnerkennung	48
Anfängliche Pionierleistungen	48
VaMoRs fährt Geschwindigkeitsweltrekord	50
Weitere Entwicklung der Fahrbahnerkennung	50
Erkennung von Querstraßen	52
Erkennung der vertikalen Oberflächenstruktur	53
<i>Film &lt;Wiesel 2&gt; (~1 minute) (1999)</i>	55
Objekterkennung	
Hindernisse auf der Fahrbahn	55
3-D-Form bei Bewegung	57
Erkennung von Straßenfahrzeugen	58
Erkennung sich bewegender Menschen	60
Erkennung von Gräben (negative Hindernisse)	61
<i>Film &lt;Stop in front of ditch&gt; (~1 minute, no sound) (2000)</i>	61
Systemarchitektur	62
Fahrzeugsteuerung	64
<i>Film &lt;Philip Morris Preis '97&gt; (~3 minutes, narration in German) (1997)</i>	67
Landmarken-Navigation <i>Film &lt;Autonomously Guided Vehicle&gt; (~2 minutes) (1994)</i>	68

Hardware-Basis	69
VaMoRs	69
VaMP	70
Architektur der verteilten Rechnersysteme	71
<i>Film &lt;HACC–day&gt; (~1 minute) &lt;HACC–night&gt; (~1 minute);</i>	<i>(1999) 73</i>
<b>Landeanflug von Flugzeugen</b>	<b>73</b>
<b>Greifen eines freifliegenden Körpers im Weltall</b>	<b>77</b>
<b>Landmarken-Navigation von Hubschraubern</b>	<b>79</b>
<i>Film &lt;Helicopter Landmark Navigation&gt; (~4 minutes)</i>	<i>(1997) 81</i>
<b>Bi- und multifokales sakkadisches Sehen</b>	<b>82</b>
<b>Stand der Gesamtentwicklung 'Dynamisches maschinelles Sehen':</b>	
Erwartungsbasiertes, Multifokales Sakkadisches Sehen (EMS-Vision)	87
<i>Film &lt;Turn-off VaMoRs_EMS&gt; (~2 minutes, no sound)</i>	<i>(2000) 91</i>
<b>Tabelle der Pionierleistungen</b> auf dem Gebiet des dynamischen maschinellen Sehens	<b>92</b>
<b>Promotionen</b>	<b>93</b>
<b>Veröffentlichungen</b>	<b>104</b>
<b>Drittmittel-Forschungsaufträge</b>	<b>117</b>
<b>Gastprofessuren und Vortragsreihen</b>	<b>119</b>

---

<b>Lehre</b>	120
Das Studium der Luft- und Raumfahrttechnik	121
Novellierung des Studienkonzeptes Ende der 90-er Jahre:	123
Technik Autonomer Systeme (TAS, geplant)	123
Lehrveranstaltungen der Professur für Steuer- und Regelungstechnik (SRT)	128

<b>Universitäre Selbstverwaltung</b>	130
Prodekan LRT	
Dekan LRT	
Gremienarbeiten	
Vizepräsident (univ.)	

<b>Anhänge</b>	
A: Zur Geschichte des Instituts für Systemdynamik und Flugmechanik	132
Die ersten Anfänge	
Der Beginn des normalen Institutsbetriebs	
Drittmittelaktivitäten	
B: Verzeichnis aller Mitarbeiter	136
C: Details zum Vorschlag Einführung einer Vertiefungsrichtung ‘Technik Autonomer Systeme’ TAS	137

# Vorwort

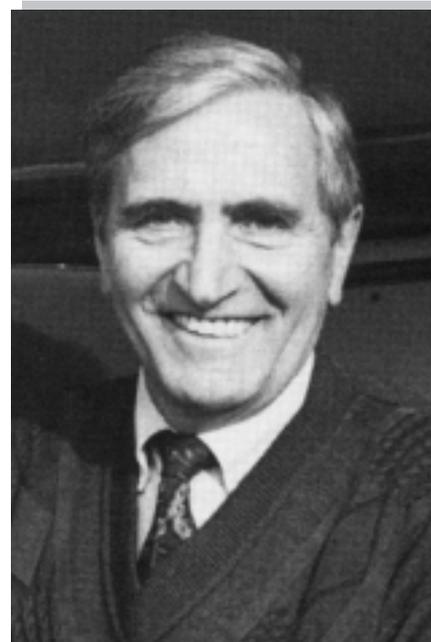
Nach einem Vierteljahrhundert Tätigkeit an der neu gegründeten Universität (anfangs 'Hochschule') der Bundeswehr München in Neubiberg soll mit diesem Büchlein ein Überblick über mein Wirken in diesem Bereich gegeben werden.

Es war eine äußerst interessante Zeit für mich und, wie ich hoffe, fruchtbar auch für die Studenten, die Mitarbeiter, speziell die wissenschaftlichen, und die Kollegen, nicht nur in der eigenen Fakultät. Mit dem Schritt in den Ruhestand geht ein Lebensabschnitt zu Ende, der durch intensiven Austausch mit jungen Menschen gekennzeichnet war; dies hat mir viel Freude bereitet.

Insbesondere das Arbeiten mit den Doktoranden zeichnet für einen forschungsorientierten Professor eine Universität aus. Wir hatten zusätzlich das Glück, dass sich mit dem maschinellen Sehen für Fahrzeuge ein völlig neuer Forschungszweig aufgetan hat. Mit der Lage der Universität an einem ausgedienten

Flugplatz mit vielen freien Flächen und Rollbahnen ergaben sich ausgezeichnete Arbeitsmöglichkeiten.

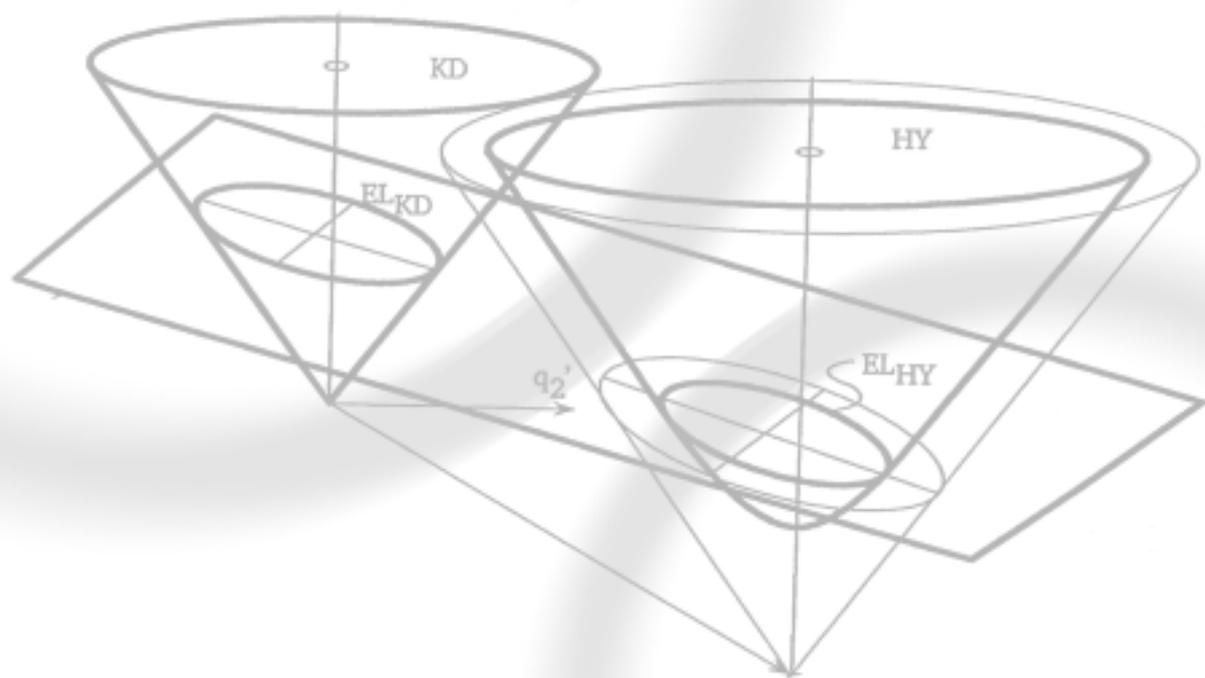
Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die - auf welche Weise auch immer - zum Gelingen unserer Vorhaben beigetragen haben. Dies sind vor allem die Mitarbeiter (s. S. 136) und die Partner bei den Drittmittelgebern (s. S. 117/118). In der Drittmittelverwaltung gilt mein Dank insbesondere Frau Theil für die kompetente Betreuung. Herrn K.D. Otto, der als erster Mitarbeiter die Lehre über 25 Jahre weitgehend selbstständig betreut hat, danke ich dafür, dass er mir dadurch Freiraum für die Forschung schuf. Frau Madeleine Gabler war über 20 Jahre als Institutssekretärin die 'Seele des Institutslebens'; sie hat zur Erstellung dieses Berichtes wesentlich beigetragen. Ihr gelten mein besonderer Dank und Anerkennung. Schließlich war das gute Arbeitsklima mit Kollegen Reiner Onken in den letzten 16 Jahren ein guter Nährboden für die Entwicklung technischer kognitiver Systeme.



**Ernst D. Dickmanns**

In diesen eineinhalb Jahrzehnten war die UniBwM in Neubiberg als mit führend auf dem Gebiet 'autonomer mobiler Systeme' weltweit anerkannt. Den Nachfolgern werde ich mit Rat und Tat gerne weiterhin zur Verfügung stehen.

$$\Sigma - 2\sqrt{\Pi} > \Sigma_0 - \frac{1}{\Delta\mu}$$



$$(\mu_1 c_2 + \mu_2 c_1 - 2\mu_3 c_3)$$

# Forschungsaktivitäten 1975 – 2001

---

## Einleitung

Wie bei einer völlig neu gegründeten Einrichtung, für die selbst die Gebäude noch erstellt werden mussten, nicht anders zu erwarten, waren sowohl in der Lehre wie in der Forschung die ersten Jahre gekennzeichnet durch den Aufbau der Mitarbeiterschaft sowie der Anlagen und Geräte. Das einzige, was bei Antritt der Professur im Oktober 1975 für Forschungszwecke einsatzbereit zur Verfügung stand, war ein zentraler Digitalrechner.

Hiermit war es möglich, einige bei der DFVLR begonnene Arbeiten auf dem früheren Forschungsgebiet der Flugbahnoptimierung und zugehöriger numerischer Verfahren fortzuführen. Entsprechende Rechenprogramme wurden als einsatzbereite Lochkartenstapel (!) mitgebracht.

Als Schwerpunkt für neuere Forschungsarbeiten an der damaligen 'Hochschule der Bundeswehr' war von Anfang an ein neues Themengebiet ins Auge gefasst worden: Das Rechnersehen in Echtzeit.

Dies war zu jenem Zeitpunkt keine gängige Zielsetzung. Sie entstand vor dem Hintergrund der knapp zweijährigen Erfahrung als agierender Zentrumsleiter der DFVLR Oberpfaffenhofen mit drei Instituten und dem Satelliten-Kontrollzentrum, die je einen ausgesprochenen Schwerpunkt auf dem Gebiet der Fernerkundung von Flugzeugen und Satelliten aus hatten; aus den persönlichen fachlichen Kenntnissen aus eineinhalb Jahrzehnten Erfahrung auf den Gebieten der Flugmechanik, der Systemdynamik und der Steuer- und Regelungstechnik war die Anwendung bei dynamischen Systemen vorgezeichnet. Es war klar zu sehen, dass damals eine flexible Automatisierung vieler Prozesse an der mangelnden Breite der Situationserfassung scheiterte.

Die Fortschritte in der off-line-Bildverarbeitung bei der Fernerkundung ließen erkennen, dass mit der zu erwartenden weiteren rapiden Steigerung der Rechenleistungen in nicht allzu ferner Zukunft Bildfolgen so schnell ausgewertet werden könn-

ten, dass man dynamische Prozesse damit in ähnlicher Weise zu steuern in der Lage sein würde, wie es Lebewesen mit ihrem Gesichtssinn vormachen.

Wie weit in die Zukunft gegriffen dies war, erhellt aus der Tatsache, dass zu jener Zeit gerade die 16-bit-Prozeßrechner eingeführt wurden; Mikrorechner waren auf Spezialanwendungen beschränkte 4-bit-Prozessoren. Das Volumen von Fernsehkameras wurde nach Litern gerechnet, das der Rechner nach 'Schrank'-Einheiten. Allerdings waren die Entwicklungstendenzen für Sensoren und Rechner mit der Mikro-Miniaturisierung im Bereich der Elektronik klar erkennbar.

Dem verfolgten Forschungskonzept lag also der Gedanke zugrunde, die Optimierungsaktivitäten abzurunden und auslaufen zu lassen, und ohne Zeitdruck den Einstieg in das neue Thema des dynamischen maschinellen Sehens zu finden. In dieser Folge werden deshalb auch die Forschungsaktivitäten beschrieben.

# Optimale Steuerungen und Regelungen

---

Der überwiegende Teil früherer Forschungsarbeiten lag im Bereich der Bestimmung optimaler Flugbahnen für Luft- und Raumfahrzeuge sowie der dazu notwendigen nu-

merischen Verfahren auf Digitalrechnern. Mit den Lehraufgaben der Professur für Steuer- und Regelungstechnik traten auch Fragen der Reglerauslegung, insbesondere op-

timaler Regelungen in den Vordergrund; diesen Aktivitäten wird ein eigener Absatz gewidmet.

## Bahnoptimierung und numerische Verfahren

Zu diesem Themenkreis wurde, angeregt vom früheren Leiter des Instituts für Dynamik der Flugsysteme der DFVLR, G. Brüning, vom Autor eine Abteilung aufgebaut, die eng mit dem Institut für Numerische Mathematik der TU München (Prof. Bulirsch und Mitarbeiter) zusammenarbeitete. Dank der engen Verbindung von fundierter Entwicklung numerischer Verfahren und praxisnahen Anwendungen konnte auf diesem Gebiet international eine anerkannte Stellung erarbeitet werden. Die von Bulirsch entwickelte Mehrziel-Methode<sup>1</sup> zur Lösung von Randwertproblemen der Variationsrechnung liegt bis heute bezüglich Genauigkeit, auch bei Problemstellungen mit diskontinuierlichen Lösungen und Zustandsraum- wie Steuerungs-Beschränkungen, auf einer Spitzenposition. Nachteilig sind die hohen Rechenzeiten und der beschränkte Einzugsbereich der Konvergenz bei der indirekten Formulierung mit adjungierten Gleichungen, die dem Verfahren zugrundeliegt. Homotopieverfahren zur schrittweisen Annäherung neuer Lösungen aus bekannten alten erfordern gelegentlich enormen Rechenaufwand. Aus diesem Grund war man auf der Suche nach ergänzenden Verfahren, die einen großen anfänglichen Konvergenzbereich haben und die ausgehend von ingenieurmäßig angebbaren praktikablen Steuerverläufen die Verläufe sowohl der Zustands- wie der adjungierten Variablen zu berechnen erlauben und die Bahn in die Nähe der optimalen Bahn bringen, so dass die Mehrzielmethode

mit wenigen zusätzlichen Iterationen die sehr genaue Bahn ermitteln konnte.

Anfänglich war zu diesem Zweck eine Modifikation des Gradientenverfahrens, die min-H Methode, entwickelt worden<sup>2</sup>, die das zu Beginn der Iteration robuste Gradientenverfahren<sup>3</sup> um Terme höherer Ordnung aus der Theorie des Maximumprinzips ergänzt und damit zu wesentlich verbessertem Konvergenzverhalten in der Nähe des Optimums beiträgt. Hierbei werden die adjungierten Variablen der Variationsrechnung aus zweckmäßig überlagerten Einflussfunktionen bezüglich der Erfüllung der Randbedingungen bei dem Gradientenverfahren aufgebaut. Die Methode, die Steuerverläufe über der Zeit ver-

---

<sup>1</sup>Bulirsch, R.: Die Mehrziel-Methode zur numerischen Lösung von nichtlinearen Randwertproblemen und Aufgaben der optimalen Steuerung, Carl-Cranz-Gesellschaft, 1971

<sup>2</sup>Dickmanns, E.D.: Optimierung von Flugbahnen durch iterative Anwendung des Maximumprinzips (min-H-Methode), 1967

<sup>3</sup>Bryson, A.E.; Ho, Y.-C.: Applied Optimal Control, 1975

wendet und die die Zustandsgleichungen vorwärts- und die adjungierten Gleichungen zeitlich rückwärts integriert, hat sich grundsätzlich bewährt; die Behandlung von Diskontinuitäten ist allerdings recht aufwendig.

Ein parallel verfolgter Weg zur Erzielung näherungsweise optimaler Bahnen ohne adjungierte Differentialgleichungen war die Umformulierung in ein Problem der (quasistatischen) nichtlinearen Optimierung<sup>1</sup> unter Verwendung der hierfür vorhandenen Programmpakete (wie z.B. Sequential Quadratic Programming SQP). Jedoch ist auch dieser Ansatz recht rechenzeitintensiv. Der Autor dieser Zeilen hat deshalb nach einem Verfahren gesucht, das die aufwendige Integration der Differentialgleichungen möglichst abkürzt; dabei wurde zunächst die indirekte Formulierung, wie sie auch der Mehrzielmethode zugrunde liegt, akzeptiert, um einen einfachen Übergang auf dieses Verfahren zur abschließenden genauen Konvergenz zu erleichtern. Dieses 1972 im Rahmen des Postdoctorate Research Associateship bei der NASA

konzipierte Verfahren, das wegen der Management-Tätigkeit bei der DFVLR nach Rückkehr aus den USA zunächst liegen geblieben war, wurde als erstes Forschungsthema an der HsBwM wieder aufgegriffen.

### **Kollozierte Hermite-Approximationen 3. und 5. Ordnung (CHAP35)**

Die zunächst erstellte Version mit fest vorgewählten Stützpunkten (PI-THOPA<sup>2</sup>) zeigte eine enorme Geschwindigkeitssteigerung in der Konvergenz im Vergleich zu allen anderen bekannten Verfahren, jedoch hing die Güte der Konvergenz von der Wahl der Stützpunkte ab, die zur Steigerung der Konvergenzgeschwindigkeit nicht zu hoch gewählt werden sollte. Dadurch stellen sich Probleme in Bereichen schneller Zustandsänderungen ein. Dies deutete auf Vorteile einer automatischen Gitteranpassung hin. Im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU München wurde diese Thematik erstmals untersucht, mit einem sehr vielversprechenden Ergebnis<sup>3</sup>; nun wurden neben der schnellen Konvergenz auch erstaunlich gute Ge-

naugigkeiten erzielt, die für viele praktische Anwendungen bereits hinreichen.

### **Grundzüge des Verfahrens**

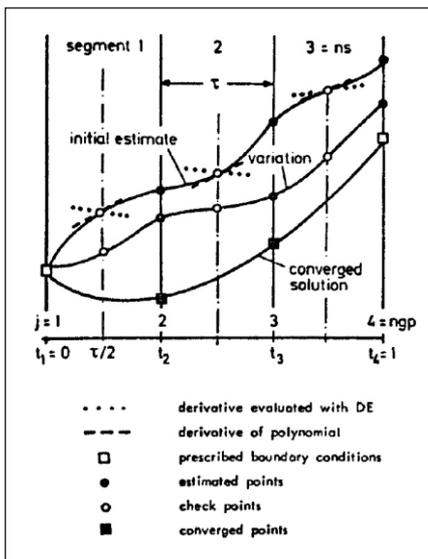
Der auf 1 normierte Bereich der unabhängigen Variablen wird in  $m$  Segmente unterteilt, so dass innerhalb jeden Segmentes alle Funktionsverläufe der Zustands- und der adjungierten Variablen sinnvoll, zumindest grob, durch ein Polynom dritter Ordnung angenähert werden können. Die bekannten Randwerte werden vorgegeben und fixiert; die unbekannt Randwerte und die Gitterpunkte an den Rändern der Segmente als Stützstellen müssen sinnvoll geschätzt werden, ohne besseres Wissen durch lineare Interpolation zwischen den Randwerten bei 0 und 1. Mit den Differentialgleichungen, die das Problem beschreiben, kann nun die Neigung der Funktionen in den Gitterpunkten bestimmt werden; damit sind diese Differentialgleichungs-Nebenbedingungen in den Stützpunkten stets erfüllt. Aus den Stützwerten und den Neigungen am linken und rechten Rand eines jeden Segments kann für jede Variable ein Polynom

<sup>1</sup>Kraft, D.: TOMP-FORTRAN-Modules for Optimal Control Calculations, 1991

<sup>2</sup>Well, K.; Dickmanns, E.D.: Approximate Solution of Optimal Control Problems Using Third Order Hermite Polynomial Functions, 1974

<sup>3</sup>Maier, M.: Ein Kollokationsverfahren zur Lösung von Zweipunktrandwertproblemen, 1979

dritter Ordnung als Hermite-Approximation berechnet werden. Ermittelt man für beliebige segmentinterne Zeitpunkte die Funktionswerte  $x$  dieser Näherung und ihre zeitlichen Ableitungen aus dem Näherungspolynom, so werden diese Ableitungen in der Regel von den mit den Differentialgleichungen (Dgl'n) aus  $x$  berechneten Ableitungen abweichen. Gemäß Bild 1, in dem für zwei Segmente und eine



**Bild 1:**  
Grundidee des Verfahrens zur numerischen Lösung von Randwertproblemen mittels kollierter Hermite-Approximation; Testpunkte bei  $\tau/2$

Variable ein solches Funktionenpaar dargestellt ist, wird die Differenz der Abweichungen in der Neigung etwa im Bereich der Segmentmitte am größten; dieser Punkt wird daher als Testpunkt genommen, um hier durch systematische Variation der Gitterwerte diese Differenz zu Null zu machen.

Ist die Summe der Quadrate aller Differenzen über alle Variablen und alle Segmente gleich Null (bzw. kleiner als ein Schwellwert), so ist das Verfahren konvergiert und man hat einen Kandidaten für eine Lösung des Problems. Es muss nun getestet werden, ob auch überall im Zwischenbereich der genäherte Funktionsverlauf die Differentialgleichungen hinreichend gut erfüllt. Es hat sich als guter Test hierfür herausgestellt, der mit wenig Rechenaufwand bewerkstelligt werden kann, dass die zusätzliche Interpolation eines Polynoms fünfter Ordnung über zwei Segmente mit den vorliegenden Gitterpunktwerten und den daraus ermittelten Ableitungen aus den Dgl'n. in den Testpunkten in Segmentmitte einen nahezu vollwertigen Ersatz für den

genauen Test mit dem Integral bei einem Bruchteil des Aufwandes liefert. Aus der Größe dieser Diskrepanzen an den Testpunkten kann sogar sinnvoll auf die Anzahl der einzuschubenden zusätzlichen Stützpunkte geschlossen werden [Dickmanns, 80]. Mit diesem Algorithmus wurden bei einer breiten Anwendungspalette hervorragende Ergebnisse erzielt; die Rechenzeiten sind im Mittel um eine Größenordnung kleiner als bei anderen bekannten Verfahren. Eine neu mit diesem Algorithmus gelöste Problemstellung des zeitoptimalen Segelflugs durch unterschiedliche Aufwindfelder soll im folgenden Abschnitt kurz diskutiert werden.

## Anwendung auf den dynamischen Segelflug

De Jong<sup>1</sup> präsentierte auf einer Tagung, auf der wir unseren neuen Algorithmus vorstellten, ein Problem der Flugmechanik in Vertikalwindfeldern, zu dem er mit den von ihm eingesetzten Gradientenverfahren keine erschöpfende Lösung über einen sinnvollen Parameterbereich erzielen konnte; im unteren und im

<sup>1</sup>Pierson, B.L.; de Jong, J.L.: Cross Country Sailplane Flight As A Dynamic Optimization Problem, 1978

oberen Parameterbereich lagen unterschiedliche Lösungen vor. Er regte eine Untersuchung mit unserem Verfahren an, die wir auch durchführten. Dabei ergab sich, dass in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Aufwindfeldes im Verhältnis zur Bahnschwingungs-Wellenlänge bei der McReady-Geschwindigkeit unterschiedliche Klassen von optimalen Steuerungen bestehen. In einem Überlappungsbereich gibt es zwei lokale

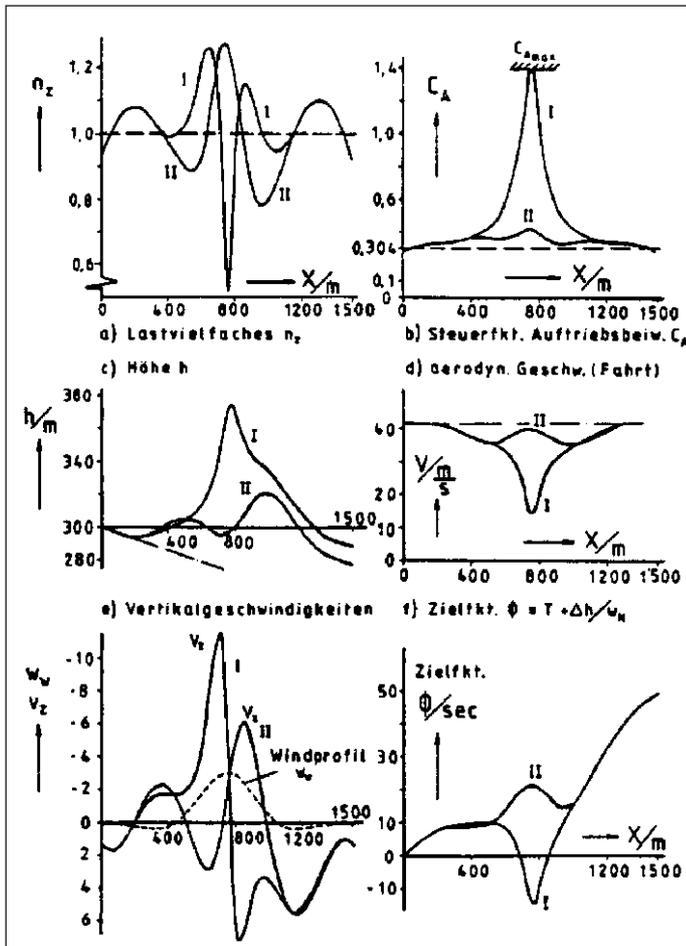


Bild 2:  
Zeitoptimaler dynamischer Segelflug durch ein Vertikalwindfeld (unten links gestrichelt); zwei verschiedene gleichwertige Bahnen I und II ( $n_z =$  Lastvielfaches zur Bahnsteuerung über den Auftriebsbeiwert  $c_A$ ). I vergibt Geschwindigkeit zugunsten von Höhe; II umgekehrt [aus Aero-Revue 2/84]

Optima, die beim Wellenlängenverhältnis 1 den gleichen Wert der Zielfunktion liefern. Bild 2 aus [Dickmanns, 84] gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Lösungen für diesen Fall. Aus den Teilbildern b und d ist ersichtlich, dass bei dem Lösungstyp I, der für größere Windfelder global optimal ist, kinetische Energie gegen Höhe getauscht wird. Das Flugzeug verbleibt bei großen Auftriebsbeiwerten  $C_A$  länger im Aufwindbereich. Beim Typ II muss im Aufwindmaximum ein großes Normalkraftlastvielfaches bei relativ hoher Geschwindigkeit gezogen werden, um damit Energie auf das Fahrzeug zu übertragen. Diese Art Steuerung ist bei kürzeren Windfelddurchmessern global optimal.

Die Iteration wurde mit den Werten des stationären Geradeausflugs und der Windfeldamplitude Null mit einem groben Gitter begonnen; die Windfeldamplitude wurde dann systematisch bis zum gewünschten Wert erhöht, wobei das Verfahren automatisch im Bereich der schnellen Windfeldänderung neue Stützpunkte einschob.

## Automatische Gitteranpassung

Diesen Prozess der automatischen Gitteranpassung zeigt Bild 3 für das Beispiel des wärmeoptimalen Abbremsens einer Rückkehrkapsel vom Mond (Typ Apollo) beim Eintauchen in die Erdatmosphäre. Den Verlauf der Gütefunktion  $M$  über der Zahl der Iterationen zeigt Bild 3a; aus Bild 3b ist zu ersehen, dass die neuen Stützpunkte in Bahnbereichen schneller zeitlicher Änderungen eingeschoben wurden.

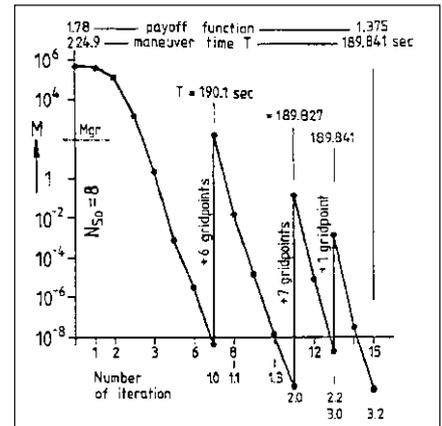
## Weitere Entwicklung des Kollokationsverfahrens

Der Algorithmus CHAP35 beruht auf der indirekten Formulierung und erfordert die Ableitung und Kodierung der adjungierten Gleichungen sowie die Schätzung von Anfangswerten zum Start der Iteration; vor allem für die adjungierten Variablen bereitet dies häufig Schwierigkeiten. Am Institut für Mathematik der TU München wurde deshalb eine Variante entwickelt, die ausschließlich von geschätzten Steuerungsverläufen ausgeht und im Lauf der Iteration Näherungswerte für die adjungierten Variablen<sup>1</sup> liefert.

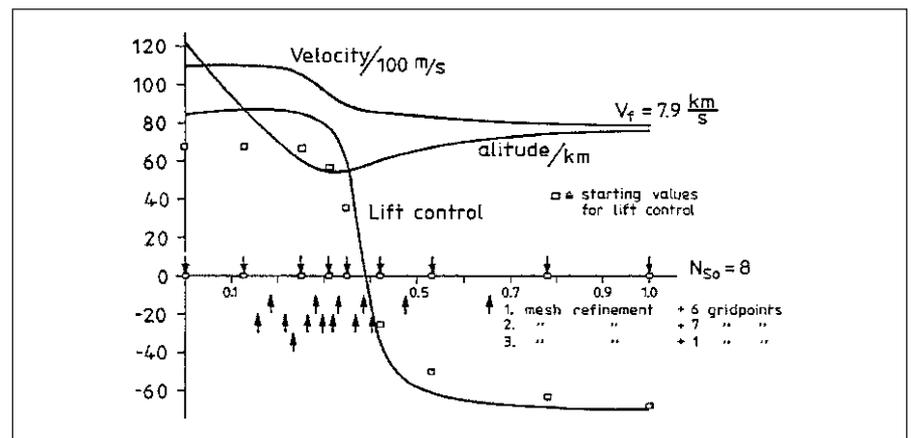
Das Verfahren gestattet auch die Handhabung von Diskontinuitäten und Zustandsraumbeschränkungen und ist ebenfalls um eine Größenordnung schneller als die Mehrzielmethode. Dieser direkte Kollokationsalgorithmus DIRKOL stellt im Moment wohl die leistungsfähigste Software zur Lösung von nichtlinearen Problemen der optimalen Steuerungen dar.

<sup>1</sup>von Stryck, O.: Numerische Lösung optimaler Steuerungsprobleme: Diskretisierung, Parameteroptimierung und Berechnung der adjungierten Variablen, 1995, Dissertation TUM

**Bild 3:**  
Zur automatischen Gitteranpassung bei CHAP35: Wiedereintritt in die Erdatmosphäre aus Mondtransferbahn (Typ Apollo-Kapsel)



**Bild 3a) Konvergenzmaß  $M$  im Iterationsverlauf**



**Bild 3b) Steuer- und Zustandsvariablen mit Gitterpunktverteilung**

# Reglerauslegungen

Auf diesem klassischen Gebiet der linearen Regelungstheorie wurden zwei Themenkreise bearbeitet:

1. Die Auslegung von Beobachter-Reglern mit Frequenzbereichsverfahren und 2. die Auslegung von linearquadratischen optimalen Zustandsreglern unter Beachtung von Eigenwert-/Eigenvektor-Vorgaben.

## Beobachterregler für mehrschleifige Eingrößensysteme

Betrachtet man die Struktur der im Zeitbereich entwickelten Zustandsregler mit vollständigen oder reduzierten Beobachtern (Bild 4), so ergibt sich eine kondensierte Darstellung des Informationsflusses mit Hilfe von Übertragungsfunktionen

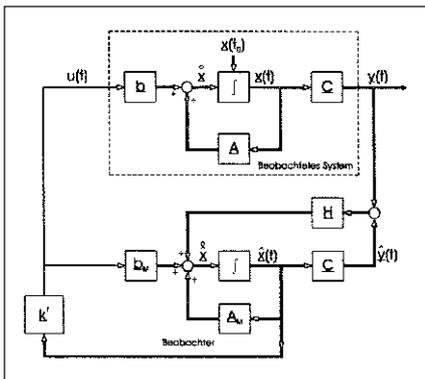


Bild 4: Zustandsregler mit Beobachter

Bild 5: Beobachterregler im Frequenzbereich (s. Text)

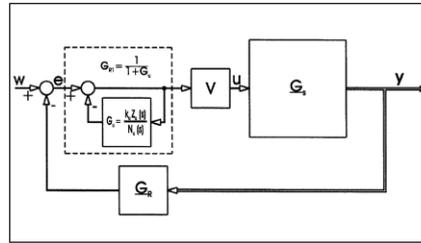


Bild 5a) Beobachterregler (PO-Regler) im Bildbereich

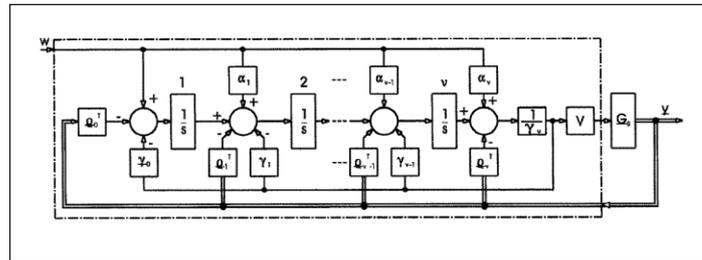


Bild 5b) Realisierung des PO-Reglers mit n Integratoren

für die Ausgangsgrößen gemäß Bild 5a; neben den Ausgangsgrößen wird hierbei auch die Steuergröße über dynamische Glieder zurückgekoppelt. Durch Blockschaltbild-Manipulationen erkennt man sofort, dass es sich hierbei um Regler mit zwei Freiheitsgraden handelt. Bild 5b zeigt den entsprechenden Regel-

kreis mit Einheitsrückführung. Die Beobachterbedingung äußert sich hier in der Forderung, dass sich im geschlossenen Kreis die durch den Beobachter eingeführten Eigenwerte in der Führungsübertragungsfunktion herausheben. Die Beobachtbarkeits-Bedingungen sind durch die faktorisierten Zähler- und Nennerpolynome der einzelnen Übertragungsfunktionen gegeben. Kürzungen oder Fast-Kürzungen von

Zähler- und Nennertermen entsprechen nicht vorhandener oder schlechter Beobachtbarkeit von dieser

Ausgangsgröße aus; Fast-Kürzungen sind bei der Partialbruchzerlegung für die relativ kleinen Amplitudenanteile dieser Eigenbewegungsformen verantwortlich. Im normal konditionierten Fall mit der Nennerübertragungsfunktion vom Grad n ergibt sich als Synthese-Bedingung für den Beobachterregler bei Rückkopplung von nur einer Ausgangsgröße die erforderliche Reglerordnung n-1.

Lassen sich  $n/2$  Ausgangsgrößen messen und rückkoppeln, so kann der Reglergrad bei geschickter Wahl der Nennerpolynome von  $G_U$  und  $G_R$  auf die Ordnung 1 abgesenkt werden.

Dazwischen liegen viele Möglichkeiten der Auslegung von Beobachterreglern bezüglich der verwendeten Ausgangsgrößen. Weitere Freiheitsgrade der Reglerauslegung sind die Wahl der (Beobachter-) Reglerpole, die in der Führungsübertragungsfunktion des geschlossenen Kreises nicht mehr aufscheinen, aber bezüglich Störgrößen natürlich wirksam sind, sowie die festzulegenden Eigenwerte des geschlossenen Kreises. Um die Reglerverstärkungen klein zu halten, sollten die Reglerpole nicht zu groß gewählt werden (etwa im Bereich der gewünschten Streckenpole) und die Streckenpole des geschlossenen Kreises sollten nicht allzu viel größer als die der offenen Strecke gewählt werden. Für die resultierende Synthesebedingung wurde eine einfache Matrixschreibweise mit den Koeffizienten der Zähler- und Nennerpolynome abgeleitet; die Regler-

synthese kann damit auf den Aufruf einer Standardroutine zur Lösung eines linearen Gleichungssystems reduziert werden, das die Polynomkoeffizienten in Form eines typischen Fischgrätenmusters enthält [Dickmanns, 85].

Die Realisierung des Beobachterreglers im Zeitbereich ist sehr einfach und erfordert eine Anzahl von Integratoren, die der Ordnung des Reglers entspricht, bei  $n/2$  Messgrößen also genau einen einzigen. Durch analytische Integration im Bildbereich (Divisionen durch  $s$ ) können aufräuhende Differentiationen von verrauschten Messsignalen vollständig vermieden werden; sie werden durch gleichzeitige gewichtete Integration der Führungsfunktion, der gemessenen Ausgangsgrößen und der Steuergröße ersetzt. Bild 5b zeigt das entsprechende Blockdiagramm. Soll der geschlossene Regelkreis keinen statischen Fehler aufweisen, so kann dies wie im Fall des PI-, PID-Reglers durch Aufintegration des Regelfehlers erreicht werden. Wegen der strukturellen Ähnlichkeit der Beobachterregler zu den klassischen P-, PD-, PI- und

PID-Reglern, die man als Untermenge dieses allgemeineren Reglertyps betrachten kann, wurden die Kurzbezeichnungen PO- (O von englisch observer) und PIO-Regler vorgeschlagen.

### Digitale Beobachterregler

Die gleiche Vorgehensweise wie bei analogen Systemen lässt sich auch bei digitalen Systemen anwenden. Geht man von der  $z$ -Transformation aus, so erhält man auf natürliche Weise digitale Beobachterregler, die mit zurückliegenden Daten entsprechend der Ordnung des Reglers arbeiten; bei einer Eingrößerrückkopplung in einem System  $n$ -ter Ordnung müssen also  $n-1$  alte Werte der Führungsfunktion, der Messgröße und der Steuergröße gespeichert werden, um die aktuelle Steuergröße berechnen zu können.

Geht man von der zusätzlichen bilinearen ( $w$ -, oder der modifizierten  $\beta$ -) Transformation gemäß der Beziehung

$$\beta = 2/T^*(z-1)/(z+1)$$

aus, so entspricht  $1/\beta$  der digitalen

Trapezintegration und man kann die analoge Realisierung des Beobachterreglers unmittelbar auf den digitalen Fall übertragen, wenn die s-Übertragungsfunktion mit den bekannten Methoden in eine  $\beta$ -Übertragungsfunktion transformiert wurde. Bei Anwendung der Trapezformel zur Integration kann auch hier analytisch integriert und damit Bild 5b ohne jede Änderung für die digitale Regelung übernommen werden; die sich ergebenden Koeffizienten sind natürlich verschieden von den analogen gemäß dem Unterschied in den Polynomkoeffizienten zwischen s- und  $\beta$ -Übertragungsfunktion. Auch muss beachtet werden, dass im  $\beta$ -Bereich der Zählergrad grundsätzlich gleich dem Nennergrad ist. Bei dieser  $\beta$ -Realisierung werden im Gegensatz zur Realisierung im z-Bereich keine alten Funktionswerte (außer jeweils dem letzten für das Trapezintegral) benötigt; dafür gibt es eine gemäß der Ordnung des Reglers zusätzliche Zahl an Variablen. Da nur integriert wird, wirken sich hochfrequente Signalstörungen weniger schädlich auf das geregelte System aus.

## Linear-quadratischer Reglerentwurf mit Strukturvorgaben

Bei Mehrgrößensystemen besteht im Rahmen einer Reglerauslegung die Möglichkeit, die Regelfunktionen auf mehrere Steuergrößen aufzuteilen. Die sinnvolle Ausnutzung dieses Vorteils ist das eigentliche Hauptproblem beim Reglerentwurf für solche Systeme. Der Aufwand wird gegenüber der Behandlung von Eingrößensystemen erheblich größer, wenn man alle zusätzlichen Freiheitsgrade vollständig ausnutzen will. Die Aufschaltung der Reglersignale auf die verschiedenen Stellglieder hängt allerdings von der Zielsetzung ab. So steht z.B. bei einer angestrebten Lösung mit minimaler Gesamtstellenergie die möglichst gleichmäßige Aufteilung im Vordergrund. Will man dagegen eine bestimmte Strukturforderung erfüllen, etwa eine Entkopplung, ist eine unter Umständen völlig konträre Steuergrößengewichtung zu wählen. Andere typische Anforderungen betreffen z.B. die Störgrößenunempfindlichkeit, die Ausregelgenauigkeit oder die Robustheit gegenüber Streckenparameteränderungen.

Es gibt viele sehr unterschiedliche Reglerentwurfsverfahren für Mehrgrößensysteme, die in den letzten 40 Jahren entwickelt worden sind und in der Literatur einen großen Umfang einnehmen.

Man kann sie prinzipiell in zwei Gruppen einteilen: in die direkten und in die indirekten Methoden. Bei den direkten Verfahren werden die Anforderungen für den geschlossenen Regelkreis zunächst quantitativ formuliert. Aufgrund dieser Spezifikationen wird dann die Reglersynthese durchgeführt, d.h. es wird das Regelgesetz unmittelbar analytisch berechnet. Bei den indirekten Verfahren wird dagegen ein Gütekriterium oder ein Kostenfunktional definiert, das eher qualitativen Charakter hat. Ein anschließender Optimierungsprozess in Form einer Minimierung führt dann auf indirektem Wege zum Regler.

Ein sehr bekanntes und weit verbreitetes direktes Verfahren für lineare zeitinvariante Systeme stellt der sogenannte Eigenwert/Eigenvektor

(EW/EV)-Entwurf dar. Hierbei wird der umkehrbar eindeutige Zusammenhang zwischen den EW der Systemmatrix mit ihren dazugehörigen Rechtseigenvektoren (REV) und der konstanten vollständigen Zustandsrückführung ausgenutzt. Der große Vorteil bei diesem Verfahren besteht darin, dass man die Eigenbewegungsformen in den einzelnen Übertragungspfaden direkt beeinflussen kann. Es können z.B. unerwünschte Eigenbewegungsformen in bestimmten Zustandsgrößen unterdrückt werden, andere dagegen zugunsten einer effektiven Steuerung besonders hervorgehoben werden. Beim Entwurf von Flugreglern ist diese Methode besonders häufig anzutreffen. Die Bewertung von Stellenergie und Bewegungsenergie in den Zustandsgrößen ist wie bei fast allen direkten Verfahren auch im EW/EV-Entwurf nicht enthalten; ebenso werden Empfindlichkeits- oder Robustheitskriterien nicht berücksichtigt.

Ganz anders verhält es sich dagegen beim Einsatz von indirekten Verfahren, deren Hauptvertreter der linear-quadratische Entwurf ist. Dieser ist

besonders dann geeignet, wenn auf Stabilitätsreserve und Parameterunempfindlichkeit Wert gelegt werden muss. Diese beiden Qualitätsmerkmale sind wohl mit Recht die wesentlichen Argumente dafür, dass der Riccati-Entwurf bis zum heutigen Tag in der Praxis seine entscheidende Bedeutung beibehalten hat. Insbesondere führt sein Einsatz bei Vorhandensein von gewissen Ungenauigkeiten in der Systemmodellierung und geringfügigen Nichtlinearitäten oft noch dort zum Erfolg, wo ein direkter Ansatz versagen würde. Der konventionelle Riccati-Entwurf beinhaltet die Minimierung eines quadratischen Gütekriteriums, in dem die Steuer- und Zustandsgrößenenergien durch entsprechende Gewichtungsmatrizen  $R$  und  $Q$  als Kosten bewertet werden. Er liefert einen vollständigen Zustandsregler, der als das Ergebnis eines Minimierungsproblems optimal genannt wird. Für den Fall der vollständigen konstanten Zustandsrückführung ist lediglich eine quadratische Matrizenungleichung, die bekannte algebraische Riccati-Gleichung, zu lösen, die eine eindeutige positiv definite Lösung besitzt.

Die Motivation für die eigenen Forschungsarbeiten 'Linear-quadratischer Entwurf mit Strukturvorgaben' [Otto, 90] war in erster Linie darin begründet, dass es sicherlich unbefriedigend ist, zwischen der direkten EW/EV-Festlegung und dem indirekten linear-quadratischen Entwurf entscheiden zu müssen, um sich somit entweder die Strukturwünsche oder Unempfindlichkeitsanforderungen erfüllen zu können. Man möchte vielmehr die Vorteile beider Methoden gleichzeitig ausnutzen. Zudem bestand auch der Wunsch, die sogenannten optimalen Systeme zu charakterisieren, die das Ergebnis einer mathematischen Minimierungsaufgabe sind. Dazu gehören im wesentlichen die beiden theoretischen Begriffe 'Inverses Problem' und 'Redundanzproblem'. Beim 'Inversen Problem' wird nach notwendigen und hinreichenden Bedingungen für die Optimalität gesucht. Das 'Redundanzproblem' beinhaltet die Eliminierung der überzähligen Parameter im Gütekriterium.

Die gemeinsame Basis für die EW/EV-Festlegung und den linear-

quadratischen Entwurf ist gegeben, da in beiden Fällen eine konstante vollständige Zustandsrückführung  $K$  als Resultat geliefert wird. Der fundamentale mathematische Zusammenhang zwischen den EW und EV der Systemmatrix für den geschlossenen Regelkreis und der Riccati-Lösung ist über das dazugehörige Hamilton-System gegeben. Das Hamilton-System entsteht, wenn man das Zustandsmodell mit den aus der Variationsrechnung bekannten adjungierten Variablen erweitert. Die Riccati-Lösung kann dann mit den REV der zum System gehörenden Hamilton-Matrix gebildet werden und damit auch der Zustandsregler. Obwohl die mathematische Beschreibung klar und einfach ist, entsteht bei der praktischen Ausnutzung das eigentliche Hauptproblem: Es müssen die Gewichtungsmatrizen im Gütekriterium in die Hamilton-Matrix eingeschrieben werden, bevor das EW/EV-Problem gelöst werden kann. Damit geht zunächst die Transparenz zwischen den Gewichtungskoeffizienten und den gewünschten Struktureigenschaften vollkommen verloren.

Eine Möglichkeit, diesen Mangel

zu beseitigen, besteht darin, die EW einzeln oder paarweise mit Hilfe hintereinander ausgeführter Riccati-Entwürfe festzulegen. Die sukzessive EW-Festlegung erfolgt in der kanonischen Blockdiagonalform und erlaubt, dass auch konjugiert komplexe EW miteinbezogen werden können.

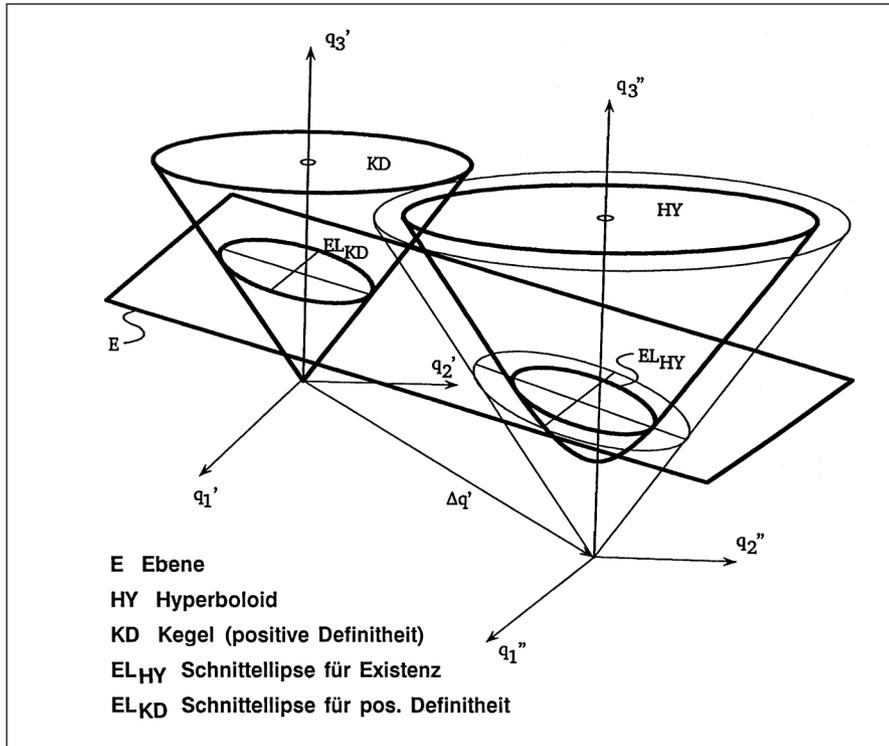
Eine andere interessante Möglichkeit stellt der sogenannte asymptotische Entwurf dar, bei dem die EV-Forderungen miteinbezogen werden. Der asymptotische Entwurf ist allerdings ein Näherungsverfahren, bei dem in einem modifizierten Gütekriterium durch fortlaufendes Absenken eines Kompromissparameters die Vorgaben immer besser erreicht werden können.

Der ‘Linear-quadratische Entwurf mit Strukturvorgaben’ beinhaltet die Minimierung eines quadratischen Gütekriteriums, wobei jedoch eine vorab festgelegte Eigenstruktur in Form von EW und EV erreicht wird. Zusätzliche Forderungen schränken jedoch die möglichen Gütekriterien ein, und die daraus resultierende Frage lautete: Können

bestimmte direkte Strukturvorgaben auch durch einen Riccati-Entwurf erreicht werden, und wenn ja, welche Klasse von Gütekriterien steht dafür zur Verfügung?

Die Beantwortung dieser Frage war die Hauptzielsetzung für die durchgeführten theoretischen und praktischen Untersuchungen, deren Ergebnisse im folgenden aufgeführt werden.

Zunächst wurde die sequentielle Vorgehensweise untersucht. Das Verfahren für die sukzessive EW/EV-Festlegung basiert auf der grundlegenden Tatsache, dass man eine Riccati-Lösung als Superposition von Teillösungen darstellen kann. Mit Hilfe eines neuen Ansatzes konnte zusätzlich eine Beobachtbarkeitsbedingung eingeführt werden, die es erlaubte, die EW mit ihren dazugehörigen REV gruppenweise und getrennt voneinander zu verändern. Im Gegensatz zu den bisher bekannten Verfahren stehen die REV des geschlossenen Regelkreises unmittelbar zur Verfügung. Das Verfahren enthält keinerlei Einschränkungen bezüglich der EW-



**Bild 6:**  
Geometrische Darstellung der Lösungsmenge bei der sukzessiven Eigenwert-Festlegung

Vorgabe, soweit dies nicht grundsätzlich gegen die Bedingungen verstößt, die bei Vorhandensein eines quadratischen Gütekriteriums als Nebenbedingung zu erfüllen sind. Die EV-Vorgabe wird allerdings eingeschränkt, und zwar verursacht durch die kanonische

Blockdiagonalform, durch die eine praktikable Handhabung ermöglicht wurde. Eine zunehmende Verfeinerung der Blockstruktur hat eine zunehmende Reduktion der freien Parameter im Gütekriterium zur Folge. Eine Vergrößerung, die dem entgegenwirkt, erschwert wiederum

das Auffinden der geeigneten Gewichtungsmatrizen. Mit Hilfe einer geometrischen Betrachtungsweise konnten die Lösungen als Schnittkurven quadratischer Flächen interpretiert werden. Bild 6 enthält die geometrische Darstellung der Lösungsmenge für einen Schritt der sukzessiven EW/EV-Festlegung. Für eine feste Steuergrößengewichtungsmatrix  $R$  und ein in diesem Schritt vorgegebenes EW-Paar ergeben sich die Lösungsmengen für die drei korrespondierenden Parameter der Zustandsgewichtungsmatrix  $Q$  als Schnittellipsen. Die Schnittellipse  $EL_{HY}$  stellt die Kurve aller existierenden symmetrischen Lösungen dar, die Innenfläche der Schnittellipse  $EL_{KD}$  kennzeichnet die positive Definitheit. Der Anteil von  $EL_{HY}$ , der innerhalb von  $EL_{KD}$  liegt (im Bild 6 wegen der Übersichtlichkeit nicht überlappend gezeichnet), stellt das Lösungskontinuum der positiv definiten Gewichtungsmatrizen im Gütekriterium dar, das die vorgegebenen EW garantiert. Diese geometrische Betrachtungsweise ermöglichte es, notwendige und hinreichende Bedingungen für die EW-Vorgabe ab-

zuleiten. Die in der Praxis sehr leicht auszuwertenden Bedingungs-gleichungen werden als neue Resul-tate betrachtet. Die Untersuchungen wurden mit numerischen Beispielen ergänzt, um die Vorgehensweise zu verdeutlichen und die Funktions-tüchtigkeit des Verfahrens zu demonstrieren. Für die Regelung der Längsbewegung eines Flugzeugs konnten die EW-Forderungen erfüllt werden. Eine eindeutige Lösung wurde durch die Minimierung einer gewichteten K-Norm erreicht. Am Beispiel eines Motor-Generator-Systems mit zwei Steuergrößen gelang die vollständige geometrische Darstellung der Gebiete für die möglichen EW-Vorgaben.

Zusätzlich wurden auch die dazugehörigen REV-Richtungen ermittelt, aufgrund derer sich herausstellte, dass es sogar Gütekriterien gab, die zu einer Entkopplung des Systems führten.

Zur weiteren Charakterisierung der im Sinne eines quadratischen Güte-kriteriums optimalen Systeme wurde der asymptotische Entwurf eingehend untersucht. Diese Ent-

wurfsmethode beinhaltet zunächst eine vollständige EW/EV-Vorgabe als Wunschmodell. Dann wird das Gütekriterium modifiziert, indem der Steuergrößengewichtungsterm mit einem zusätzlichen skalaren Faktor  $r$  versehen wird. Mit fortschreitender Abnahme von  $r$ , der als Kompromissparameter angesehen werden kann, wird das Wunschmodell immer besser erreicht.

Das asymptotische Modell besitzt sogenannte endliche und unendliche Modi, wobei die Anzahl der unendlichen Modi genau der Anzahl der vorhandenen Steuergrößen entspricht. Die EW der endlichen Modi bewegen sich gegen Nullstellen, die durch das Gütekriterium festgelegt werden.

Die EW der unendlichen Modi streben sternförmig und proportional gegen unendlich. Am Beispiel einer Reglerauslegung für die Durchführung eines Rendezvous-Manövers zwischen zwei Raumfahrzeugen stellte sich folgendes heraus: Die EW/EV-Forderungen für die Regelstrecke können sehr gut mit Hilfe der endlichen Modi erfüllt werden,

wenn man die Stellglieddynamik den unendlichen Modi zuordnet. Dabei genügt es, die Stellglieder durch Modelle erster Ordnung zu berücksichtigen, da in diesem Fall bereits genügend viele endliche Modi zur Erfüllung der Streckenspezifikationen vorhanden sind. Der anfängliche Versuch ohne diese Maßnahme war nicht erfolgreich. Die aus dem Beispiel gewonnenen Ergebnisse scheinen bezüglich des asymptotischen Entwurfsverfahrens allgemeingültig zu sein.

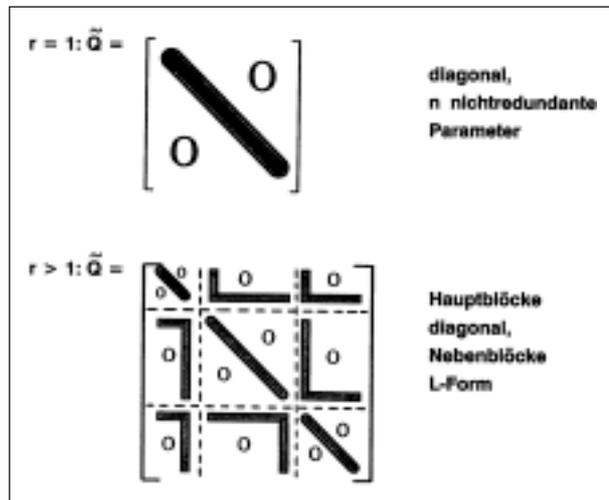
Das asymptotische Verfahren hat neben seiner praktischen auch eine fundamentale systemtheoretische Bedeutung. Es konnte aufgezeigt werden, dass der asymptotische Grenzfall identisch ist mit einem 'versteckten Idealmodell', das man durch eine geeignete Zerlegung des Gütekriteriums auffinden kann. Da die Aufdeckung erst durch die vollständige Beseitigung der redundanten Parameter im Gütekriterium zu erreichen ist, wurde der letzte Teil der Untersuchungen der Lösung des Redundanzproblems für Mehrgrößensysteme gewidmet. Dies kommt auch dem in der Literatur seit lan-

gem ausgesprochenen Wunsch nach, einen nichtredundanten Parametersatz im Gütekriterium eindeutig einem vollständigen Zustandsregler zuordnen zu können.

Die Lösung des Redundanzproblems für den Riccati-Entwurf ist mit einem neuen Ansatz gelungen, der über die kanonische Steuerungsnormalform die parametrisierte Darstellung der nicht-redundanten Gewichtungsmatrizen gestattet. Die nach vollständiger Parameterreduktion entstandenen Matrizen wei-

sen dieselbe Struktur auf, die auch die Steuerungsnormalform aufgrund der Kroneckerindizes besitzt. Die Anzahl der nicht-redundanten Elemente im Gütekriterium ist identisch mit der Anzahl der Koeffizienten in der Rückführungsmatrix. Damit ist die Parameterreduktion vollständig. Die Gewichtungsmatrix  $Q$  für die Zustandsgrößen ist im Eingrößenfall eine Diagonalmatrix, ein Ergebnis, das bereits früher durch direkte partielle Integration des Gütekriteriums gefunden worden ist [Otto, 90]. Im Mehrgrößenfall sind die in ihren Dimensionen durch die Kroneckerindizes festgelegten Hauptdiagonalblockmatrizen ebenfalls diagonal. In allen übrigen Blockmatrizen sind die von Null verschiedenen Elemente, wie im Bild 7 gezeigt, L-förmig angeordnet.

ßen können nichtdefinit sein, auch dann, wenn die ursprünglich redundante Matrix positiv definit war. Es konnte sogar gezeigt werden, dass zu jeder positiv definiten Matrix  $Q$  beliebig viele nicht definite Matrizen gefunden werden können, die zu demselben Zustandsregler führen. Die innerhalb einer Äquivalenzklasse nicht invariante Definitheitseigenschaft rechtfertigte es, eine **neue Definition für die Eignung von Gütekriterien** einzuführen:



**Bild 7:**  
Kanonische Formen der Zustands-Gewichtungsmatrix  $Q$  nach Beseitigung der redundanten Parameter ( $r = 1$ : Eingrößenfall;  $r > 1$ : Mehrgrößenfall)

Die nach Parameterreduktion erhaltenen Gewichtungsmatrizen für die Zustandsgrößen

*Eine Äquivalenzklasse von  $Q$ -Matrizen ist genau dann geeignet, wenn sie mindestens ein positiv definites Element enthält!*



# Dynamisches maschinelles Sehen



# Dynamisches maschinelles Sehen

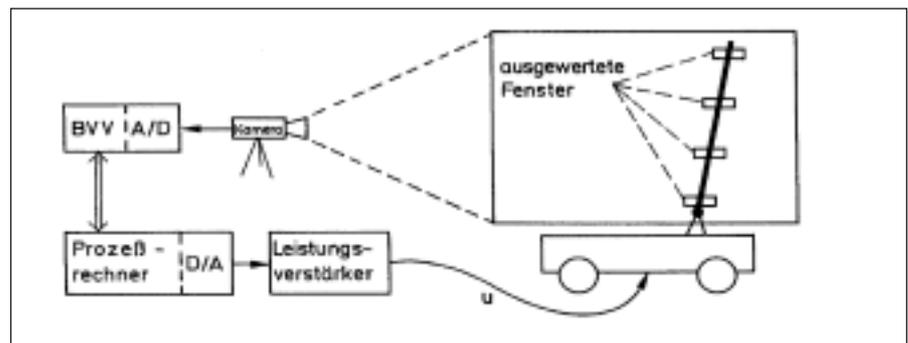
Dieser Themenkreis wurde nach längeren Vorüberlegungen 1976 konkret aufgegriffen mit der Anlagenplanung für die neuen Labore und mit der längerfristigen Zielsetzung, Bewegungen von Fahrzeugen über einen künstlichen Gesichtssinn so zu steuern, wie der Mensch es zu tun in der Lage ist. Es war klar zu erkennen, dass auf diesem neuen Forschungsgebiet bis dahin kein Ansatz verfügbar war, der mit den vorhandenen Rechenleistungen Problemlösungen in Echtzeit möglich erscheinen ließ. Da allgemeine Bewegungen in allen sechs Freiheitsgraden des Raumes, wie sie in der Luft- und Raumfahrttechnik gegeben sind, mit Sicherheit vorerst nicht beherrschbar sein würden, wurde der stufenweise Aufbau über Bewegungen an der Oberfläche ins Auge gefasst. Als praktische Aufgabenstellung in gut strukturierter Umgebung wurde von Anfang an das Steuern eines Autos auf einer Autobahn mit ihren normierten Umgebungsbedingungen erkannt; definitionsgemäß gibt es dort keine Kreuzungen und keinen Gegenverkehr, und die Oberflächen sind genormt und gut gepflegt. Mit dieser

praktischen Fragestellung am Horizont sollte aber zunächst an einfacheren Problemen der gewählte Lösungsansatz entwickelt werden.

Im Gegensatz zu den damals verbreiteten Ansätzen im Bereich der Mustererkennung und der künstlichen Intelligenz, die von quasi-statischen Einzelbildern ausgingen und schematisch auf Ganzbildern arbeiteten, stand bei dem am Institut verfolgten Ansatz von der Steuer- und Regelungstechnik herkommend der zeitliche Prozess im Vordergrund, auf den man gestaltend einwirken wollte. Aus der 'modernen' linearen Regelungstheorie einschließlich der Abtasttheorie und der Systemdynamik waren für diese

Aufgabenstellungen der zyklischen Messung nur einiger Ausgangsgrößen die Beobachter- und Schätzverfahren nach Luenberger und Kalman/Bucy bekannt. Durch Einschränkung auf eine wohldefinierte Aufgabenstellung konnte die Bildverarbeitung auf jene Bereiche begrenzt werden, in denen Informationen über den zu steuernden Prozess zu erwarten waren.

Für den Einstieg in diese neue Technik war selbst die Bewegung eines Radfahrzeugs als zu komplex angesehen worden. Die Balance eines am Fußpunkt gelagerten Stabes auf einem einfachen Karren, der sich wie auf geraden Schienen nur nach links oder rechts beschleunigen



**Bild 8:**  
Stabilisierung eines Stab/Wagen-Systems durch Rechnersehen

ließ, wurde als gerade richtiger Kompromiss für eine Anfangsaufgabe betrachtet (Bild 8). Sie war mit vier Zustandsvariablen auf der einen Seite komplex genug, um als Demonstrationsaufgabe dienen zu können, auf der anderen Seite aber bezüglich der Anforderungen an die Bildverarbeitung noch einfach genug, um mit den damals verfügbaren Rechenleistungen in Echtzeit bewältigt werden zu können. Da der Stab von Hause aus instabil ist und ohne aktive Regelung umfällt, andererseits der Mensch aber in der Lage ist, genügend lange Stäbe mit eigener Hand zu balancieren, wurde dieses Beispiel zum Einstieg gewählt; durch Variation der Stablänge kann das Problem im Schwierigkeitsgrad leicht variiert werden. Hinzu kam noch, dass dieser Prozeß sich in regelungstechnischen Gerätepraktika großer Beliebtheit erfreut; er wurde als fertiger Versuchsaufbau für dieses Praktikum vom Generalunternehmer für den Aufbau der HsBwM beschafft.

Um den Übergangsschritt von der wohlbehüteten Laborumgebung auf Prozesse in der Außenwelt nicht zu

groß werden zu lassen, wurde ein zweiter Laborprozess konzipiert, der bezüglich der Bildverarbeitung schon wesentlich anspruchsvoller ist, bezüglich der Prozessdynamik aber merklich einfacher als die Stabbalance. Um die Beziehung zur Raumfahrttechnik zu halten, wurde die für Raumfahrt-Simulationszwecke bekannte Technik des auf einem Luftkissen schwebenden und mit Reaktionsdüsen angetriebenen Fahrzeugs gewählt. Mit solchen bei kleinen Geschwindigkeiten fast reibungsfrei schwebenden Fahrzeugen kann man die Endphase des Andockvorgangs im Labor wirklichkeitsnah untersuchen. Die gewählte Aufgabenstellung dieses Versuchs war deshalb, von einem Abstand her mit Bildverarbeitungsverfahren den bekannten Andockpartner an dem unbekanntem Ort unter nicht bekannten Aspektbedingungen zu erkennen, mit Hilfe der Reaktionsdüsen auf ihn zuzufiegen und ihn ggf. zu umfliegen, bis die Andockstelle gefunden wurde, und dann den Andockvorgang an das ruhende Objekt vollautomatisch durch dynamisches maschinelles Sehen in Echtzeit durchzuführen. Diese Aufgabe er-

fordert die autonome Fähigkeit zur visuellen Objekterkennung und -verfolgung während der Bewegung des Fahrzeugs, die allerdings sehr langsam ist (im Bereich cm/s). Der Körper hat drei unabhängige Bewegungsfreiheitsgrade und wird in jedem durch ein System zweiter Ordnung beschrieben. Dieser Weg der Entwicklung der Technik des dynamischen maschinellen Sehens an konkreten praktischen Aufgaben unter Einhaltung der Echtzeitbedingungen mit wohldefinierten kleinen Schritten hat sich bestens bewährt. Im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Gruppen, die sich zunächst mit verlangsamer Simulation oder nur mit off-line Algorithmusentwicklungen befasst haben, zwang die Echtzeitbedingung zur Entwicklung anderer Denkweisen und Verfahrensansätze, die sich aber letztendlich als erfolgreich und entwicklungsfähig herausgestellt haben. Im folgenden wird zunächst der in zehn Jahren entwickelte 4-D-Ansatz mit räumlich / zeitlichen Modellen beschrieben; dann werden die erzielten Ergebnisse in den verschiedenen Anwendungsbereichen diskutiert.

## Der 4-D-Ansatz

Dieser Ansatz zur Lösung des allgemeinen Problems der Erkennung bewegter Szenen mit einer unabhängig bewegten Kamera geht davon aus, dass zur Erkennung von Bewegungsprozessen räumlicher Objekte im dreidimensionalen (3-D)-Raum die zeitliche Dimension als grundlegendes Element zur Erfassung von Invarianzen von Anfang an mit enthalten sein muss; es genügt nicht, aus Differenzen quasi-statisch ausgewerteter Bilder mittels Verschiebungsvektoren in der Bildebene auf Bewegungen im Raum zurückzuschließen. Die gleichzeitige explizite Modellierung entlang der Zeitachse und im 3-D-Raum (daher der Name 4-D-Ansatz) erlaubt die Einbeziehung von Kontinuitäts-Bedingungen über der Zeit in allen drei orthogonalen Raumrichtungen mit den entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten als natürlichen Zustandsvariablen gemäß dem Newtonschen Ansatz; dies stellt auch zwanglos die Verbindungsstelle zur Datenfusion bei gleichzeitiger Verwendung von Inertialdaten zur schnellen Erfassung der Eigenbewegungen dar. Die einzelnen Bilder sind dann momentane Schnappschüsse, die in eine Bewegung mit räumlich / zeit-

licher Repräsentation eingebettet und durch perspektivische Abbildung daraus hervorgegangen sind. Zeitliche und örtliche Linearisierungen der Einbettungs-Beziehungen vom 4-D-Zustand von Objekten zu Merkmalgruppen in der Bildfolge gestatten bei zeitlich häufigen und örtlich dichten Messungen für die Praxis hinreichend gute Näheungsbeziehungen, aus denen mittels linearer Rückkopplung von Vorhersagefehlern die Zustandsvariablen und die Parameter von generischen Formmodellen zielgerichtet angepasst werden können; mit den rekursiven Schätzverfahren, die aus dem Kalman Filter auch für nichtlineare zeitvariante Problemstellungen abgeleitet wurden, stehen dazu leistungsfähige Methoden und Algorithmen zur Verfügung. Mit den zeitlichen Bewegungsmodellen und bekannten oder sinnvoll angenommenen Steuerfunktionen können die räumlichen Relativanordnungen der interessanten Objekte für den nächsten Messzeitpunkt vorhergesagt werden. Dies gestattet nach Anwendung der Perspektivtransformation in der unproblematischen 'Vorwärts'-Richtung vom räumlichen 3-D-Objekt zum Bild eine intelligente, objektorientierte Vorhersage der

Merkmale bezüglich Lage und Orientierung im Bild und damit eine zielgerichtete Steuerung der Merkmalextraktion; dies führt zu erheblicher Effizienzsteigerung in der datenintensiven Bildverarbeitung (ein bis drei Größenordnungen gegenüber der schematischen Ganzbildverarbeitung).

*The results achieved in 1987 in road vehicle guidance with this approach were so surprising and unparalleled that the British Broadcasting Corporation BBC decided to feature them in a sequence narrated by a professional TV-'mediator' whom you will see in the following (digitized and compressed) film shown in 1988 in the series*

### **,Tomorrow's World': < Self Drive Van >**

*(~4 minutes)*

*From the video sequences to follow lateron, you may see the progress made over the years. Remember that the increase in computing power by microprocessors is in the range of ,one order of magnitude every 4 to 5 years' (Moore's law).*

*This film was the first that gave machine vision for road vehicle applications world-wide coverage; it (or parts of it) have been broadcast by many other stations over the globe and over the years. Many other TV-teams came lateron to continue coverage of this development.*

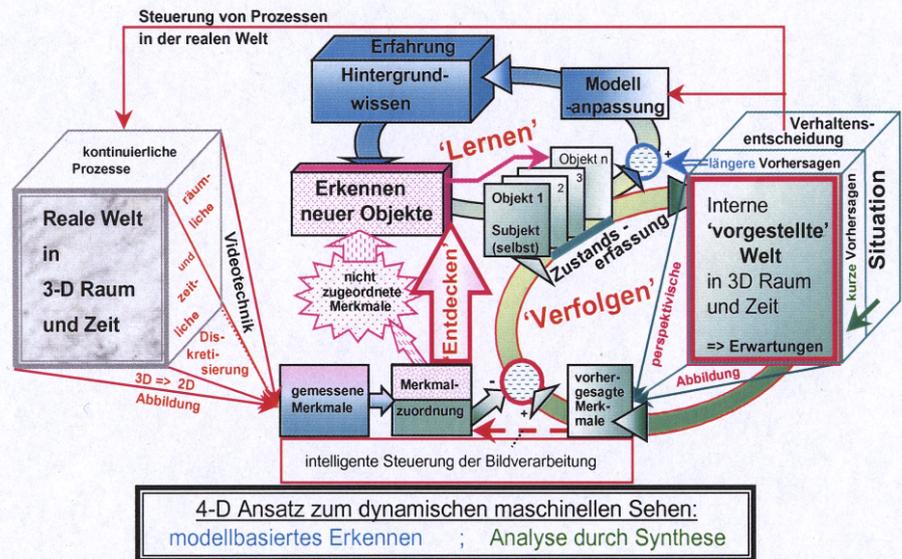
# Überblick

Bild 9 zeigt das summarische Blockdiagramm zu diesem Verfahren, das auf dem Prinzip der 'Analyse durch Synthese' mit lokaler Nachiteration beruht. Parallel zur realen Welt (Block links oben) wird im Rechenprozess eine 'mentale' Welt bestehend aus allen Einzelobjekten aufgebaut, die für den zu steuernden Prozess von Bedeutung sind. Hieraus wird unmittelbar die Aufgabenorientierung deutlich; vorerst sind der allgemeine Wissenshintergrund und die Erzeugung von Hypothesen auf bestimmte Aufgabengebiete begrenzt. Später, wenn komplexere Situationserkennungsaufgaben gelöst werden können, soll diese Einschränkung durch die dann vorhandenen allgemeinen Orientierungsfähigkeiten zunehmend aufgehoben werden.

Diese 'mentale' Welt ist im Blockschaltbild oben rechts dargestellt; sie besteht aus räumlich und zeitlich geeignet im Rechner repräsentierten Objekten, deren grundlegende Struktur und Bewegungsmöglichkeiten im Programm festgelegt sind. Diese sogenannten generischen Modelle von Objektklassen

(bezüglich 3-D-Form und -Bewegung) enthalten freie Parameter, die im visuellen Erkennungsprozess angepasst werden müssen. Ausgehend von einer anfänglichen Hypothese über die Objektform, die Größe des Objektes und dessen Relativlage berechnet man aus dieser Vorstellung mit Hilfe der perspektivischen Abbildungsbeziehungen das sich ergebende Bild, wobei die bekann-

ten Kameraparameter verwendet werden; alle freien Parameter müssen dann so verändert werden, dass dieses auf wesentliche Merkmale verarmte Bild dem von der Kamera gelieferten entspricht. Die zu lösende Aufgabe scheint zunächst kaum zu bewältigen. In der Tat gingen alle Lösungsansätze aus dem Bereich der 'Künstlichen Intelligenz' Anfang der 80-er Jahre einen ande-



**Bild 9:** Übersichts-Blockdiagramm zum 4-D-Ansatz für das dynamische (maschinelle) Sehen mit integrierten räumlich/zeitlichen Modellen und der Rückkopplung von Vorhersagefehlern für Merkmale

---

ren Weg; das Paradigma des ‘Computational Vision’ herrschte vor, bei dem von den Bilddaten ausgehend (bottom-up) die räumliche Welt aus mehreren Einzelbildern rekonstruiert werden sollte. Die zeitliche Dimension kam durch die Hintertür der Bilddifferenzen ins Spiel; sie wurde nicht systematisch repräsentiert.

Im Gegensatz dazu nutzt der 4-D-Ansatz mit räumlich / zeitlichen Modellen gerade die Kontinuitätsbedingungen entlang der Zeitachse systematisch aus, wie dies in der Systemdynamik und Regelungstechnik bei konventionellen Sensoren Stand der Technik war; die 3-D-Formmodellierung und die systematische Einbindung der Perspektivabbildung mussten als verbindende Elemente neu eingebracht werden. Diese Aufgabe wurde zu wesentlichen Teilen von Wünsche [Wünsche, 87, 88] gelöst. War zunächst bezüglich der Bestimmung der Zustandsgrößen von der Beobachtertechnik nach Luenberger ausgegangen worden [Meissner, 82; Meissner, Dickmanns, 83], so ergab eine systematische Untersuchung

der deterministischen gegenüber den stochastischen Formulierungen durch Wünsche im allgemeinen Fall Vorteile für die letztere, die sich dann weltweit durchgesetzt hat.

Von dieser internen Weltvorstellung (oben rechts in Bild 9) ausgehend kann dann der Zustand zum Zeitpunkt der nächsten Abbildung anhand der dynamischen Modelle vorhergesagt werden. Hieraus ergibt sich mit den Abbildungsgleichungen, die die gleichen Parameter zur perspektivischen Abbildung haben wie die aktuell verwendeten Kameras, die Lage von gut sichtbaren Merkmalen im Bild (sich verjüngender großer Pfeil von rechts oben nach links unten). Mit diesen Daten wird nun die Bildauswertung intelligent gesteuert: sowohl die Suchbereiche für bestimmte Merkmale wie auch die Merkmalart und die hierfür optimalen Algorithmen lassen sich gezielt festlegen. Mit dieser Vorgehensweise kann man die sogenannte ‘Gestalt’-Idee der Psychologie im Bereich des technischen Sehens anwenden, die in einem gegebenen Kontext das Problem der kombinatorischen Explosion ver-

meiden hilft: Ohne zu wissen, was man in welcher Orientierung sucht, würde man in komplexeren visuellen Szenen das Objekt nur mit wesentlich höherem Aufwand ausfindig machen können, wenn überhaupt. Die gemessenen Merkmale und ihre Lage sowie Orientierung werden dann mit den vorhergesagten verglichen (Bild 9 Mitte unten). Im erwarteten Streubereich der rekursiven Schätzverfahren gefundene Merkmale werden zur Verbesserung der Schätzwerte herangezogen (Rückkopplungskreis nach rechts oben).

Hierbei spielen die Jacobi-Matrizen für jedes Objekt/Sensor-Paar eine entscheidende Rolle. Sie geben an, wie sich in erster (linearer) Näherung die Merkmallagen in Abhängigkeit von den unbekanntem (durch Bildauswertung zu bestimmenden) Parametern und 3-D-Zustandsvariablen der eingesetzten Modelle ändern.

Mit diesen informationsreichen Matrizen der ersten (partiellen) Ableitungen gelingt eine räumliche Interpretation der Bildfolge ohne direkte

Inversion der nichtlinearen perspektivischen Abbildungsgleichungen; dies gilt sogar für die räumlichen Geschwindigkeitskomponenten. Der rekursive Schätzalgorithmus liefert aus den Vorhersagefehlern der Merkmale nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate die besten Schätzwerte für die Modellparameter und Zustände. Dies hat sich als äußerst effizient herausgestellt. Verbleibende, nicht zugeordnete Merkmale sowie mit speziellen Suchalgorithmen gefundene weitere Merkmale sind möglicherweise ein Anzeichen für neu aufgetretene Objekte in der Bildfolge, die für die Zukunft von Bedeutung sein können; spezielle Algorithmen zur Erzeugung geeigneter Interpretationen müssen aus einer konsistenten Folge solcher neuer Merkmalsätze neue Objekthypothesen erzeugen (Mitte links oben in Bild 9). Dieser wichtige und schwierige Schritt entscheidet weitgehend über die Leistungsfähigkeit eines visuellen Wahrnehmungssystems: Werden in der realen Welt vorhandene Objekte nicht richtig erkannt, kann das Gesamtsystem natürlich nicht angemessen reagieren; werden in die Merkmalsätze unkritisch belie-

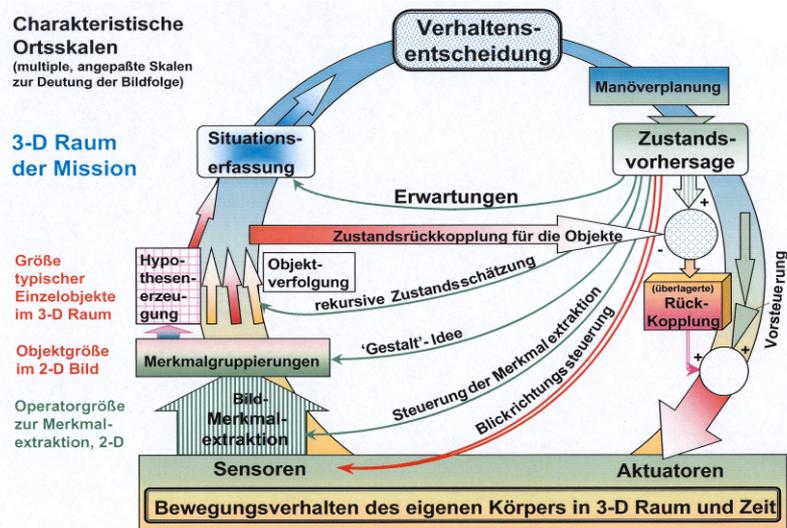
bige Objekte hinein phantasiert (Fehlalarme), so ist das Gesamtsystem ebenfalls in seinen Reaktionen (ggf. stark) behindert. Es ist deshalb wichtig, solche neuen Objekthypothesen, die immer die drei Komponenten:

1. Form,
2. Aspektbedingungen und
3. Bewegungsmodell

enthalten müssen, besonders kritisch über die ersten Bilder hinweg zu verfolgen.

## Situationen zur Fallunterscheidung

Alle erkannten Objekte und die eigenen Absichten bilden die momentane Situation. Nach deren Erfassung erfolgt die Verhaltensentscheidung und die Ausgabe der Steuergrößen. Diese gehen nicht nur auf die reale Strecke (oberer Bogen, Bild 9), sondern werden auch aufgezeichnet. Aus diesen zeitlichen Steuerverläufen und den beobachteten Zustandsgrößen kann dann eine



**Bild 10:** Vielfache, situationsgesteuerte Rückkopplungen zur Steigerung der Effizienz der Wahrnehmung und Verhaltenssteuerung

Systemidentifikation durchgeführt werden (Lernkomponente, Mitte oben).

Bild 10 soll die vielfach parallelen Rückkopplungswege von der Zustandsvorhersage auf die Wahrnehmungsfunktionen deutlich machen. Es wird nicht nur die Blickrichtung und die Merkmalextraktion gesteuert, sondern auch die Merkmalaggregation zur Gestalt sowie die Objekt- und die Situationsverfolgung. Durch systematische Variation der Zustandskomponenten sowie der Formparameter und Bildung der entsprechenden Differenzen-Quotienten mit dem Nominalwert kann mit sehr geringem Codierungsaufwand die Matrix der ersten Ableitungen, die sogenannte Jacobi-Matrix, berechnet werden, die bei der Rückkopplung der Vorhersagefehler zur Verbesserung der momentanen Schätzwerte eine wesentliche Rolle spielt; die Rechenleistung hierzu steht heute zur Verfügung.

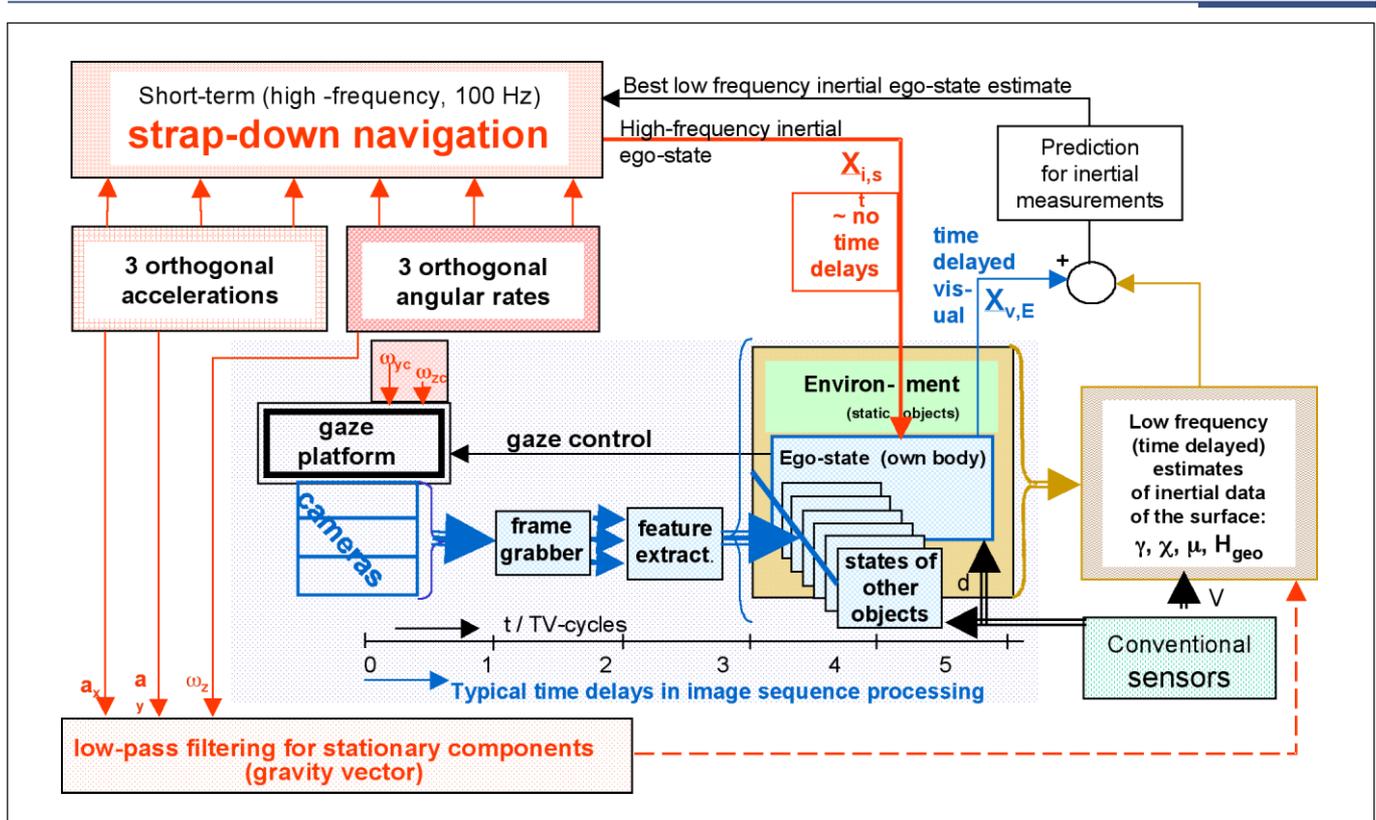
---

## Gemeinsame inertielle/visuelle Wahrnehmung

Es hat sich gezeigt, dass bei starken Störungen der Eigenbewegung wegen der relativ großen Totzeit bei der Bildauswertung (einige Zehntelsekunden) ein befriedigendes Verhalten allein über den Gesichtssinn nicht erzielt werden konnte. Deshalb wurden, wie auch bei den Wirbeltieren im biologischen Bereich üblich, Inertialsensoren mit hinzu genommen, die praktisch keine Totzeit haben und die Gesamtbewegung (Beschleunigungen und Drehraten) einschließlich der Störungen erfassen. Die zeitliche Integration dieser Signale von fest auf den Körper montierten Inertialsensoren gestattet in einfacher Weise, die Position und Winkelorientierung des eigenen Körpers vorherzusagen. Wegen der Driftprobleme bei preiswerten Inertialsensoren sind diese Vorhersagen nur für kurze Zeiträume gültig. Der Gesichtssinn gestattet die niederfrequente Stabilisierung durch Orientierung an weiter entfernten stationären Objekten.

Bild 11 zeigt das entwickelte Schema zur gemeinsamen Verarbeitung und Interpretation von inertialen und visuellen Daten. Falls eine Zweiachsen-Plattform auf dem Fahrzeug installiert ist, kann zunächst die negative Rückführung der in den entsprechenden Achsen gemessenen Drehraten auf die Kameraplattform schon für eine gut stabilisierte Blickrichtung (im Zehntel-Grad Bereich) sorgen ( $\omega_{yc}$ ,  $\omega_{zc}$  Mitte oben links).

Unabhängig davon sind je ein Satz von drei orthogonal angeordneten Beschleunigungs- und Drehratensensoren auf dem Fahrzeugkörper angebracht, um dessen Bewegung direkt zu erfassen. Deren Signale werden im Sinne der ‚Strap-Down‘ Navigation integriert und liefern die hochfrequenten Eigenbewegungskomponenten mit guter Genauigkeit (oben links im Bild). Die so erzeugte Darstellung der eigenen Körperlage wird der Bildauswertung als



**Bild 11:**

Bild zur integrierten inertialen/visuellen Datenverarbeitung beim dynamischen maschinellen Sehen von einem Fahrzeug mit nicht vorhersehbaren mechanischen Störungen

Vorwissen zu Grunde gelegt. Der schattiert gekennzeichnete Bildauswertungsbereich hat einige Videozyklen Zeitverzug, bis die Ergebnisse zur Verfügung stehen (vertikal mittlerer Teil im Bild 11). Aus

diesen Ergebnissen kann die eigene Körperlage bezüglich der niederfrequenten Anteile richtig gedeutet werden. Aus extrem tiefpassgefilterten linearen Beschleunigungsmessungen in der Horizontalebene

und Datenvergleich mit der gemessenen Geschwindigkeit des Fahrzeugs kann auch die Neigung der Fahrbahnebene ermittelt werden (unten links und rechts).

# Repräsentation von Raum und Zeit

Zur einheitlichen und effizienten Handhabung all dieser Daten wurde ein Repräsentationsschema für den dreidimensionalen Raum und die Zeit entwickelt, das das breite Spektrum vom punktuellen ‚Hier und Jetzt‘ über differentielle Nachbar-

schaften, lokale und weiter gefasste Integrale bis hin zur Gesamtmission umschließt. Tabelle 1 zeigt Einzelobjekte (Zeile 3) und die Transition von einem Messzeitpunkt zum nächsten (Spalte 3) als die zentralen Elemente für die Wissensrepräsentation im 4-D-Ansatz (stark umrandetes Feld in der Mitte).

Beschleunigungsdaten werden punktuell (oberes linkes Feld) gemessen; Bildmerkmale (Kanten, Ecken, homogene Bereiche) werden in einer

Column no. Range ↓ in space → in time	1 point in time	2 temporally local differential environment	3 local time integrals, basic temporal discretization	4 extended time integrals	5	6 global time integrals
Point in 3-D space	"Here and now" 3 orthonormal accelerations	[no optical flow on pixel level]	⇒ derived from (3,3) 1-step prediction		<b>features</b>	
spatially local differential environment	<b>edge elements</b> tangents curvatures parallels aligned lines	joint feature flow for object  hypothesis generation	transitions of feature parameters	feature history		
<b>single objects</b> as 3-D invariants, local integrals	feature distribution, homogeneous areas, intensity and color profiles  3 orthonormal	"dynamical models" spatial velocity components  angular rates	<b>single object state transition</b>  (from smoothing recursive estimation)	short range predictions  object state time histories	<b>objects</b>	sparse longer range predictions  statistics for objects
several object (joint) maneuver space	local situation	derived from recursive estimation <b>change of situation</b>	relative states of objects of interest, and of the environment	maneuver multi-step predictions monitoring of near environment		<b>situations</b>
	Multiple	scales in	3-D space			
mission space of objects; larger environment	actual global situation			monitoring of maneuvers of subjects	<b>situations</b>	mission performance, monitoring

Tabelle 1:  
Multiple scale recognition and tracking of features, objects and situations in EMS-Vision

lokalen Umgebung erfasst (zweite Zeile). Starre Objekte werden als lokale räumliche Integrale einer differentialgeometrischen Formbeschreibung angesehen; deren Form spiegelt sich in der Merkmalverteilung auf ihrer Oberfläche wider (speziell Kanten, Ecken, Aussenkonturen und Schattierungen). Drehgeschwindigkeiten eines Objektes können durch Inertialsensoren an beliebigen Orten des Objekts erfasst werden. An Objektklassen wird der größte Teil des Wissens über ‚die Welt‘ festgemacht. Starre Objekte haben im Allgemeinen sechs Bewegungsfreiheitsgrade, drei translatorische und drei rotatorische; in jedem ergibt sich nach Newton ein Bewegungsmodell zweiter Ordnung. Ihre Verknüpfung untereinander ist charakteristisch für die Objektklasse. Bei abgetasteten (diskreten) Systemen enthalten die Transitionsmatrizen das konkrete Bewegungsmodell; sie stellen die Verbindung zwischen der ersten und der dritten Spalte dar.

Mehrere Objekte zusammen mit den eigenen Absichten bilden die Situation; diese enthält alle Elemente, die die Entscheidungsfindung

zur eigenen Bewegungssteuerung beeinflussen. Die eigenen Ziele werden durch (kurzfristige) Manöver und (möglicherweise länger dauernde) Phasen von Verhalten mit Rückkopplungscharakter (z.B. Spur- und Abstandshaltung bei Straßenfahrzeugen) angesteuert. Da diese Phasen gleichzeitig in Raum und Zeit fortschreiten, ist ihr Auftreten in der Tabelle durch die Diagonale vom Zentrum nach rechts unten gegeben. Je nach Aufgabe und Zweckmäßigkeit können hier mehrere Skalenebenen eingeführt werden.

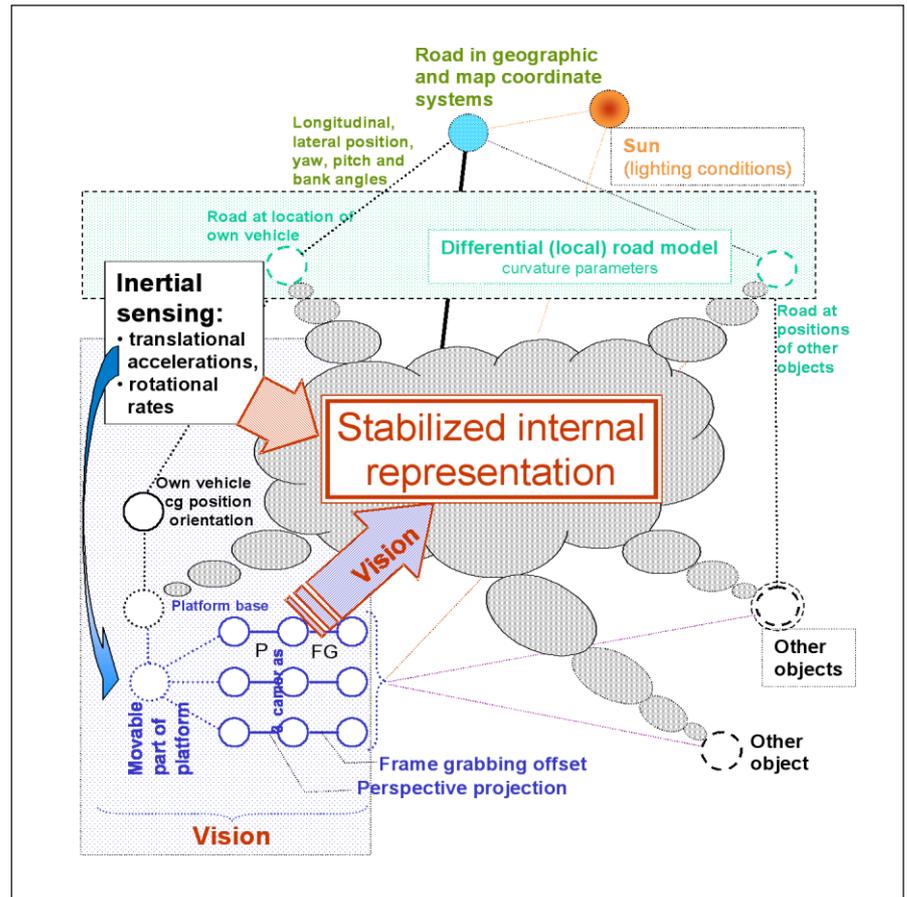
Das zum dynamischen Sehen bei autonomen Systemen erforderliche Wissen wird zweckmäßigerweise in drei Bereiche unterteilt, die in der Tabelle angegeben sind. Dies ist

1. Wissen zu Merkmalen, wie sie effizient extrahiert und (bottom-up) gruppiert werden, um daraus Objekthypothesen abzuleiten,
2. Wissen zu Objektklassen, wie sie strukturell aufgebaut und parametrisiert sind, sowie
3. Wissen zur Situationsbewertung und Missionsdurchführung.

Der Sprung von Merkmalen zu Objekthypothesen hat im 4-D Ansatz stets drei Komponenten: Die räumliche Form, die Aspektbedingungen und das dynamische Bewegungsmodell. Nach Festlegung von Anfangshypothesen steht auf dieser Basis ein reichhaltiges Vorwissen zur Verfügung, mit dem die Hypothese über der Zeit leichter überprüft werden kann. Vor allem die in den Jacobi-Matrizen enthaltene lineare Näherungsbeziehung zwischen Parametern und Zustandsgrößen in Raum und Zeit und den Merkmalen im Bild ist dabei äußerst hilfreich. Sie spricht für die Vorgehensweise, ggf. relativ früh mit mehreren Objekthypothesen zu starten und die falschen dann mit dem Vorwissen aus den Objektmodellen über die Zeit zu eliminieren. Bei Objekten mit der Fähigkeit der Informationsaufnahme über die Umwelt mittels Sensoren und der Bewegungssteuerung aus eigenem Antrieb heraus, sogenannten ‚Subjekten‘, ergeben sich über stereotype Bewegungsmuster weitere Charakteristika. Kurzzeitige gezielte Aktivitäten zur Erreichung eines neuen Zustandes werden als ‚Manö-

ver‘ mit einem eigenen Begriff belegt, der Bewegungen auf einer zeitlich ausgedehnteren Skala zusammenfasst. Spurwechsel oder Abbiegen auf eine Querstraße bei Straßenfahrzeugen sind typische solche Manöver; sie können aus mehreren Teilphasen mit charakteristischen Steuerverläufen über der Zeit bestehen. Die Zusammenfassung in einem Begriff (= Symbol für einen Zustandswechsel in endlicher Zeit) erleichtert die abstrakte Handhabung und die Kommunikation mit anderen Teilsystemen oder anderen Subjekten.

Auf der logischen Ebene muss nun nicht mehr der Ablauf im Einzelnen vorgestellt werden, sondern nur, wann das Manöver sinnvoll ist und welche Gesamtwirkung es hat; dies vereinfacht die Planungsaktivitäten und kann in quasistatischen Regeln gefasst werden. Maurer, Pellkofer und Siedersberger haben diesen Ansatz mit sogenannten ‚State-charts‘ (nach [Harel, 87<sup>1</sup>]) im System implementiert. Die eigentliche Realisierung des Manövers erfolgt auf der systemdynamischen 4-D Ebene, die direkten Zugang zu Messdaten und den Stellgliedern hat (s.u.).



**Bild 12:** Erzeugung einer stabilisierten Weltvorstellung aus Messdaten und Hintergrundwissen durch mehrstufige Fusion in einem erweiterten Gegenwartsbereich

<sup>1</sup>D. Harel: Statecharts: A visual formalism for complex systems. Science of Computer Programming, 8, pp. 231-274, 1987

# Das Konzept zur Gesamtsystemarchitektur für sehende autonome Fahrzeuge

---

Auszuführende Missionen werden durch Sequenzen von solchen Manövern und Phasen mit geregelterm Verhalten, wie z.B. Fahren in einer Spur mit geschwindigkeitsabhängigem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, realisiert (Feld unten rechts in Tabelle 1). Durch Verwendung dieser Vorstellungen auf verschiedenen örtlichen und zeitlichen Skalen reagiert das System nicht mehr nur auf Signale ‚hier und jetzt‘, sondern auf eine stabilisierte und in den Aufgabenzusammenhang eingebettete Vorstellungswelt, die aus inertialen und visuellen Sensorsignalen in Verbindung mit Hintergrundwissen über ‚die Welt‘ aufgebaut wurde. Bild 12 soll diese Situation verdeutlichen:

Der eigene Ort ist über das Global Positioning System GPS mit den geographischen Daten Länge / Breite / Höhe über dem Meeresspiegel bekannt. Die translatorische und die niederfrequente rotatorische Orientierung relativ zur Straße erfolgt

über den Gesichtssinn, wobei die rotatorische aus den Inertialdaten heraus bereits in den höheren Frequenzanteilen stabilisiert wurde. Die interne Vorstellung beruht also weder direkt auf den Inertialdaten noch auf den visuellen Daten, sondern auf einer Umrechnung dieser Daten von verschiedenen Messzeitpunkten in eine abstrakte Vorstellung, die auch mit der durchzuführenden Aufgabe in Einklang gebracht wurde. Mit den entwickelten Verfahren zur Repräsentation der Situation kann auch der Sonnenstand über fünf Transformationsmatrizen mit homogenen Koordinaten und wenigen Parametern für jeden Punkt auf dem Globus der aktuellen Zeit entsprechend richtig dargestellt werden (oben rechts im Bild). Dies ist bezüglich Schattenrichtung und zu erwartendem Gegenlicht bei bestimmten Fahraufgaben wichtig. [Es sei daran erinnert, dass die Menschheit mehrere Jahrtausende damit beschäftigt war, das Erscheinungsbild und die Bahn der Sonne richtig zu verstehen.]

Aufbauend auf dem Erfahrungsschatz aus zwei Jahrzehnten ‚dynamisches Sehen‘ mit etwa 150 Personenjahren Entwicklungs- und Testarbeiten in einem breiten Spektrum von Anwendungsgebieten (s.u.) wurde in den Jahren 1996 bis 2000 mit einem Aufwand von etwa 25 Personenjahren das neue System EMS-Vision entwickelt. Seine Entwicklung ist in den Grundzügen geleistet, aber bei weitem nicht abgeschlossen; es besteht die Hoffnung, dass die Grundstruktur inzwischen stabil und weiter ausbaufähig ohne grundlegende Änderungen ist.

Bild 13 gibt die Gesamtarchitektur des autonomen Systems mit Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungsfähigkeit in einem Missionszusammenhang wieder. Die unterste Ebene bildet die Hardware (Fahrzeugkörper, Sensoren und Aktuatoren [Fortbewegung und Blickrichtungs-Steuerung]); die Zeit spielt auf dieser Ebene keine Rolle, außer dass natürlich Totzeiten in Signalpfaden minimal gehalten werden müssen. Daten werden unmittelbar verarbeitet wie sie anfallen und den speziellen Wahrnehmungsprozessen auf der nächst höheren Ebene zugeleitet.

Auf dieser 4-D-Ebene konzentrieren sich nun die Aktivitäten, die mit räumlich / zeitlichen Modellen arbeiten und die daher einen hohen Datendurchsatz haben. Hier werden diese Daten Objekten und Subjekten in symbolischer und numerischer Form zugeordnet. Zu den oberen Ebenen hin wird nur mehr über Parameter und Zustände von diesen Objekten/Subjekten berichtet; dadurch kann der Datenstrom um zwei bis drei Größenordnungen reduziert werden ohne wesentliche Informationen zu verlieren. Diese 4-D Ebene umfasst den größten Teil der Rechnerhardware. Hier werden mittels Hintergrundwissen über generische Objektklassen aus Merkmalgruppen Objekthypothesen abgeleitet, die zunächst (über 3 bis 5 Folgebilder) nur intern verfolgt werden. Ergibt sich dabei eine konsistente Deutung, wird die Hypothese als neues Objekt in die dynamische Objektdatenbasis DOB (im Bild links auf der dritten Ebene von unten) eingehängt. Für diese visuellen Wahrnehmungs-Prozesse gibt es eine Reihe von Spezialisten, die auf bestimmte Objektklassen abgestimmt sind: Straßen und Fahrspu-

ren (RDT), andere Fahrzeuge („Objekte“, ODT) und Landmarken (LDT). Ein Spezialprozess zur Erkennung der vertikalen Oberflächenstruktur bei der Querfeldeinfahrt ist ebenfalls in Entwicklung (3DS). Für die Auswertung der Inertialdaten gibt es einen gesonderten Spezialisten (IBES). NN steht für weitere zukünftige Spezialisten.

Die besten Schätzwerte für die Parameter und 4-D-Zustandsvariablen aller Objekte werden in die DOB eingeschrieben, die als Kommunikationsmedium und Isolierschicht zugleich zwischen den unteren und der oberen Ebene fungiert. Die interne Darstellung der beobachteten Szene erfolgt anhand des Szenenbaumes<sup>1</sup>, der über homogene Koordinatentransformationen die Relativlage aller Objekte und Teilobjekte in Beziehung setzt (linke Hälfte der dritten Ebene (Kreise)). Jeder Spezialist auf der 4-D-Ebene schreibt in jedem Zyklus seine besten Schätzwerte für die von ihm betreuten Objekte in die DOB. Der neueste Stand wird dann zu allen anderen Rechnern im Verbund gesandt, so dass alle Prozesse stets die neuesten Daten verfügbar haben.

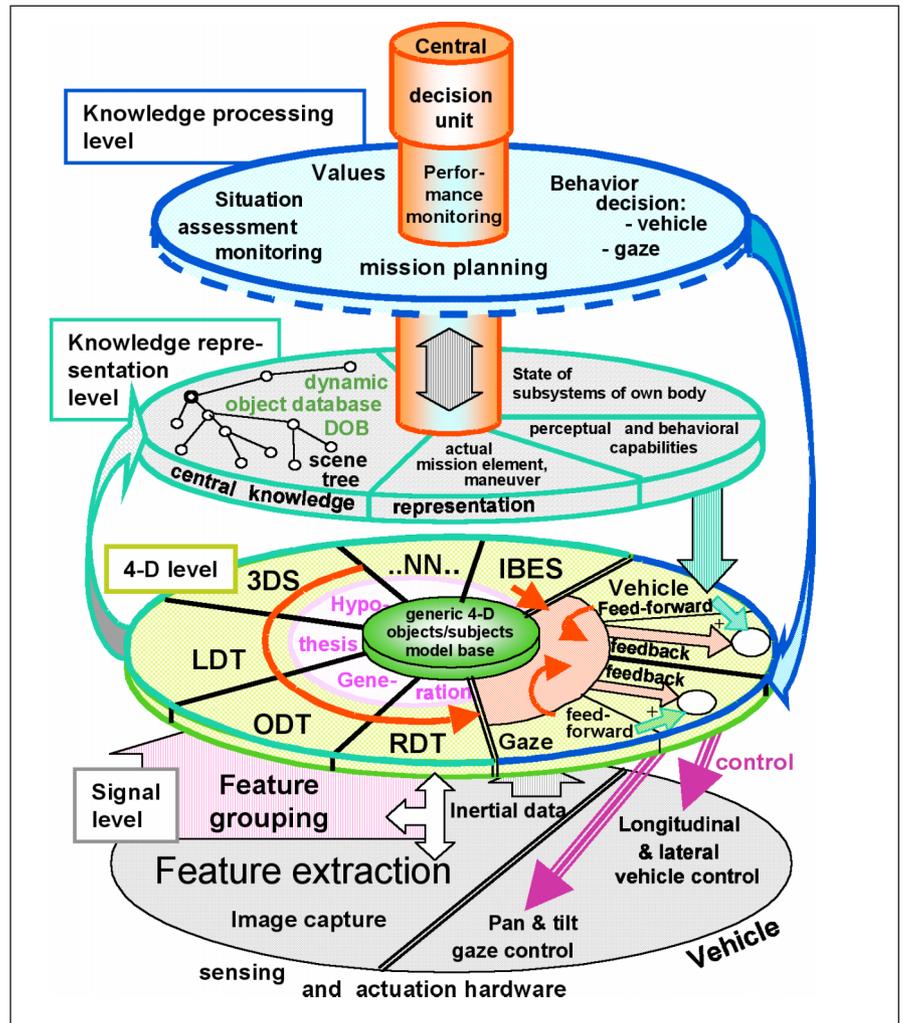
Ebenfalls in diesem allgemein verbreiteten Daten- und Wissensspeicher sind Informationen über den aktuellen Stand der Subsysteme des eigenen Körpers sowie über die Wahrnehmungs- und Verhaltensfähigkeiten abgelegt (rechte Hälfte der dritten Ebene im Bild). Der aktuell in der Ausführung befindliche Teil des Missionsplans (vorderes Segment im Bild (Ebene 3)) rundet die Darstellung des aktuellen Wissens ab.

Die obere Systemebene baut für aktuelle Entscheidungen ausschließlich auf diesen Informationen und weiterem Hintergrundwissen wie digitales Kartenmaterial, Planungswissen zu Missionen, und einem Wertesystem auf. Sie ist z.Z. vergleichsweise wenig ausgebaut; mit dem Unterbau nun einsatzbereit in mehreren Fahrzeugen kann auf dieser Ebene der weitere Ausbau vorangetrieben werden. Diese Ebene ist nicht streng an den hochfrequenten Takt der unteren Ebenen gebunden. Hier wird zunächst aus den Objekt/Subjekt-Daten eine Zusammenschau der Bewegungen relevanter Objekte / Subjekte erarbei-

<sup>1</sup>Dickmanns, Dirk: Rahmensystem für visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer. Dissertation, UniBw München, Fakultät für INF, 1997

tet, die Manöver und wahrscheinliches Verhalten der Anderen erkennen lässt. Ggf. unter schneller Voraussimulation in die nahe Zukunft (wenige Sekunden) wird die Situation vor dem Hintergrund der eigenen Absichten erfasst. Auf dieser Basis wird entschieden, ob das laufende eigene Verhalten beibehalten werden kann oder ob auf ein neues umgeschaltet werden muss. Nur im Fall einer erforderlichen Verhaltensänderung wird aus dem aktuellen Reservoir ein neues ausgewählt. Die Information hierzu wird in symbolischer Beschreibung an die 4-D Ebene (Pfeil rechts nach unten) weitergegeben, wo sie mit prozeduralen Methoden im schnellen Arbeitstakt dieser Ebene umgesetzt wird.

Üblicherweise werden Vorsteuerungen mit überlagerter Rückkopplung (nach einer gewissen Zeit nach Start des Manövers) eingesetzt, um fast immer vorhandene Störungen gleich auf der unteren Ebene abzufangen (rechter Bereich auf der 4-D-Ebene im Bild). Auf der oberen Ebene wird das Verhalten durch Beobachtung der entsprechenden



**Bild 13:** Gesamtsystem-Architektur zum erwartungsbasierten, multifokalen, sakkadischen Sehen (s. Text)

Daten in der DOB überwacht. Die zentrale Säule im oberen Teil des Bildes stellt die Entscheidungsinstanz dar, die auf der Basis der Zuarbeit durch die peripheren Prozesse die Entscheidungen über das Systemverhalten trifft. Bei widersprüchlichen Daten kann sie die Überprüfung der Wahrnehmung durch Blickzuwendung mit einer höher auflösenden Kamera veranlassen.

Die Zukunft muss zeigen, bis zu welchem Intelligenzgrad diese kognitive Architektur ausgebaut werden kann. Gegenüber ‚Künstlichen Neuronalen Netzen‘ hat sie den Vorteil, dass wesentliches Wissen über das Verhalten von Objekten/ Subjekten in Raum und Zeit explizit einprogrammiert und mitgegeben werden kann. Dies geschieht jedoch in einer Form, dass es aus eigener Beobachtung heraus (Er’fahrung‘!) sich ändernden Bedingungen angepasst werden kann.

Bild 14 mit der Darstellung des internen Repräsentationsumfangs über der Zeitachse soll dies darstellen:

Das System nimmt zum Zeitpunkt ‚Hier und Jetzt‘ (vertikale Dreifach-Linie) Sensordaten auf und analysiert diese mit Hilfe von Hintergrundwissen aus dem Langzeitgedächtnis; aus den beobachteten Merkmal-Verteilungen werden Objekt-Hypothesen aufgestellt und die Relativzustände geschätzt. Diese dienen als Basis für die Verhaltensentscheidung und die erwartete

Entwicklung der Situation (Vorhersage). Wegen der freien Entscheidungen anderer Subjekte und der nicht vorhersehbaren Störungen sind die Vorhersagen i.A. nur für kurze Zeiten tragfähig. Aus der ständigen Verfolgung der Vorhersagefehler kann eine Verbesserung der Modelle und ihres Gültigkeitsbereichs abgeleitet werden (Block unten links).

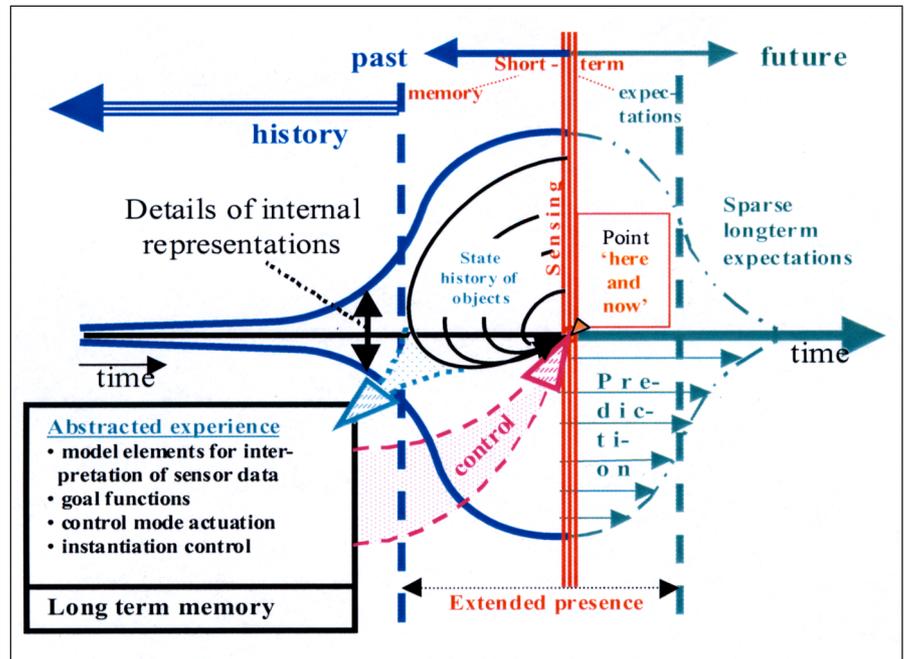


Bild 14:  
Repräsentationsumfang einer dynamischen Szene über der Zeit

Ein Speichern aller extern gemessenen und intern erzeugten Daten erscheint wegen des riesigen Datenumfangs nicht sinnvoll; die Reduktion auf generische Modelle, Situationsklassen und stereotype Verhaltensweisen von Mitgliedern spezifischer Subjektklassen ist der ökonomischere Weg. Dieses dem Men-

schen geläufige Raster soll auch für technische Systeme als Basis für weiteres Lernen und Verhaltensentwicklung dienen. In dem als ausgedehnte Gegenwart (extended presence, vom Umfang her einige Sekunden) gekennzeichneten Bereich findet diese intensive Interaktion zwischen Messdaten und Hinter-

grundwissen statt. Die Auswertung zwecks Modellverbesserung kann auch nachträglich erfolgen, wenn die momentane Situation alle Rechenkapazität zur Bewältigung der aktuellen Aufgaben erfordert (für weitere Einzelheiten siehe folgende Abschnitte und angegebene Referenzen, S. 104 - 115).

*A survey on the method and the experimental results achieved with the 4-D approach until 1995 is given in the videofilm*

**<Maschinen lernen Sehen>**

**(Vehicle>s learn to see)**

**(~ 15 minutes)**

*which was put together for the 20th anniversary of the existence of the ,Institut für Systemdynamik und Flugmechanik‘ (ISF) in 1995. Thanks to Prof. Pietro Perona, the English synchronization was done by NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, in 1996 during a visiting professorship at the California Institute of Technology.*

# Das Hardware-Konzept zur Bildfolgenverarbeitung

Ende der 70-er Jahre standen als Mikroprozessoren gerade die 8-bit-Prozessoren zur Verfügung; bei den erschwinglichen Prozessrechnern war man bei 16 bit Wortlänge angelangt. Da die Digitalisierung des Videosignals in der Regel mit 8 bit als Festkommawort erfolgt, wären 16-bit-Prozessoren für die erste Stufe der Bildverarbeitung angemessen. Mit den damals (und auch heute noch) verfügbaren Rechenleistungen war und ist es nicht möglich, das vollständige Bild mit einem einzigen Prozessor in Echtzeit zu verarbeiten. Deshalb wurde vom Autor 1976 das Konzept entwickelt, nur für die Aufgabenstellung relevante Unterbereiche des Bildes, sogenannte "Fenster" von anpassbarer Rechteckform, als Ausschnitte weiterzuverarbeiten. Diese auszuwertenden Fenster sollten im Videotakt über das Gesamtbild verschoben werden können, so wie die aktuelle Information im Bild es gerade erfordert. Die Steuerung sollte vom interpretierenden Programm aus erfolgen.

Es wurde über zwei Jahre vergeblich versucht, einen Hersteller von

Videogeräten oder Rechnern zu finden, der die Hardware für dieses Konzept liefern könnte. Letztlich gelang es, Herrn Kollegen Graefe von unserer Fakultät zu gewinnen, dieses Konzept in die Realität umsetzen zu helfen. Er steuerte die Idee bei, jedem Auswertefenster einen eigenen Mikroprozessor zuzuordnen, der in diesem Bereich die Bildauswertung besorgt. Dies führte zum Einzelgerät BVV\_1 (s. Bild 17), das auf dem 8-bit-Mikroprozessor Intel 8085 beruhte, und das als der Beginn einer der erfolgreichen Echtzeit-Bildverarbeitungsentwicklungen weltweit angesehen werden muss. Der digitale Datenbus zur Verteilung der Bilddaten ('Videobus') und die Fenstertechnik haben viele Nachahmer gefunden. Das Konzept hat sich bestens bewährt und ist bis heute, wo man entsprechende Systeme am Markt kaufen kann, mit kleinen Variationen das gleiche geblieben. Details dieser Entwicklung sind in [Dickmanns, Graefe, 88] und den dort gegebenen Referenzen zu finden.

Das BVV\_2, das auf 16- und später 32-bit-Mikroprozessoren Intel 80x86 beruhte, wurde in mehreren

Exemplaren gebaut und in der zweiten Hälfte der 80-er Jahre auch bei Industriepartnern eingesetzt.

In der Zeit von 1990 bis 1997 wurden als Hardware-Basis Transputer-Systeme (T2xx und T8xx) mit bis zu 60 Prozessoren verwendet, die ein günstiges Preis / Leistungsverhältnis bei 32 bit Wortlänge und mit ihren vier Kommunikationskanälen zu benachbarten Prozessoren eine günstige Skalierbarkeit aufwiesen. Für das Einspeisen von Videodaten war ein spezieller Transputer Image Processing (TIP-) Bus entwickelt worden, der unseren Bedürfnissen genau entsprach. Mit diesem System wurde die Abschlussdemonstration für das Prometheus Projekt 1994 durchgeführt. Als Programmiersprache wurde in dieser zweiten Generation von Systemen C verwendet. Leider kam die Nachfolgegeneration T 9000 nicht mehr rechtzeitig auf den Markt, so dass nach einer Übergangszeit mit gemischten Power\_PC/Transputer-Systemen für die dritte Generation wieder Intel-PC-Prozessoren, nun der Pentium-Klasse, gewählt wurden. Inzwischen war die Leistungsfähigkeit der 'General-Purpose'-

---

Mikroprozessoren so weit gestiegen, dass der Bildeinzug und eine breitbandige Kommunikation zwischen den einzelnen Prozessoren des Multi-Rechner-Systems ‚von der Stange‘ gekauft werden konnte. Im Übrigen reichte 1997 die Rechenleistung eines einzelnen Prozessors zur Straßenerkennung aus [Gregor et al. 97].

An dieser Stelle ist vielleicht die Anmerkung angebracht, dass von den gut einem Dutzend in USA und anderswo verfolgten massiv parallelen Rechnerarchitekturen mit einem Prozessor hinter jedem Bildpunkt, zu diesem Zeitpunkt keine einzige mehr als Konkurrent für das dynamische Sehen nach unserem Ansatz übrig geblieben war. Die hohe Kommunikationsbandbreite technischer Systeme hat zu völlig anderen Architekturen als in biologischen Systemen üblich geführt. Außerdem ist für Bilder, die aus Blickrichtungen in etwa parallel zum Untergrund gewonnen wurden, die homogene Datenverarbeitung über größere Bildbereiche wegen der stark variierenden Tiefe nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Dies ist in unserem Ansatz mit parallel gewonnenen multifokalen Bildern mit

nochmals unterteilten, spezifischen Auswertebereichen von Anfang an berücksichtigt worden.

In der neuesten (3.) Generation von Systemen zum dynamischen maschinellen Sehen ist die Abstufung der Brennweiten noch um einen Schritt weiter getrieben worden. Es kann nun im Nahbereich ein Gesichtsfeld von über 100° erfasst werden, während gleichzeitig die Auflösung in einem Zentralbereich um den Faktor drei gesteigert wurde. In etwa 300 m Entfernung entspricht ein Pixel in dieser Kamera einer Strecke normal zur optischen Achse von 5 cm. Damit ergibt sich natürlich ein kleines Gesichtsfeld, das dem Bedarf entsprechend von einer Aufmerksamkeits-Steuerung an die interessierende Stelle verschoben werden muss. Dieses sakkadische Sehen mit foveal-peripherer Differenzierung der Auflösung entspricht dem Wirbeltierauge (im Prinzip).

Zusammen mit der inertial / visuellen Datenfusion und der objektorientierten Programmierung in C++ sind damit die Eckdaten für das System EMS-Vision gegeben: E steht für Erwartungs-basiert (4-D-Ansatz

mit Prädiktion, nun z.T. auch basierend auf inertialen Messdaten); M kommt von Multifokal, und S deutet auf die Sakkadische Szeneninterpretation hin, die ganz wesentlich durch die Repräsentationen entlang der Zeitachse gestützt wird.

In der Transputerphase von 1990 bis 1996 konnte die Grundstruktur der objektorientierten Merkmalerfassung mit Rückkopplung der Vorhersagefehler beibehalten werden. Mit der EMS-Realisierung konnte 1999 das ursprüngliche Konzept zuletzt auf marktüblichen Komponenten preiswert realisiert werden. (Weitere Einzelheiten zum Hardwarekonzept sind im Abschnitt ‚Hardware‘ weiter unten zu finden.)

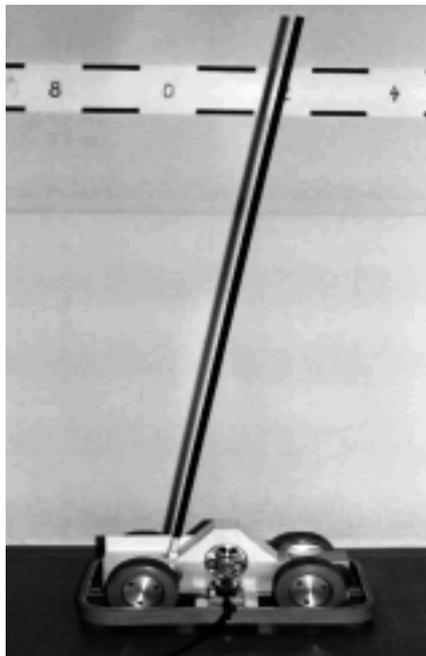
In den folgenden Abschnitten werden die durchgeführten Arbeiten in den einzelnen Anwendungsgebieten im Überblick dargestellt; dabei wird das 4-D-Verfahren, das als Kern allen speziellen Rechnerprogrammen zugrunde liegt, weiter verdeutlicht. Am Ende dieses Kapitels soll der erzielte Entwicklungsstand festgehalten und ein Ausblick auf die nächsten Ausbauschritte gegeben werden.

# Experimentelle Ergebnisse

## Der balancierte Stab, das Stab-Wagen-System (SWS)

### (Objekt-Erkennung auf der Zeitachse)

Bild 15 zeigt den kleinen Elektrokarren (ca. 7 kg Masse, 30 cm Länge) mit dem Lagerpunkt für Stäbe unterschiedlicher Länge. Stablängen zwischen 0,4 und 2 Metern wurden untersucht. Die Leistung des Scheibenläufermotors erlaubt



**Bild 15:**  
Stab-Wagen-System (SWS)

eine maximale Beschleunigung von etwa  $8 \text{ m/s}^2$  (0,8-fache Erdbeschleunigung). Der Abstand zwischen Wagen und Kamera war ca. 4 m; die aus der translatorischen Geschwindigkeit entstehende Verschmierung im Bild bei einer Integrationszeit von 20 Millisekunden (ms) pro Halbbild betrug bis zu 12 Bildpunkte (engl. 'picture elements', kurz 'Pixel' oder 'pel'). Es mussten spezielle Bildverarbeitungs-Algorithmen entwickelt werden, um diese Verschmierungseffekte beherrschen zu können<sup>1</sup>. Die vier markierten kleinen Bereiche in Bild 16 zeigen an, in welchen Bildbereichen die Auswertung im 100-ms-Takt erfolgte. Zwei Auswertefenster wären hinreichend, um die Position des Wagens und die Drehlage und Position des Stabes zu ermitteln, wenn die Geometrie des Aufbaus bekannt ist. 1982 wurde dieses dynamische Echtzeitsehen zur Überraschung aller Teilnehmer auf einer nationalen Konferenz live vorgeführt. Das BVV\_1 war zu diesem Zweck mit

drei 8-bit-Mikroprozessoren ausgestattet, von denen zwei die Bilddaten aus je einem Fenster in der Nähe des Fußpunktes und bei zwei Drittel der Stablänge (von unten aus gemessen), dem sogenannten Stoßzentrum des Stabes, erfassten, während der Dritte aus diesen Messdaten die Ansteuerung des Wagens mit einem Zustandsregler inklusive reduziertem Beobachter berechnete. Dies war der Beginn einer Erfolgskette zur Demonstration der praktischen Möglichkeiten des maschinellen Sehens mit minimaler Rechenkapazität, aber einer vollständig integrierten Datenerfassung und -verarbeitung mit Hilfe hochwertiger Modellvorstellungen in Raum und Zeit [Meissner, 82].

Das häufige Durchlaufen der beiden entgegengesetzt gerichteten Schleifen 'datengetrieben bottom-up' und 'modellgetrieben top-down' zehnmal pro Sekunde mit einer natürlichen Ausmittelung der Fehler über die Modellanpassung hat sich als

<sup>1</sup>Haas, G.: Meßwertgewinnung durch Echtzeitauswertung von Bildfolgen. Dissertation, Fachbereich LRT, HSBw München, 1982

sehr effizient erwiesen. Wegen möglicher Störungen wurde in der Regel zweifach redundant gemessen. Bild 16 zeigt willkürlich eingebrachte Störungen mit einem zweiten Stab, der genau so aussieht wie der Balancierte. Dieses Experiment brachte eine wesentliche Einsicht in die Bedeutung der Modellierung entlang der Zeitachse: Durch die Vorhersage der erwarteten Position der Merkmale im Bild konnten jene Fenster, die den von Hand geführten Störstab erfasst hatten, automatisch wieder auf den balancierten Stab zurückgesetzt werden. Damit war die Möglichkeit der Objektunterscheidung rein durch den Bewegungsablauf bei gleicher Erscheinung im Bild nachgewiesen. Dieser Aspekt der Kontinuität in der zeitlichen Einbettung wird selbst heute noch von vielen Forschern im Bereich des maschinellen Sehens nicht hinreichend gewürdigt. Er kommt nur zum Tragen, wenn die Modellierung im 4-D-Kontinuum von Raum und Zeit erfolgt und nicht in der Bildebene.

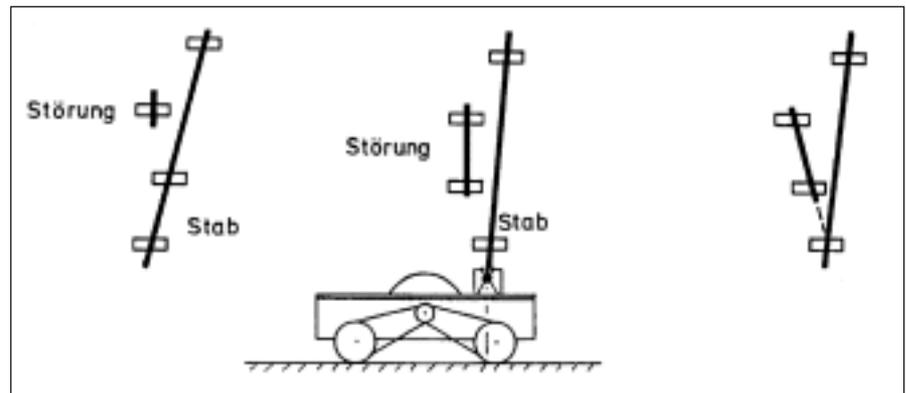
Die Balance von Stäben der Länge 2 m bis herunter zu 0,4 m konnte

beherrscht werden [Meissner, 82; Wünsche, 84]. Bei letzteren gelang dies wegen der hohen Eigenfrequenz von 1 Hz nur mit Zykluszeiten von 40 ms, die in einer späteren Phase mit einem Prozessrechner VAX 750 möglich geworden waren [Wünsche, 87].

### Beobachter oder Schätzer

Alle anfänglichen Arbeiten mit den räumlich / zeitlichen Modellen wurden auf der Basis des Luenberger-Beobachters durchgeführt, der von deterministischen Zusammenhängen ausgeht; die Erfahrungen damit waren nicht schlecht. Trotzdem wurde wegen der stochastischen Natur mancher Störungen ab 1982

von Wünsche das Kalman Filter zum Vergleich untersucht. Es versprach bessere Ergebnisse bei komplexeren Problemstellungen wie z.B. dem Andocken von Fahrzeugen mit einem zusätzlichen translatorischen Freiheitsgrad (2-D) und mit wesentlich komplexerer Bildverarbeitung. Das Ergebnis war die Grundsatzentscheidung, in Zukunft nur noch die stochastische Formulierung zu verwenden [Wünsche, 84] und möglichst die Messdaten direkt in diesen Interpretationsprozess einzuführen (ohne vorherige Verrechnung mit anderen Messdaten zu Zwischengrößen mit der entsprechenden Verwischung der Fehlerstatistiken).



**Bild 16:**  
Verkräften von Störungen mit visuell gleichem Stab aufgrund der zeitlichen Modellvorstellung

# Andocken eines Luftkissen-Fahrzeugs

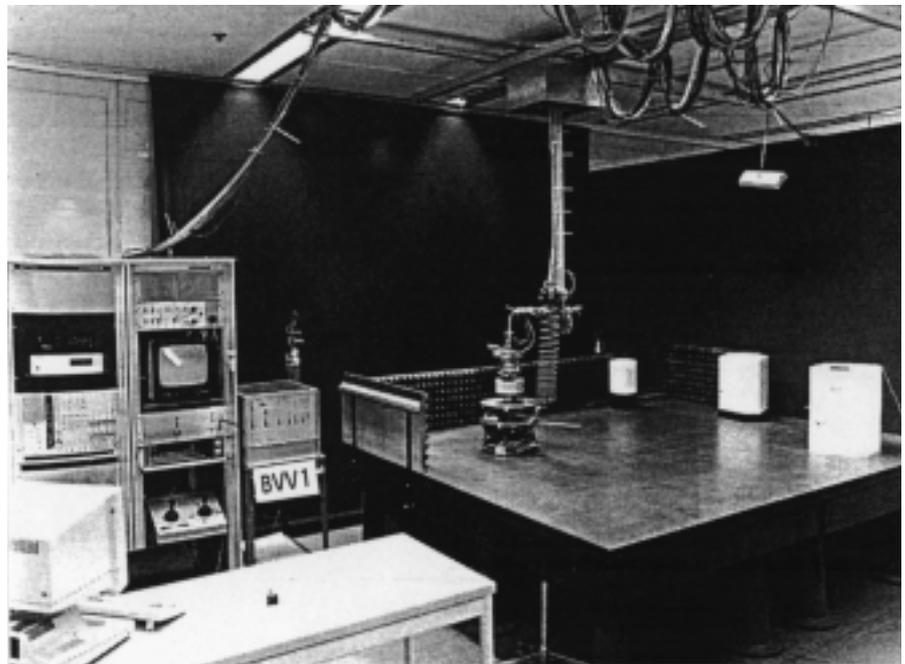
## Zweidimensionale Satellitenmodellregelstrecke

Bild 17 zeigt den Aufbau der Versuchsanlage im Labor. Das als 'Satellitenmodell' interpretierte Luftkissenfahrzeug schwebt nahezu reibungsfrei auf einem wenige Bruchteile von Millimetern dicken Film von Luft, die an der Unterseite des Fahrzeugs an drei Stellen ausgepresst wird. Zusätzlich kann der Steuerrechner, der die Bildmessdaten interpretiert, die Ventile von sechs Paaren von ebenfalls Druckluft betriebenen Reaktionsantrieben öffnen und schließen, die wiederum paarweise in entgegengesetzte Richtungen am Fahrzeug montiert sind. Damit können zwei orthonormale Linearbeschleunigungen und eine Rotationsbeschleunigung um die Hochachse aufgebracht werden, jeweils positiv und negativ.

Auf dem Fahrzeug ist eine CCD-Fernsehkamera montiert, die in Richtung des Andock-Mechanismus schaut. Aufgabe dieses Modellsystems zur Entwicklung der Fähigkeit zum autonomen Andocken in der Raumfahrt mittels Rechnersehen war es, in der Umgebung den richtigen Andockpartner zu fin-

den, auf ihn zuzufahren und dabei die richtige Andockstelle zu erkennen, sowie ggf. in einem vorgegebenen Abstand soweit um den Andockpartner herumzufahren, dass der endgültige 'Anflug' zum mechanischen Docken auf einer geraden Bahn mit möglichst großer Sicherheit erfolgen konnte. Diese

Aufgabe wurde von Wünsche in hervorragender Weise gelöst, wobei die Grundelemente des heutigen 4-D-Verfahrens erarbeitet wurden [Wünsche, 88]. Die Objekterkennung war auf konvexe polyedrische Objekte bekannter Form und Größe beschränkt, die als Drahtmodelle einschließlich Eckpunkten und Flä-



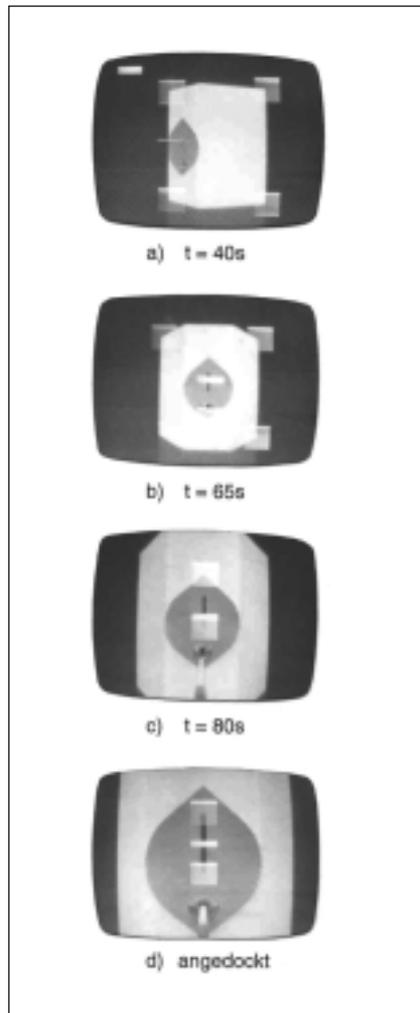
**Bild 17:**  
Gesamtansicht von der Luftkissenfahrzeug-Versuchsanlage (Satellitenmodellregelstrecke)

chen im Rechner repräsentiert wurden. Demonstriert wurden in den Jahren 1985 bis 88 folgende Fähigkeiten des Systems:

- In der Initialisierungsphase: Erkennen eines bestimmten Andockpartners aus einer Menge von (bis zu 10) Kandidaten unter unbekanntem Aspektbedingungen über Bildverarbeitung.

- Übergang in den Tracking-Modus mit automatischer Eckenverfolgung, bei der vier Mikroprozessoren des BVV\_1 je eine Ecke automatisch in ihrem Fenster zentriert halten; der Algorithmus zur Eckenerkennung stammt von Kuhnert<sup>1</sup>. Der Auswerteprozess bestimmt automatisch die am besten geeigneten Ecken aus den momentanen Sichtbarkeitsbedingungen und den Werten der Elemente der Jacobi-Matrix. Hiermit konnte eine beachtliche Steigerung der Robustheit gegen Störungen erzielt werden.

- Rekursive Zustandsschätzung mit acht Zustandsvariablen; hierin ist ein Kameraparameter des Weitwinkelobjektivs enthalten,



**Bild 18:** Ansichten während des Andockvorgangs mit Markierung der ausgewerteten Bildbereiche zur optimalen Schätzung der Relativlage

der in Abhängigkeit vom Abstand stark schwankt. Es wurde eine sequentielle Verarbeitung des Messvektors eingeführt, um höhere Rechengeschwindigkeit zu erreichen (7 Hz) und die von Messung zu Messung schwankende Zahl der Messwerte problemlos verarbeiten zu können.

- Umfahrung des Andockpartners mit Blickfixierung auf den Merkmalschwerpunkt; während der Umfahrung können Merkmale verdeckt und andere entdeckt werden, ohne das System zu irritieren. Bei Erkennung der Andockstelle in einer symmetrischen Umgebung ist die Endanflugrichtung erreicht.

- Zum Endanflug wird ein fünfter Prozessor und Bildausschnitt hinzugenommen, der nach dem Kimme-und-Korn Prinzip die Abbildung eines in Abstandsrichtung vorstehenden Stabes relativ zu speziellen Eckenmerkmalen verfolgt (Bild 18).

Hiermit gelang ein genauer Endanflug mit fünf 8-bit-Mikroprozessoren Intel 8085, einer VAX 750 und

<sup>1</sup>Kuhnert, K.D.: Zur Echtzeit-Bildfolgenanalyse mit Vorwissen. Dissertation, Fakultät für LRT, UniBw München, 1988

einer Bildauswerte- und Steuerungsfrequenz von 7 Hz. Diese Leistung im dynamischen Sehen mit echter Hardware war damals konkurrenzlos. Sie erreichte 1986 und 1987 zusammen mit den nachfolgend diskutierten Ergebnissen auf dem Gebiet der visuellen Führung von Straßenfahrzeugen auf nationalen und internationalen Kongressen großes Aufsehen; diese Ergebnisse haben wesentlich dazu beigetragen, dass der Kalman-Filter-Ansatz mit physikalisch begründeten dynamischen Modellen zunehmend Interesse im maschinellen Sehen fand. Er hat sich zwischenzeitlich als effizientes Verfahren zur kontinuierlichen Verarbeitung von Bildfolgen in Echtzeit weltweit durchgesetzt, auch wenn der Name '4-D-Ansatz' nicht übernommen wurde. Da es viele Varianten von Kalman-Filter-Ansätzen in der Bildebene und anderen, nicht physikalisch begründeten Bezugssystemen gibt, wird die Beibehaltung der besonderen Kennzeichnung '4-D-Ansatz' vor allem in Richtung auf autonom mobile Systeme propagiert, da sich damit ein durchgängiges Referenzsystem (3-D-Raum und Zeit) für alle

Schritte der Informationserfassung und -verarbeitung ergibt, das auf handlungsbezogenes Wahrnehmen in der realen Umwelt ausgerichtet ist.

### **Weiterentwicklung der visuellen Andockfähigkeit**

Im Auftrag eines industriellen Partners wurde die Übertragung des erarbeiteten Lösungsansatzes auf reale Satellitenbahnen im Weltraum untersucht. Zunächst konnte nachgewiesen werden, dass nach Linearisierung der relevanten Bewegungsgleichungen um die Bezugsbahn die Bahnmechanik in zwei weitgehend entkoppelte Teile zerfällt [Otto, 89]: Die Bewegung in der Umlaufebene ist in erster Näherung unabhängig von der Bewegung normal zu dieser Ebene; damit können die mit dem Luftkissenmodell erarbeiteten Ergebnisse durch leichte Modifikation der Regelungsgesetze direkt auf den realen Fall übertragen werden. Für die Regelung der Bewegung normal zur Bezugsbahn wurden optimale Zustandsrückkopplungen entwickelt und in einer Rechnersimulation validiert. Die Ergebnisse dieser Simu-

lationen wurden auf einer Graphik-Workstation für den Fall des geostationären Nachrichtensatelliten TD1 und den damals geplanten Man-Tended-Freeflyer der ESA visualisiert [Fagerer, 89].

# Führung von Straßenfahrzeugen

---

Dieses Thema, das zunächst nur aufgegriffen wurde, weil die Bearbeitung der vollen sechs Bewegungsfreiheitsgrade bei Luft- und Raumfahrtproblemen als für den Anfang zu schwierig eingestuft wurde, hat sich als langjähriger Arbeitsschwerpunkt am Institut ergeben. Die Bewegung an einer glatten Oberfläche hat nur drei Freiheitsgrade: Zwei Translationen entlang der Oberfläche und eine Rotation um die Normale zur Oberfläche. Im Gegensatz zum Luftkissenfahrzeug sind diese drei Bewegungen bei Radfahrzeugen nicht entkoppelt, sondern durch die Radlenkung in systematischer Weise verkoppelt, wobei Drehungen und seitlicher Versatz nur bei vorhandener Längsbewegung auftreten können; man unterscheidet daher die (unabhängige) Längsbewegung mit den Steuerorganen Gas und Bremse, und die Seitenbewegung oder Querführung mit der Steuergröße Lenkwinkel (direkt am Rad oder am Lenkrad). Auf einer gekrümmten Oberfläche (und bei jeder Art von Beschleunigung) führt das Fahrzeug im allgemeinen natürlich auch Bewegungen in allen sechs Freiheitsgraden aus; diese wurden zunächst vernachlässigt.

Das Nicken bei Längsbeschleunigungen musste später als erstes mit hinzugenommen werden, da es merklichen Einfluss auf die vertikale Blickrichtung der Kamera hat und die Vorausschauweite im Bild stark beeinflusst. Ende der 80-er Jahre wurde dann die niederfrequente vertikale Krümmung in hügeliger Landschaft mit erfasst [Mysliwetz, 90]. Mit der stark gestiegenen Rechenleistung an Bord kann heute auch die höherfrequente Oberflächenstruktur erkannt werden [Dickmanns, Baten, 95].

Im Rahmen einer deutsch/amerikanischen Zusammenarbeit, Projekt „AutoNav“ mit den Partnern Army Research Lab. (ARL), Aberdeen, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburgh, und der Sarnoff-Corporation, Princeton, erhielten wir Zugang zu den leistungsfähigen Spezialprozessoren des „Visual Front End“-Rechnersystems VFE 200 von Sarnoff. Hiermit konnte im Jahr 2000 zum ersten Mal Stereosehen auf texturierter Oberfläche in Echtzeit demonstriert werden. Als weiteres „First“ für VaMoRs gelang im September 2000 die Erkennung eines

60 cm breiten Grabens unter verschiedenen Anfahrwinkeln bei Geschwindigkeiten bis 10 Meilen pro Stunde (16 km/h) auf einer Grasoberfläche. Die Entdeckung dieser „negativen Hindernisse“ hatte sich im US-amerikanischen Robotikprogramm als besonders schwierig herausgestellt.

Zwischen der Leistungsfähigkeit dieser Rechnersysteme und den ersten Anfang der 80-er Jahre eingesetzt liegt ein Faktor von etwa einer Million!

Von Anfang an wurden die Verhältnisse auf einer Autobahn mit

- nur einer Fahrtrichtung, kein Gegenverkehr
- wertemäßig begrenzter horizontaler und vertikaler Bahnkrümmung
- standardisierter Spurbreite und -kennzeichnung
- keinen ebenerdigen Kreuzungen und
- begrenzten Arten von Fahrzeugen bei einer festgelegten unteren Grenzgeschwindigkeit

als besonders einfach erkannt; die hohen Fahrgeschwindigkeiten bilden gegenüber der viel schlechter strukturierten visuellen Umgebung auf anderen Straßen und vor allem in der Stadt ein vergleichsweise einfaches Problem für einen regelungstechnisch basierten Ansatz. Diese Vorgehensweise hat sich voll bewährt. Zunächst stand die Erkennung der freien Fahrbahn ohne Hindernisse im Vordergrund. Sie lässt sich allerdings wegen der visuellen Verkopplung über die im Fahrzeug montierte Kamera und die perspektivischen Abbildungsgleichungen nicht von der Erkennung des relativen Eigenzustands trennen. Diese Aufgabenstellung dominierte das erste Jahrzehnt der Beschäftigung mit der Thematik des sehenden Fahrzeugs ab 1977.

## Fahrbahnerkennung

### Anfängliche Pionierleistungen

Zu jener Zeit gab es keinerlei Hinweise in der Literatur, wie eine solche Problemstellung anzugehen sei. Erwartungsgemäß wurde nicht gleich die optimale Formulierung und Vorgehensweise gefunden. Die

ersten Ansätze sind in der Dissertation von Meissner belegt [Meissner, 82]. Erstmals in der dann schon weltweiten Aktivität auf diesem Gebiet wurde von uns Mitte der 80-er Jahre die differentialgeometrische Beschreibung der Skelettlinie als Klothoide, wie sie dem Bau von Schnellstraßen als Norm zugrunde liegt, in die Ansätze zur visuellen Fahrbahnerkennung eingeführt. Dies resultierte, zusammen mit den inzwischen am Institut zum Standard gewordenen rekursiven Schätzverfahren auf der Basis des erweiterten Kalman Filters, in einer sprunghaften Steigerung der Erkennungsleistung sowohl hinsichtlich der Geschwindigkeit als auch der Erkennungsgüte [Dickmanns, Zapp, 86]. Mit der gesteigerten Rechenleistung des BVV\_2, das auf 16-bit-Prozessoren Intel 8086 [Dickmanns, Graefe 88] beruhte, und der Einführung der ‘Gestaltidee’ eines gekrümmten Fahrbahnbandes konstanter Breite, das perspektivisch abgebildet wird und auf dem sich das Fahrzeug mit bekannten Steuerungseingaben bewegt, ergaben sich wirklich zufriedenstellende Erkennungsleistungen auch bei Störungen

durch Schlagschatten von Bäumen und Gebäuden auf der Fahrbahn [Mysliwetz, Dickmanns, 87].

Im Jahr 1985 wurde das Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen (VaMoRs) geordert; der Umbau bei einer kleinen



Bild 19: VaMoRs

Elektro-/Mechanik-Werkstatt dauerte bis in das Jahr 1986. Nach Einrichtung der Rechner und Inbetriebnahme des Gesamtsystems einschließlich Parameteridentifikation unter der Leitung von A. Zapp konnte im Herbst 1986 mit autonomen Fahrten im abgeschlossenen Gelände der UniBwM begonnen werden.

Bild 19 zeigt VaMoRs in der zweiten Ausbaustufe mit dem Außenkühler (oben hinten) und der Montage der Kameras auf einer Zweiaxsen-Plattform am Kabinendach vor dem Rückblicksiegel. Zunächst war eine wesentlich größere Version für die damals noch großen CCD-Kameras mittig auf dem Armaturenbrett angebracht.

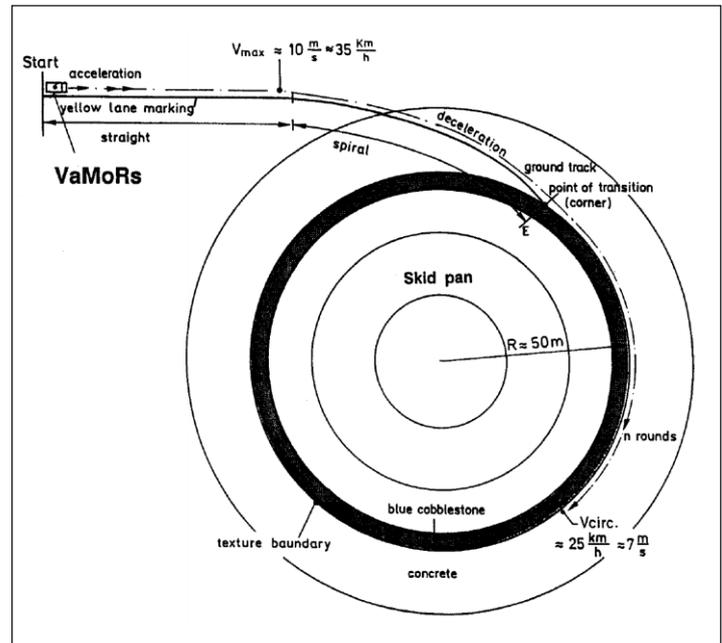
Nach einer anderthalbjährigen Anlaufphase begann ab 1986 die Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Daimler-Benz im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes 'Autonome Mobile Systeme'; im Dezember 86 wurde VaMoRs bereits vor einem Vorstandsmitglied auf dem Versuchsgelände in Stuttgart in der Rutschpfanne vorgeführt. Das Fahrzeug stand zu Beginn in etwa parallel und nahe einer weißen Linie auf einer Fahrbahn, die in die Rutschpfanne führte (Bild 20).

Auf ein Startzeichen des Sicherheitsfahrers hin beschleunigte es selbstständig auf 10 m/s (36 km/h), während es in einem vorgegebenen Abstand entlang der Linie fuhr.

Diese Linie ging beim Einlauf in die Rutschpfanne in eine sich verengende Spirale mit abnehmendem Krümmungsradius über und endete fast tangential an einen Kreis, der durch unterschiedlich dunkle Bodenbeläge (Basaltplaster, dunkel) und (Beton, hell) deutlich sichtbar, aber ansonsten nicht besonders gekennzeichnet war.

Mit Erkennung der Linienkrümmung drosselte VaMoRs automatisch die Geschwindigkeit, so dass die Querschleunigung einen vorgegebenen Wert (0,2-fache Erdbeschleunigung) nicht überstieg.

Nach Erreichen der Bodenbelagskante in der Pfanne fuhr VaMoRs mit dem zum Kreisradius und zum eingestellten Grenzwert der Querschleunigung passenden Geschwindigkeitswert solange im Kreis, bis der Fahrer das Zeichen zum Abbruch gab. Der stationäre Zustand, der sich hierbei einstellte, erlaubte eine einfache Überprüfung



**Bild 20:** Erste autonome Demonstrationsfahrten von VaMoRs auf der Einfahrbahn der Fa. Daimler-Benz AG in Stuttgart im Herbst 1986

der Erkennungsleistung. Mit diesem Experiment war weltweit zum ersten Mal eine verkoppelte Längs- und Querführung mit einem sehenden Straßenfahrzeug demonstriert worden.

Eine Begebenheit an einem späten Winternachmittag sei hier kurz wiedergegeben, um die Tücken und unerwarteten Probleme in natürlicher Umgebung aufzuzeigen: Die Sonne stand tief, so dass das Fahrzeug einen langen Schatten warf; bei dem Fahren entlang der Belagsgrenze ergab sich die Situation, dass der Schatten des Fahrzeugs plötzlich genau tangential an die Helligkeitskante der Beläge verlief. Da damals stets die Merkmale mit dem größten Gradienten in der Helligkeit im Bild ausgewählt wurden, die Schattengrenze aber ausgeprägter war als der Unterschied in der Helligkeit zwischen den Belägen, fuhr VaMoRs plötzlich entlang seiner eigenen Schattengrenze geradeaus! Der Sicherheitsfahrer - völlig überrascht - griff ein und schaltete die Automatik ab; erst die nachträgliche Analyse machte klar, was geschehen war.

### **VaMoRs fährt Geschwindigkeitweltrekord**

Im Jahr 1987 stand uns ein Stück Autobahn von über 20 km Länge bei Dingolfing mit freundlicher Unterstützung durch die Autobahndirektion Süd zur Verfügung, das wegen einer fehlenden Brücke noch nicht an das öffentliche Netz angeschlossen war. Auf diesem Abschnitt konnte die Fähigkeit zum autonomen sichtgeregelten Fahren mit höheren Geschwindigkeiten erprobt werden. Im Lauf des Frühjahrs und des Sommers wurde die Höchstgeschwindigkeit schrittweise gesteigert; im August 1987 wurde mit 96 km/h die durch den Motor bedingte Höchstgeschwindigkeit erreicht. Strecken von über 20 km Länge wurden vollautonom zurückgelegt.

VaMoRs war damals das einzige Fahrzeug, das die Fahrbahnkrümmung erkennen konnte und daraufhin die Eigengeschwindigkeit selbsttätig anpasste. Die amerikanischen 'Autonomous Land Vehicle'-(ALV-) Fahrzeuge fuhren im wesentlichen Schrittgeschwindigkeit

und benötigten einige Sekunden zur Bildauswertung, während VaMoRs dies zehnmals pro Sekunde durchführte. Der VW-Bus mit 'Optopilot' leistete nur Querführung bei fester Geschwindigkeit und wertete nur wenige Bildzeilen aus; seine maximal gefahrene Geschwindigkeit lag bei 50 km/h.

Mit der entwickelten Technik wurde von der UniBwM im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes 'Autonom mobile Systeme' ein 10-t-Bus des Industriepartners Daimler-Benz AG ausgerüstet.

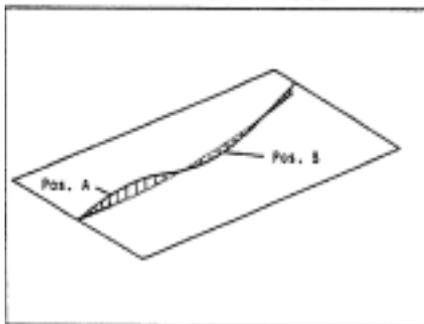
### **Weitere Entwicklung der Fahrbahnerkennung**

Auf dem Gebiet der Erkennung der Fahrbahnkrümmung hat die UniBwM bis heute eine Spitzenstellung. Dickmanns [Dickmanns, 88] und Mysliwetz [Mysliwetz, 90] führten die Realisierung der 'Gestalt'-Idee einer Straße beim maschinellen Sehen durch und konnten damit die Robustheit der Erkennung vor allem in den Bereichen der Fahrbahnen wesentlich erhöhen, die von Bäumen beschattet

waren. Nach der perspektivischen Abbildung einer Fahrbahn konstanter Breite ergibt sich im Bild die Form einer Bleistiftspitze, die verbogen (durch horizontale Krümmung) und verzerrt (durch vertikale Krümmung) erscheinen kann. Mit



3D-Fahrbahnverlauf



**Bild 21:**  
Feldwegszene mit horizontaler und vertikaler Krümmung von Position A aus gesehen. Räumliche Darstellung der erkannten Skelettlinie (unten)

diesem Ansatz gelang erstmals die gleichzeitige Erkennung von horizontaler und vertikaler Krümmung einer Fahrbahn konstanter Breite [Mysliwetz, 90; Dickmanns, Mysliwetz, 92]. Bild 21 zeigt den Blick auf die Teststrecke (a) und die Skelettlinie, die aus den Modellvorstellungen zu den horizontalen und vertikalen Krümmungen beim Überfahren ermittelt wurde. Die Übereinstimmung ist für die Lösung der praktischen Fahraufgabe hinreichend gut; durch die zeitliche Mittelung können mit einem Vorausschaubereich von nur 20 bis 30 Metern Krümmungsradien bis in den Größenordnungsbereich von 500 Metern sicher erkannt werden.

Bei den häufigen Fahrversuchen wurde bestätigt, dass zur Erzielung einer größeren Vorausschauweite ein Teleobjektiv erforderlich ist und dass fest am Fahrzeug montierte Kameras dann wegen des kleinen Blickfeldes keine optimale Lösung darstellen. Andererseits kann man im Nahbereich nicht auf ein größeres Blickfeld verzichten. Hieraus wurde das aktive bifokale Sehen mit zwei Kameras auf einer Platt-

form zur Steuerung der Blickrichtung abgeleitet, das als Konzept schon länger angedacht war. Nachdem Anfang der 90-er Jahre hinreichende Rechenleistung verfügbar war, wurde es auf dem Transputersystem für die Fahrbahnerkennung realisiert [Behringer, 92].

Waren bis dahin alle erfassten Fahrbahnverläufe als zeitvariables Umgebungsmodell relativ zum Fahrzeug konzipiert, so zeigten sich im Bereich von Änderungen in den Fahrbahnparametern wie Wert der Spurweite, Zahl der Spuren, Abzweigungen etc. gelegentlich Probleme. Um diesen zu begegnen, wurden ortsfeste Modelle für die Fahrbahn untersucht; in [Behringer, 95] werden erste Ergebnisse zur Lokalisierung von Segmentgrenzen diskutiert.

Bezüglich Kreuzungen mit platzartigen Verbindungen wurden diese Arbeiten von Lützeler fortgeführt [Lützeler, 00]. Mit der stärkeren Trennung der Vorausschaubereiche bei EMS-Vision wurde – z.T. auch zur Reduzierung der erforderlichen Kommunikationsleistung – auf eine

gestaffelte Fahrbahnrepräsentation übergegangen. Im Nahbereich bis etwa 15 m werden dabei die Fahrbahn und die Spuren durch Geraden markiert, was zu besonders einfachen Verhältnissen führt (Krümmung und deren Änderung über der Lauflänge gleich null). Die seitliche Ablage des eigenen Fahrzeugs und die Blickrichtung relativ zur Straße werden hierbei mitbestimmt.

Auf diesen Daten aufbauend wird dann in den Tele-Bildern die Straßenkrümmung bestimmt. Hierfür werden in größeren Vorausschau-Entfernungen flächenbasierte Bildverarbeitungsalgorithmen eingesetzt, die sich an homogenen Helligkeits- oder Farbbereichen orientieren. Die Entdeckung und Verfolgung dieser Merkmale ist in größeren Entfernungen wesentlich robuster als die Kantendetektion. Hiermit wurde auch die Fähigkeit zur Erkennung von Gabelungen nicht markierter Wege geleistet (s. Bild 22).

In der neuen Szenenrepräsentation in EMS-Vision können der gehärtete Fahrbahnverlauf und die aufge-

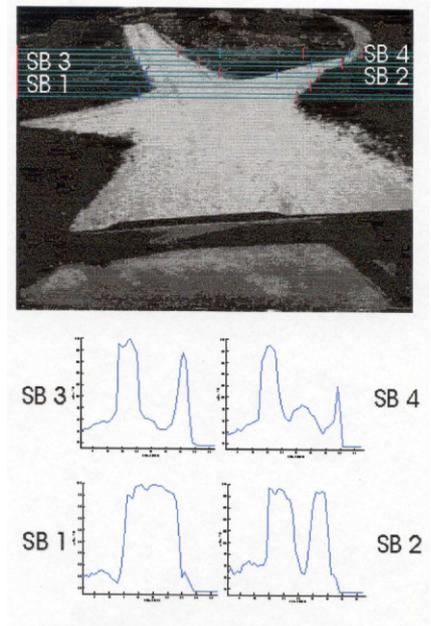
malten Spurmarkierungen sowie die Schultern mit Stützpfehlen, Leitplanken, Schildern etc. getrennt eingehängt und verfolgt werden.

### Erkennung von Querstraßen

Während auf Autobahnen die gesamte Missionsdurchführung über Spurwechsel und Spurfolgen erreicht werden kann, ist für das Fahren auf Landstraßen das Erkennen und Befahren von Abzweigungen ein wesentliches Missionselement. Diese Fähigkeit wurde in den Jahren 90-95 von N. Müller entwickelt [Müller, 92; Müller, Baten, 95]. Bild 23 zeigt ein typisches Ergebnis. Das Erkennungssystem braucht keine genauen Kenntnisse über die aktuellen Parameter der Querstraße, wie Breite und Abgangswinkel, zu haben. Es erkennt diese während der Annäherungsphase, nachdem es an bestimmten Merkmalsätzen wie Kombinationen von Helldunkel-Übergängen oder mittlerem Grau- oder Farbwert einen Kandidaten erkannt zu haben glaubt. Die Blickrichtung wird dann auf die Querstraße fixiert, wobei sich die Kameraplattform in Richtung der

Querstraße dreht, während das Fahrzeug noch geradeaus fährt (Kurve 'vehicle heading' im Bild).

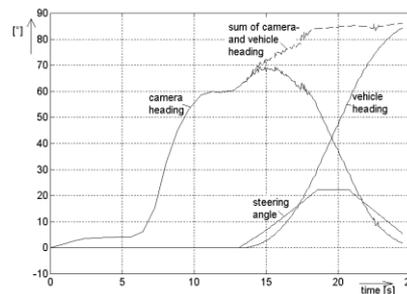
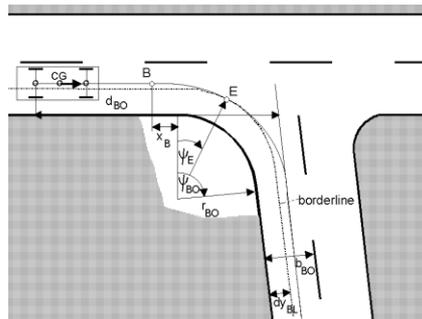
Aus der Richtung der Querstraße relativ zur eigenen Fahrspur wird dann das Kurvenfahrmanöver be-



**Bild 22:** Entdeckung einer Wegegabelung anhand der Helligkeitsverteilung in mehreren Schnitten entlang der erkannten Skelettlinie (unten)

rechnet. Dessen Beginn und die Steuerungsverläufe sind strukturell vorgegeben, die aktuellen Parameter ergeben sich aus den aktuellen Schätzwerten wie Breite der Querstraße und Kurvenradius. Infolge der Blickfixierung auf die Querstraße dreht sich das Fahrzeug nach dem Beginn der Lenkungsaktivierung unter der Plattform weg wieder in die Richtung für Geradeausfahrt, während eine überlagerte Rückführung der seitlichen Ablage das Fahrzeug in die Sollspur der nun zu befahrenden Straße zwingt (vgl. die Kurvenverläufe in Bild 23).

Die Hinzunahme von flächenbasierten Methoden der Bildverarbeitung, die mit den neuen, leistungsfähigeren Mikro-Prozessoren möglich ist, hat die Robustheit der anfänglichen Erkennung der Querstraße verbessert. Das Abbiegen auf beliebige Querstraßen als zentrales Manöver für die Navigation auf Wegenetzen wurde als eines der ersten auch für EMS-Vision implementiert. Hier ist alles erforderliche Wissen objektorientiert in C++ kodiert worden; die Blickrichtungs- und die Fahrzeugsteuerung erfolgen nach einem all-



**Bild 23a) und 23b): Erkennen und Befahren von Querstraßen mit komplexem Blickverhalten**

gemeinen Schema von eigenen Instanzen für die Aufmerksamkeitssteuerung [Pellkofer, 00] und die Fortbewegung [Siedersberger, 00]. Um die Abgangsrichtung der Querstraße möglichst früh genau zu erfassen, wird der hochauflösende Sehbereich mit Sakkaden abwechselnd zwischen der Kreuzung und

einem Punkt weiter in die Querstraße hinein verschoben (ähnlich wie der Mensch das auch macht). Dabei werden wiederum zur Steigerung der Robustheit flächenbasierte Merkmale vermessen [Lützel, 01].

## Erkennung der vertikalen Oberflächenstruktur

Nicht angesprochen wurde bisher die Erkennung des Zustands der Fahrbahnoberfläche. Bei Straßen wurde bisher stillschweigend davon ausgegangen, dass die lokalen Oberflächen im wesentlichen eben sind. Für Autobahnen und Schnellstraßen trifft dies in der Regel zu; für Straßen niederer Ordnung im allgemeinen nicht. Diese können ausgefahrene Spurrinnen und Schlaglöcher haben, die für das sichere Fahren unbedingt erkannt werden müssen.

Auch zum Querfeldein-Fahren ist die Erkennung der vertikalen Oberflächenstruktur eine unabdingbare Voraussetzung. Die Fortschritte auf diesem Gebiet blieben leider hinter den Erwartungen zurück, da die verfügbare enorme Rechenleistung im VFE 200, einem Spezialrechner

unseres amerikanischen Projektpartners Sarnoff Corporation, leider auf dem Gebiet der Datenkommunikation zu den PC hin bis zum Jahr 2000 kein angemessenes Äquivalent hatte (in Hard- und Software). Die grundlegenden Methoden zur Erfassung der vertikalen Oberflächenstruktur wurden von S. Baten erarbeitet.

Die Vorteile des 4-D-Ansatzes sollen auf das binokulare Stereosehen übertragen werden. Der Ansatz



**Bild 24:** Geländewagen GD 300 des BMVg/Industrie-Projektes PRIMUS, der vom ISF mit einem Transputer-basierten Sehsystem mit aktiver Blickrichtungssteuerung ausgerüstet wurde

wird in [Dickmanns, Baten, 95] beschrieben.

Die Algorithmen zur Fahrbahnerkennung wurden in insgesamt acht Fahrzeugen implementiert, zwei der UniBwM, vier der Daimler-Benz Forschung und zwei der DASA-Dornier. Mit einem Geländewagen GD 300 (Bild 24), wurden im Herbst 95 zur Abschlussdemonstration des BMVg-Projektes Primus auf schmalen, nicht asphaltierten Wegen mit ausgefransten Rändern Geschwindigkeiten bis 60 km/h gefahren.

In den Jahren 1997 – 99 wurde für das Industrie-Robotik Programm des BMVg ‚PRIMUS-C‘ ein Sehsystem für die Fortbewegung eines Kettenfahrzeugs ‚Wiesel 2‘ (Bild 25) entwickelt. Das hohe Vibrationsniveau durch das Fahrwerk erforderte eine Anpassung der Algorithmen und die Hinzunahme flächenbasierter Methoden zur Fahrwegerkennung. Auf der Abschlussdemonstration des Industriepartners DASA-Dornier im Juni 1999 fuhr das Fahrzeug mit bis zu 50 km/h voll autonom auf Feldwegen des



**Bild 25:** Kettenfahrzeug ‚Wiesel 2‘, das im Rahmen des Projektes PRIMUS-C mit einem Sehsystem der UniBwM ausgestattet wurde

Versuchsgeländes Pfullendorf. Der im Bild rechts oben vergrößerte Sensorblock für die Fortbewegung enthält die von der UniBwM entwickelt Zweiachsen-Plattform, die zum Schutz vor der Witterung und zur Klimatisierung in einem Glaszylinder untergebracht ist. Dieses Gehäuse wurde von dritter Seite als Spezialentwicklung eingebracht.

# Objekterkennung

*UBM's Two-axis-platform for viewing direction control and the vision algorithms for detecting and tracking contours have also been used in the military robotic projects PRIMUS (A – C) by the company Dornier GmbH. The following film shows a scene with the light tracked vehicle („digital“ version)*

**< Wiesel 2 >**

(~ 1 minute)

*driving at speeds up to 50 km/h on a narrow dirt road at the test site Pfullendorf in 1999*

## Hindernisse auf der Fahrbahn

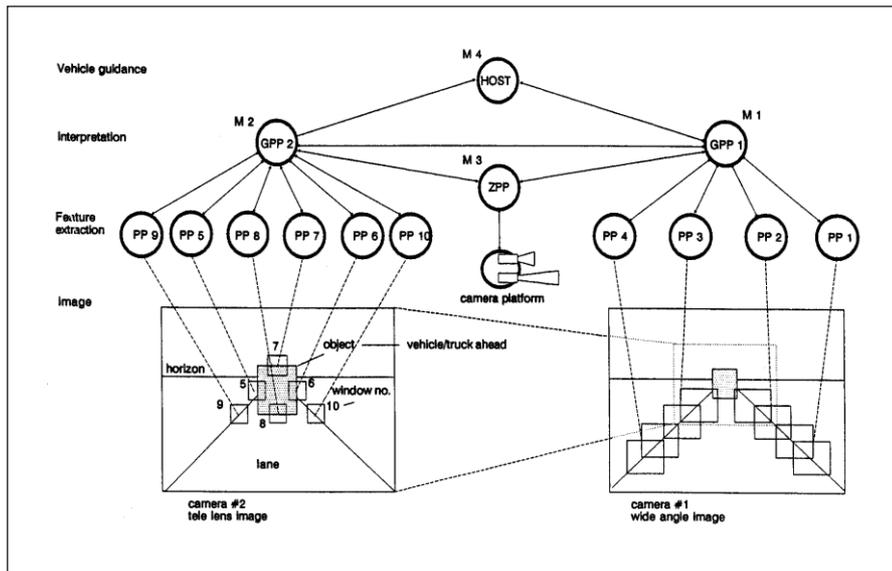
Ist die Fahrbahn erkannt, so gilt die nächste wichtige Frage der Hindernisfreiheit. Dabei können sowohl stationäre als auch sich bewegende Hindernisse auftreten; beide müssen sicher erfasst werden. Die Bestimmung des Relativzustandes ist wesentlich für die angemessene Reaktion während des Fahrens.

Zu Beginn wurde nur ein einziges, relativ großes statisches Hindernis auf der Fahrbahn betrachtet, da in den 80-er Jahren die Rechenleistung der Mikroprozessoren noch sehr zu wünschen übrig ließ. Entgegen dem fast überall sonst verfolgten Ansatz, für diese Aufgabe direkt den Abstand messende weitere Sensoren wie Laser-Entfernungsmesser oder RADAR-Sensoren einzusetzen, haben wir uns von vornherein auf das monokulare dynamische Sehen als einheitlichen Ansatz beschränkt. Vom Beispiel des Menschen ausgehend, der auch mit nur einem Auge die Längsregelung gut durchführen kann, sollten die Interpretationsmethoden entwickelt werden, die unter Ausnutzung sinnvol-

ler Annahmen und der Gegebenheiten auf Straßen die Fähigkeiten zur Wahrnehmung der räumlichen Tiefe ermöglichen.

Dies ist mit nur einer Kamera im Nahbereich (ca. 40 m) und dem bifokalen Sehen im Reichweitenbereich bis ca. 100 Meter durch Ausnutzung der zeitlichen Modelle erstaunlich gut gelungen.

Der erste Ansatz mit sich kreuzweise zentrierenden Suchpfaden ist in [Dickmanns, Christians, 89] beschrieben. Mit zunehmender verfügbarer Rechenleistung konnten weitere Merkmale ausgewertet und häufigere Messungen durchgeführt werden. Dies gestattete ab Anfang der 90-er Jahre auch die Erfassung und Verfolgung sich bewegender Hindernisse, nämlich anderer Fahrzeuge als der häufigste Fall auf Autobahnen [Thomanek, 92]. Bild 26 zeigt das Messprinzip, das neben dem Abstand auch noch die Relativlage des Hindernisses zur eigenen Fahrspur anzugeben gestattet; die direkten Abstandsmessgeräte können dies alle nicht. Durch die Modellierung entlang der Zeitachse mit



**Bild 26:**  
Erster Ansatz (1987) zur Hinderniserkennung auf der Fahrbahn

einem dynamischen System mindestens zweiter Ordnung liefern die rekursiven Schätzverfahren direkt die entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten mit.

Nachdem ein größerer Erfahrungsschatz vorlag, welche Kombination von Merkmalen am effizientesten die Entdeckung und Verfolgung von Fahrzeugen gestattet, konnte 1993 mit dem neuen Transputer-Image-Processing-(TIP-) System

ein Multi-Objekterkennungssystem aufgebaut werden, das mit einem bifokalen Kamerapaar die Entdeckung und Verfolgung von einem halben Dutzend Objekten in einer Hemisphäre gestattete, drei im Nahbereich mit der Weitwinkelkamera und weitere drei im Fernbereich mit der Telekamera [Thomanek, 94].

In dem Testfahrzeug VaMoRs-P, kurz VaMP, waren zwei Plattformen

mit solcher Kameraanordnung eingebaut, eine nach vorne und die zweite nach hinten gerichtet. Damit konnte die Verkehrssituation im Bereich von etwa 100 m hinter bis etwa 100 m vor dem Fahrzeug erfasst werden. Dies erlaubte die eigenständige Fähigkeit zur Entscheidung von Spurwechseln, wenn die Situation im 'Blind-Bereich' neben dem Fahrzeug durch Beobachtung und entsprechende Gedächtnisleistung mitverfolgt wurde (Zusammenarbeit mit der Fakultät Informatik, Institut 2, Prof. W. Niegel).

Mit dem TIP-System und den alten T2- und T8-Prozessoren lief der beschriebene Erkennungsprozess für ein Dutzend Objekte auf 13 Parallelrechnern in 80 Millisekunden (ms) Zykluszeit; mit dem Power-PC als Rechenknoten im TIP-System wurden ab 95 bei halbiertem Zykluszeit (40 ms) und einem zusätzlichen Algorithmus zur Steigerung der Erkennungsrobustheit nur noch vier Prozessoren benötigt. Bild 27 zeigt eine typische Situation mit sechs verfolgten Objekten; zu allen wird parallel der Relativzustand ge-

schätzt. Vergleichsmessungen mit einem Laser-Entfernungsmesser haben gezeigt, dass die Schätzgenauigkeit bis 80 m je nach Entfernung besser als 5% ist. Damit ist ein sicheres Fahren mit monokularem dynamischem Sehen (ohne aktiven Sensor) möglich.

Für die Abstandsschätzung und -haltung hat es sich als hinreichend gezeigt, dass das Fahrzeug nur als ebenes Gebilde auf der Straße (die Silhouette) modelliert wird. Diese Vereinfachung erlaubte die Erfassung von drei Objekten im 25 Hz Takt mit nur einem Power-PC im TIP-System. Bei Schrägansicht eines Fahrzeugs im Nahbereich ergeben sich durch die Längsausdehnung des wirklichen Fahrzeugs über die entstehende diagonale Ansicht starke Formschwankungen im Bild.

Betrachtet man ein überholendes Fahrzeug von weit weg hinten im Annäherungsverlauf bis es im seitlichen Nahbereich vorne wieder erscheint und sich nach vorne entfernt, so überdeckt dieser Vorgang die Hälfte aller möglichen Aspektbedingungen in der Horizontalebene.

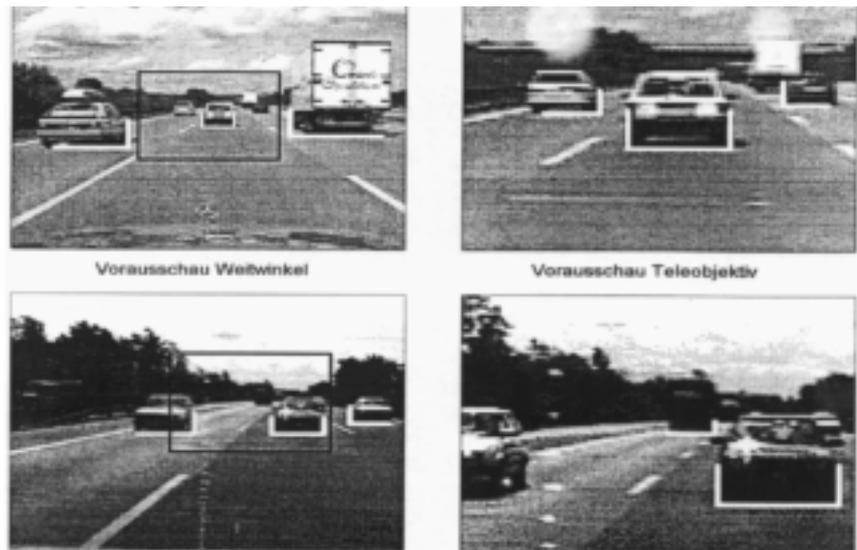
Um in der Lage zu sein, dieses Objekt ständig zu verfolgen und als das gleiche zu identifizieren, muss zweckmäßigerweise eine korrekte räumliche Formrepräsentation vorhanden sein, aus der über die Aspektbedingungen und die Perspektivabbildung das momentane Erscheinungsbild abgeleitet werden kann.

Da diese genaue Formerrfassung immer nur für das Objekt von momentan größtem Interesse erforderlich

ist, wurde wegen des hierzu nötigen Aufwandes beschlossen, diese Fähigkeit nur einmal im System zu installieren und durch eine Aufmerksamkeitssteuerung auf das besagte Objekt auszurichten (aktives Sehen).

### 3-D-Form bei Bewegung

Ein intelligentes Erkennungssystem sollte die Option haben, zumindest ein Objekt von besonderem Interesse genauer 'unter die Lupe nehmen'



**Bild 27:** Multi-Objektverfolgung und relative Zustandsschätzung: oben Vorausschau, unten Rückschau; links Weitwinkel-, rechts Telebilder

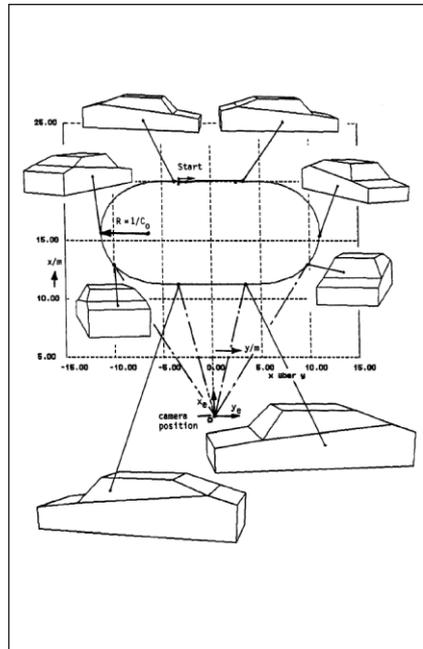
zu können. Durch die aktive Blickrichtungssteuerung kann z.B. die Telekamera dieses Objekt im Blick fixieren und dann ohne Bewegungsunschärfe hochaufgelöst analysieren. Die grundlegenden Voraussetzungen für diese Möglichkeit wurden in den folgenden maschinellen Sehsystemen unseres Instituts für zwei Klassen von Objekten entwickelt: 1. für Straßenfahrzeuge verschiedener Art und 2. für Menschen, während sie sich gehend oder laufend bewegen.

### Erkennung von Straßenfahrzeugen

Es sollen PKW, LKW, Busse, Pritschenwagen, Kombis und Coupes unterschieden werden können. Für alle Klassen wurden generische 3-D-Formmodelle als polyedrische Näherungen entwickelt [Schick, 92]. J. Schick hat in einer reinen Rechnersimulation die Möglichkeit nachgewiesen, mit dem 4-D-Ansatz gleichzeitig die Formparameter und den Relativzustand von Objekten sowie die aufgetragenen Steuerungen durch Beobachtung zu bestimmen. Bild 28 zeigt die Beobach-

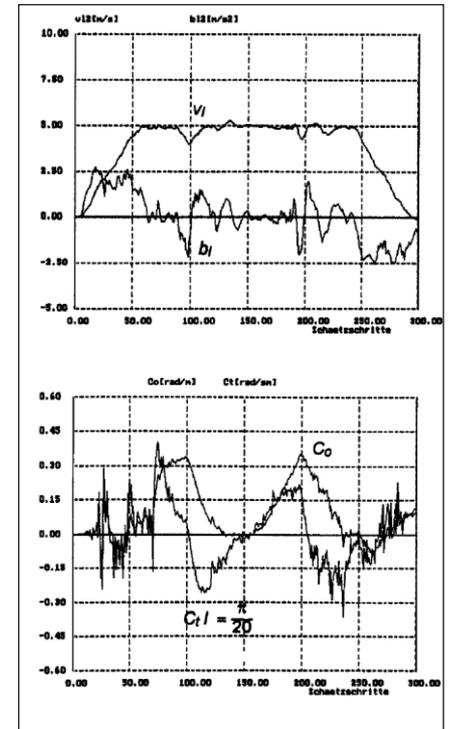
tungssituation bei stehender Kamera, die das zu erfassende Fahrzeug fixiert. Das Fahrzeug steht zu Beginn am Punkt Start; dann beschleunigt es auf 5 m/s und fährt eine Rechtskurve auf den Beobachter zu. Die Kurve wurde durch eine kon-

**Bild 28:**  
Gleichzeitige Schätzung von 3-D Fahrzeugform und durchgeführter Bewegung



**Bild 28a:**  
Gefahrenre Bahn und einzelne Ansichten

stante Drehrate des Lenkrades zuerst nach rechts und anschließend mit gleicher Geschwindigkeit nach links wieder zurück auf Null gesteuert. Die perspektivischen Ansichten an diskreten Punkten sind im Bild 28a eingezeichnet. Nach



**Bild 28b:** Längsbewegung (Geschw.  $v$ , Beschl.  $b$ ), Bahnkrümmung  $C_0$  und zeitliche Krümmungsänderung  $C_t$  rekursiv aus Bildfolgen geschätzt.

einer Geradeausstrecke wird wieder eine Kurve der gleichen Art mit gleicher Geschwindigkeit gefahren; nach Abschluss dieser Kurve verzögert das Fahrzeug bis zum Stand. Die Messwerte wurden hierbei der Simulation entnommen, mit künstlichem Messrauschen überlagert und in den Algorithmus zur rekursiven Parameter- und Zustandsschätzung gegeben.

Bild 28b zeigt die Ergebnisse eines solchen Simulationslaufes [Dickmanns, Schick, 91; Schick, 92]. Mit diesem Schritt wurde die prinzipielle Möglichkeit nachgewiesen, aus der Beobachtung eines Bewegungsprozesses mit der richtigen Objekt-hypothese sowohl Formparameter als auch den momentanen Zustand und die gefahrene Bahn sowie den aufgetragenen Steuerverlauf zu erkennen. Es soll aber nicht verschwiegen werden, dass das schwierigste Problem für die praktische Anwendung, nämlich die richtige Zuordnung der gemessenen Merkmale zu den Formelementen, hier durch Vorwissen gelöst wurde; dieses Problem hat Mitarbeiter des Instituts in realen Szenen bis zum Schluss intensiv beschäftigt.

Immerhin wurde die 3-D-Forminvarianz, verkoppelt mit Wissen über die Bewegungsmöglichkeiten eines solchen Fahrzeugs, dazu ausgenutzt, aus relativ wenigen Messwerten den räumlichen Ablauf eines komplexen Bewegungsprozesses richtig zu erfassen. Für den relativ einfachen Fall einer quaderförmigen Aufbauform bei LKWs konnte M. Schmid zum ersten Mal Ergebnisse in Echtzeit in realen Szenen auf der Autobahn erzielen [Schmid, 93; 94]. Mit den verfügbaren Rechnern war die Auswertefrequenz nur etwa 2 Hz bei gleichzeitig relativ großer Verzugszeit; dadurch ließen die Ergebnisse einige Wünsche



**Bild 29:**  
Erfassung und Verfolgung von LKW-Aufbauten mit einem 3-D Quadermodell

offen. Bild 29 zeigt eine typische Autobahnsituation mit einem Überholvorgang zwischen zwei LKWs.

In den Jahren 98/99 wurde eine Entwicklung mit einem Industriepartner durchgeführt, um die Zuverlässigkeit der Objekterkennung mit Radar durch Hinzunahme von maschinellem Sehen zu verbessern und um die Zuordnung der entdeckten Fahrzeuge zur Fahrspur auf der Straße zu leisten. Es wurde ein entsprechendes Radarsystem in unser Testfahrzeug VaMP eingebaut. Das maschinelle Sehen wurde über zwei Kameras auf der neuen (für diese Versuche fixiert betriebenen) Plattform mit den Brennweiten 7,5 und 24 mm realisiert. Die Industrie ist an einem möglichst einfachen System mit fest montierter Kamera interessiert.

Das Radarsignal wurde zur Objektdetektion und Abstandsmessung verwendet; mit den Kameras wurde die relevante Fahrspur und die genaue seitliche Lage des Objektes auf der Straße sowie dessen Breite erfasst [Hofmann, 00; Rieder, 00]. Die Robustheit der visuellen Objekt-

erkennung soll durch Einsatz zusätzlicher flächenbasierter Merkmale (Helligkeitsprofile) gesteigert werden [Dickmanns 01].

### Erkennung sich bewegender Menschen

Die zweite häufige Objektklasse von besonderer Bedeutung im Straßenverkehr bilden die Menschen in unterschiedlichen Erscheinungsformen wie Fußgänger, Radfahrer, Motorradfahrer und Autoinsasse. Im ersten Schritt sollte der Mensch als Fußgänger und Übermittler von Informationen durch Gebärden wie Winken erfasst werden können.

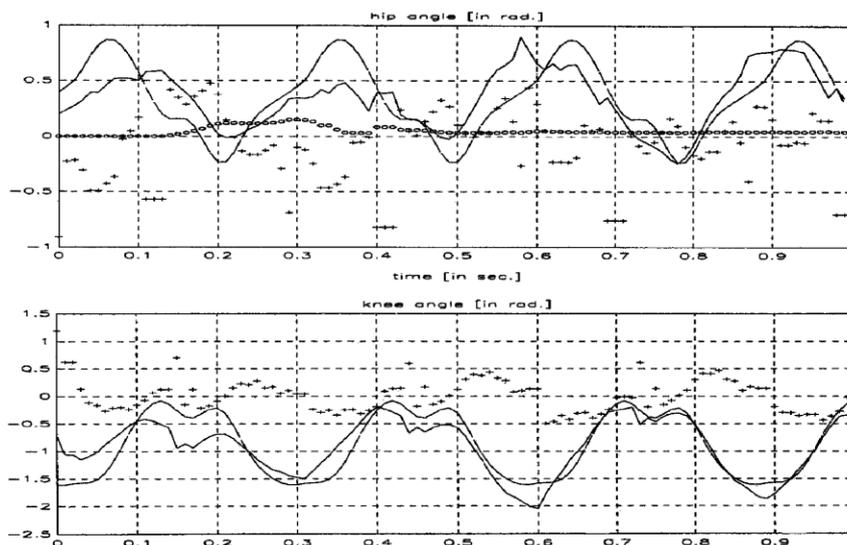
Die grundlegenden Arbeiten hierzu wurden von W. Kinzel nach dem 4-D-Ansatz am Institut durchgeführt [Kinzel, 93; Kinzel, 94]. Auch hier musste die Echtzeit-Realisierung vorerst unterbleiben, weil die angekündigten leistungsfähigen Mikroprozessoren länger auf sich warten ließen; damals waren Auswertefrequenzen nicht größer als 5 Hz erzielbar.

Die jetzt verfügbaren Prozessoren sollten zumindest unter günstigen Umweltbedingungen mit den entwickelten Methoden die Erfassung

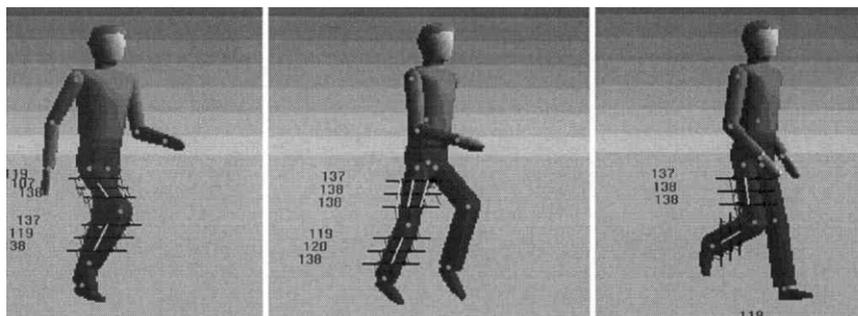
sich bewegender Menschen sowie deren Bein- und Armbewegung mit hinreichender Auswertefrequenz (mindestens 10 Hz) erlauben.

Bild 30 zeigt die Ergebnisse eines

laufenden Menschen in der Simulation; die auf dem Bildschirm graphisch dargestellten Bildfolgen wurden jedoch mit echter Bildfolgenverarbeitung ausgewertet. Fre-



**Bild 30:** Quantitative Erfassung der Bewegungsparameter eines Menschen (Simulation mit echter Bildfolgenverarbeitung)



quenz und Amplitude der Beinbewegung schwingen sich nach wenigen Zyklen auf den richtigen Wert ein.

[Diese Arbeiten wurden mit Ablauf des Prometheus Projektes eingestellt.]

### Erkennen von Gräben (negative Hindernisse)

Ebenso gefährlich für den Missionserfolg wie ein aus der Fahrfläche heraus ragendes (bzw. auf ihr liegendes oder fahrendes) Hindernis ist eines in entgegengesetzter Richtung: Ein Loch oder Graben, aus dem das Fahrzeug mit Eigenleistung nicht mehr heraus kommt.

Diese Problematik ist beim Querfeldein-Fahren auf texturiertem Untergrund besonders kritisch, da die Vielzahl der Kantenmerkmale die Bildverarbeitung sehr stark belastet. Diese Aufgabe wird z.Z. bei den amerikanischen Kollegen als ein kritischer Test für das Stereosehen betrachtet.

Im September 2000 gelang zum ersten Mal die Entdeckung eines nur 60 cm breiten Grabens in einer Grasoberfläche bei Fahrgeschwindigkeiten bis 16 km/h (10 mph)

unter verschiedenen Annäherungswinkeln. Dies war ein Erfolg des deutschamerikanischen Gemeinschaftsprojektes ‚Autonav‘, in dem amerikanische Spezialrechner zum Stereosehen (Pyramidenrechner zur Bildkorrelation der Fa. Sarnoff Corporation) mit unserem EMS-Vision-System im Fahrzeug VaMoRs zusammgeführt wurden.

Bild 31 zeigt VaMoRs nach Anhalten vor dem Graben bei 30° Bahnwinkel.

Dies war das erste Mal, dass diese Aufgabe mit voller Bildfrequenz von 30 Hz und zeitlicher Integration der Auswertergebnisse gelöst werden konnte. Der Spezialrechner (Visual Front End VFE\_200 von Sar-



**Bild 31:**  
Entdeckung eines Grabens während der Fahrt und autonomes Anhalten (September 2000, s. Text)

noff) hat um etwa zwei Größenordnungen mehr Rechenleistung als ein moderner PC.

Dieses System von etwa zwanzig Litern Volumen wird ab Ende 2001 als Einsteckkarte für PC verfügbar werden.

*This film sequence shows experiments made in September 2000 in the framework of the ‚Autonav‘ project with ‚Pyramid Vision Technology‘ VFE-200 of Sarnoff Corporation incorporated in EMS-vision for stereo-perception.*

*In the first sequences, a creek in the western part of UBM-terrain is approached on grass surface at speeds up to 10 mph; the vehicle stops fully autonomously. The following scenes show approaches under different angles (30°, - 90°, - 45°) to a ditch only 60 cm wide. Two sequences with blue squares on a screen show the internal ‚imagination‘ of where the ditch is supposed to be according to temporal integration of single measurements.*

**Film** < Stop in front of ditch > (~1 \_ minute)

# Systemarchitektur

Alle oben genannten Erkennungsleistungen müssen in ein einheitliches Wahrnehmungssystem integriert werden, bevor sie in abgestimmter Weise zur Steuerung der Aufmerksamkeit und der Eigenbewegung herangezogen werden können. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der 4-D-Ansatz mit der rekursiven Schätzung relativer Zustandsgrößen (z.B. des Fahrzeugs in der Spur) die direkte Realisierung von Verhaltensfähigkeiten wie das Spurfahren bei konstanter Geschwindigkeit ('Roadrunning') ohne jede weitere Zusatzinformation einfach durch die Bildung einer gewichteten Summe der Schätzgrößen gestattet; dies ist zwar nicht sonderlich intelligent und erfordert, dass die Straßenoberfläche keine Probleme stellt, löst aber ein Problem, das in den Ansätzen der 'Künstlichen Intelligenz' einige Aufmerksamkeit erhalten hatte, praktisch nebenbei.

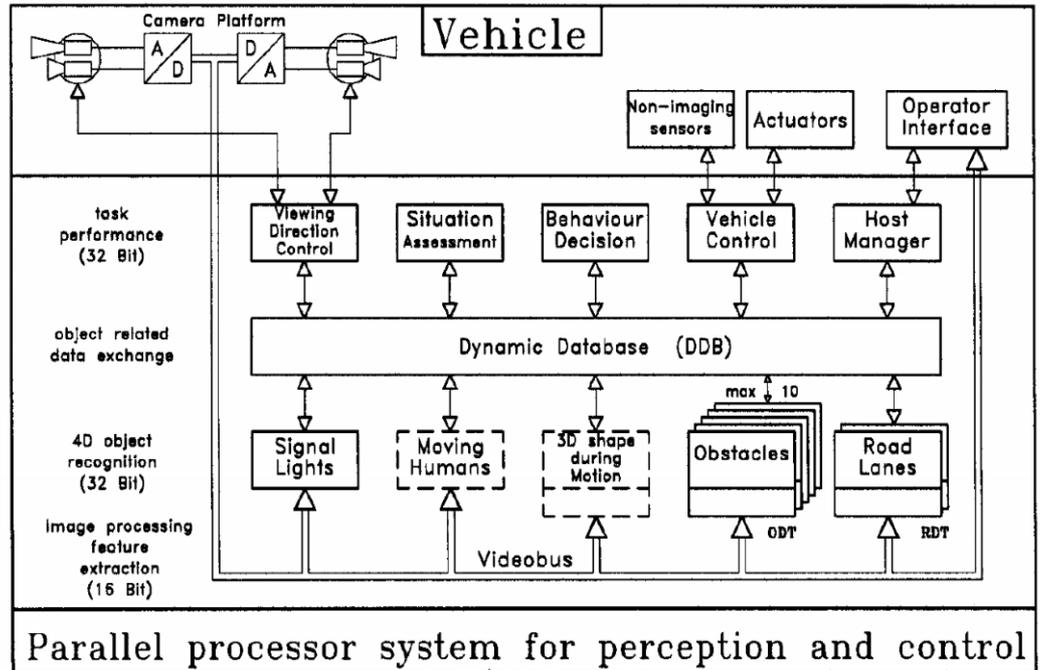


Bild 32: Systemarchitektur für ein objektorientiertes, erwartungsbasiertes, autonomes Wahrnehmungs- und Navigationssystem (Anfang 90-er Jahre)

Diese Art der Bewegungsrealisierung ähnelt in der Wirkung Brooks' 'Subsumption architecture', die ohne jede Modellvorstellung auskommt. Sie wird aber hier durch die dynamischen Modelle und die rekursiven Schätzungen der auftretenden Zustandsgrößen erreicht. Man kann sagen, dass im 4-D-Ansatz im-

plizites, in den dynamischen Modellen und den Abbildungsmodellen verstecktes Wissen über Prozesse in Raum und Zeit ausgenutzt wird, um ein gewünschtes Verhalten zu realisieren.

Explizites Wissen ist dann nur noch zur sinnvollen Verkopplung der ein-

---

zelen Fähigkeiten erforderlich. Genau dazu war Anfang der 90-er Jahre die in Bild 32 dargestellte Systemarchitektur vorgesehen. Sie hält die hohen Bilddatenströme von den oberen Systemebenen fern, liefert ihnen aber objektorientiert im Sinne physikalisch relevanter Objekte all jene Informationen in kondensierter Form, die zur Situationserfassung und Entscheidungsfindung notwendig sind. Die Informationsdreh-scheibe ist die 'Dynamische Datenbasis' (DDB), die die jeweils besten aktuellen Schätzwerte aller beobachteten Objekte und aller Zustandsgrößen enthält (zentraler horizontaler Balken), realisiert vom Institut 2 der Fakultät Informatik<sup>1</sup>.

Unterhalb sind die visuellen Erkennungsprozesse angeordnet, die nach Objektklassen bzw. Aufgabenstellung gegliedert sind. Oberhalb der DDB liegen die sogenannten höheren Ebenen, die allgemeineres Hintergrundwissen haben und die Steuerungen veranlassen bzw. durchführen. Dies betrifft sowohl

die Blickrichtungssteuerung (links oben) wie auch die Betätigung der Fahrzeugsteuerungen (VC).

Die Weiterentwicklung dieses Standes wurde bereits im Bild 13 'kognitive Systemarchitektur' gegeben. Dabei wurde die Hardware auf der unteren Ebene konzentriert. Aus der 'Dynamischen Datenbasis' wurde die DOB (Dynamische Objekt-Datenbasis), die um einige aktuelle Wissenskomponenten über die eigenen verfügbaren Subsysteme und die aktuellen Fähigkeiten erweitert wurde. Alle mentalen Prozesse wurden oberhalb der DOB angesiedelt. Die zylindrische Anordnung der Teilsysteme mit einem zentralen Kern für die Verhaltensentscheidung soll die Geschlossenheit des autonomen Systems deutlicher werden lassen. Auf der 4-D-Ebene erlaubt dies eine kompakte Darstellung der fundamentalen Wahrnehmungsfähigkeit mit generischen Objektklassen im Zentrum, der Fähigkeit zur Hypothesengenerierung (nächste äußere Schale) und zur

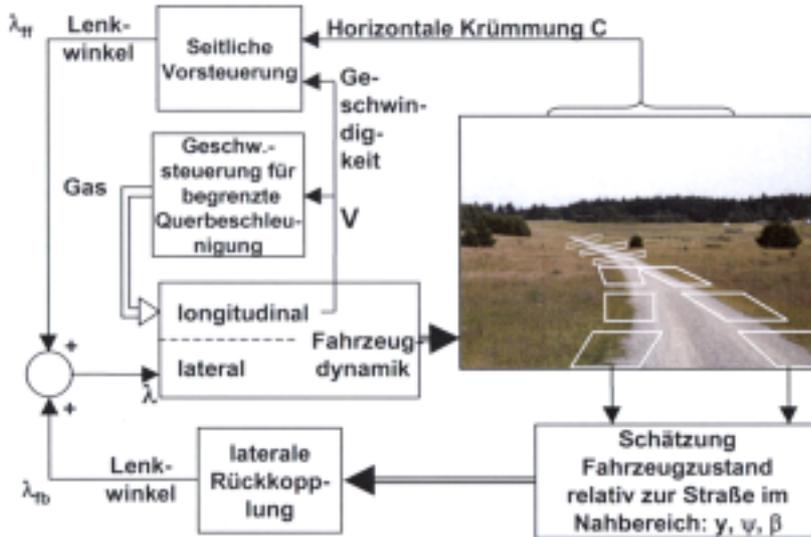
Objektverfolgung mittels Rückkopplung der Vorhersagefehler für Merkmale (äußerste Schale, die mit der DOB kommuniziert).

Die Kommunikation mit der Außenwelt soll über den zentralen Kern auf der oberen Ebene erfolgen.

---

<sup>1</sup>Dickmanns, D.: Dynamic Database. Universität der Bw München, Fakultät für INF-2, 1993

# Fahrzeugsteuerung



**Bild 33:**  
Blockschaltbild zur visuellen Spurführung mit Vorsteuerungs- und Rückkopplungskomponente

Da der 4-D-Ansatz für alle Objekte die Schätzwerte ihres Relativzustandes im physikalischen 3-D-Raum und in der Zeit liefert, ist die Ermittlung der Fahrzeugsteuerung mit den Methoden der modernen Steuer- und Regelungstechnik mehr oder weniger Routinesache. Reflexartiges Verhalten zur Kompensation von Störungen und zur Folgung eines Führungsgrößenverlaufs kann durch eine situationsabhängige Zustandsrückkopplung in optimaler

Weise erzielt werden (gewichtete Summe der Zustandswerte). Kennt man den zu einer Führungsfunktion passenden Steuerverlauf (wie bei der Lenkung entlang einer Fahrspur mit erkannter Krümmung), so kann durch eine Vorsteuerung der bei einer Regelung unvermeidliche Zeitverzug reduziert und damit die Regelgüte verbessert werden.

Bild 33 gibt das seit 1987 verwendete Konzept zur Fahrzeugsteuerung

wieder: Aus der Krümmung der Fahrbahn in der Vorausschau wird einerseits der Lenkwinkelschlag zum Fahren in Spurmitte gemäß dem Klothoidenmodell ermittelt (oberer Signalpfad), andererseits aber auch die maximal zulässige Längsgeschwindigkeit, damit in der Kurve die zulässige Querbesehleunigung nicht überschritten wird. Diese Längsgeschwindigkeit wird als obere Grenze der kommandierten Geschwindigkeit wirksam, wenn die Fahrbahnkrümmung zu groß wird.

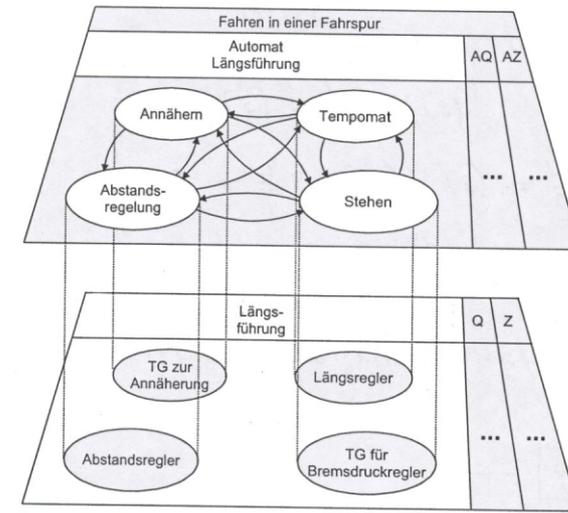
Eine Regelung der seitlichen Ablage auf die Spurmitte (unterer Signalpfad) sorgt für die Kompensation von Störungen und von Effekten einer ungenauen Modellierung. Diese Regelungen wurden anfänglich für VaMoRs und den ersten Versuchsbus des Industriepartners von A. Zapp implementiert [Zapp, 88]; von 88 bis 94 hat C. Brüdigan diese Arbeiten fortgeführt und die Auslegung auf das neue Versuchsfahrzeug bei Daimler-Benz (VITA\_I, s. Bild 37) sowie bei der UniBwM (VaMP, nur Querregelung) übertragen [Brüdigan, 94].



tion, einmal mit den Harel'schen ‚State Charts‘ auf der oberen Ebene und zum anderen über aufgerufene Prozeduren auf der unteren Ebene zeigt Bild 35 nach Maurer und Siebersberger.

Zur flexiblen Handhabung der Steuerung in einem weiten Bereich von Situationen haben sich mehrere hierarchische Ebenen als vorteilhaft erwiesen. Bild 34 zeigt auf der untersten Ebene die reflexartige Reaktion durch Zustandsrückkopplung. Erkannten Abweichungen vom Sollwert wird auf schnellstem Weg durch direkte gewichtete Rückkopplung aller Zustandsvariablen entgegengewirkt. Typische Anwendungsbeispiele sind das Spurhalten [Zapp, 88; Mysliwetz, 90] in der Seiten- und das Abstandhalten in der Längsbewegung [Brüdigam, 94].

Auf der zweiten Hierarchieebene der Steuerung wird ereignisgetriggert auf bestimmte Situationen reagiert. Dabei werden in der Regel gespeicherte generische Vorsteuererläufe mit situationsangepassten Parametern aufgerufen. Typische Beispiele hierfür sind Spurwechsel



**Bild 35:** Verhaltensrepräsentation in EMS-Vision: Auf höherer Entscheidungsebene mit erweiterten Zustandsdiagrammen nach Harel; praktische Implementierung auf dem Fahrzeugrechner durch Vorsteuerungen und Regler

[Brüdigam, 94; Dickmanns, Müller, 95] und das Abbiegen auf Querstraßen [Müller 92; Müller, Baten, 95; Gregor et al 00].

Um auch bei diesen Manöverelementen zufälligen Störungen entgegenwirken zu können, werden Rückkopplungen der gewichteten Differenzen zwischen erwarteten und gemessenen Zustandswerten vorgenommen; hierzu werden von

der mittleren Ebene (Bild 34) neben den Vorsteuerwerten  $u_{ff}$  auch noch gewisse Führungsgrößen  $X_c$  der unteren Ebene vorgegeben. Dies verlangt auf der mittleren Ebene die Repräsentation von Integralen der dynamischen Modelle mit den Vorsteuererläufen, die entweder analytisch oder numerisch ermittelt werden können.

Das Umschalten von einem Verhaltensmodus auf den anderen erfolgt entweder durch eine vorgegebene Prozedur oder von der obersten, wissensbasierten Ebene aus. Diese hat die Aufgabe, den Missionsab-

lauf und die entstehenden Situationen zu überwachen, daraufhin die richtigen Entscheidungen bezüglich der Verhaltensauswahl zu treffen und das gewählte Verhalten zum richtigen Zeitpunkt auf den

darunter liegenden Ebenen zu triggern. Die oberste Ebene ist vom direkten Echtzeit-Rhythmus der unteren Ebenen, der im wesentlichen durch den Videotakt vorgegeben wird (40 ms), entkoppelt.

*In 1997, the Philip Morris Foundation in Germany decided to grant its award for the field 'Transport und Verkehr' (transport and traffic) to our work on dynamic vision for vehicle guidance by machine vision. The 3-minute film on road vehicles gives a good impression of the progress achieved since 1987 (see film link on page 26).*

**< Philip Morris Preis '97 >**

(~3 minutes)

*Autonomous driving in public traffic ('Autobahn' and 'Bundesstraßen') started in 1992. Since 1994 with the Mercedes S-class vehicle VaMP, maximum speed driven rose to values only allowed in Germany.*

## Landmarken-Navigation

Zur Durchführung von Missionen sind nicht nur einzelne Wahrnehmungs- und Verhaltensfähigkeiten erforderlich, sondern diese müssen im Aufgabenzusammenhang richtig eingesetzt werden. Die Vorbereitung dieser Aktivitäten wird mit Planung bezeichnet. In der realen Welt mit ihren vielen unvorhersehbaren Störungen haben starre Pläne nur geringen Wert. Wichtiger ist es,

die Verhaltensfähigkeiten so umfassend zu gestalten, dass typischerweise auftretende Situationen beherrscht werden können.

Zur Navigation von A nach B wäre eine geometrisch korrekte (topographische) Landkarte mit allen aktuellen Details, wenn es diese Landkarte zuverlässig gäbe, sicher ein Gewinn. Wegen der hohen damit ver-

bundenen Kosten werden Landkarten aber nur zu diskreten Zeitpunkten auf den aktuellen Stand gebracht. Wenn darüber hinaus lange Teilstrecken auf gut erkennbaren Straßen zurückgelegt werden können, auf denen man sich navigatorisch nicht irren kann, so ist es ökonomischer, diese Teilstrecken nur topologisch anzudeuten und die genauen Informationen zur Missions-

durchführung auf jene ‘Entscheidungs-Inseln’ zu beschränken, auf denen mit besonderer Aufmerksamkeit navigiert werden muss. Nur hier ist Wissen über genaue geometrische Verhältnisse und am besten auch noch über das visuelle Erscheinungsbild markanter Merkmale, sogenannter ‘Landmarken’, erforderlich.

Der Mensch kommt auf diese Weise mit vergleichsweise wenigen Informationen auch in unbekannter Umgebung gut zurecht (z.B. ‘an der Kirche rechts abbiegen’). Mit der Fähigkeit zum Sehen in Echtzeit können nun auch Fahrzeuge diese Art zu navigieren lernen.

Eine erste Anwendung wurde zur Navigation von fahrerlosen Transportsystemen (FTS, engl. Autonomously Guided Vehicles`AGV) im Fabrikhallenbereich untersucht [Hock, 94]; dabei orientierte sich das FTS an Werkbänken, Türen und anderen markanten Landmarken. Markierten Verbindungswegen kann als eine spezielle Verhaltensfähigkeit gefolgt werden (siehe Film <AGV>).

Dieser Ansatz wurde auf das Fahren mit dem Versuchsfahrzeug VaMoRs auf Wegenetzen übertragen. Wegen der fehlenden Rechenleistung zur Erkennung komplexerer Landmarken hat man sich anfangs auf Kreuzungen, markante Krümmungsverläufe der Fahrbahn und auf rechteckige Schilder als Landmarken beschränkt [Hock, 94]. Dann wurden für beschränkte Übungsgebiete digitale Datenbasen für den Einsatz in VaMoRs vorbereitet, die auch In-

formationen über natürliche Landmarken enthielten. Die grobe Orientierung erfolgt über den eingebauten Empfänger des ‘Global Positioning Systems’ GPS; die selbstständige genaue Orientierung wird durch maschinelles Sehen und Erkennen von Landmarken mit Hilfe der digitalen Karte durchgeführt [Gregor, 01]. Bild 36 zeigt die Erkennung einer Querstraße mit sakkadischem Sehen als Landmarke in einem Wegenetz niederer Ordnung.



**Bild 36:** Erkennung einer Querstraße als Landmarke zur Navigation mit sakkadischem Sehen in EMS-Vision; die Aufmerksamkeitssteuerung erfolgte nach einer digitalen Karte (rechtes Teilbild) mit grober Ortung nach dem Global Positioning System (GPS)

*The film shows a sequence of the final demo at the site of our industrial partner. The AGV first drives towards two landmarks (work benches); at a certain distance from the second one it turns about 90° left and looks for a door to drive through. After passing the door, another left turn maneuver is performed and the next landmark is picked up for specifying the heading of the next mission element (in cooperation with the Institut für Messtechnik (Prof. Graefe) and Rheinmetall-TZN).*

Film <AGV> (1:52 minutes)  
<Autonomously Guided Vehicle>

# Hardware Basis

Für die Entwicklung autonomer, auf dem Sehen basierender Fähigkeiten stehen am Institut zwei Versuchsträger zur Verfügung:

1. Das **V**ersuchsfahrzeug für autonome **M**obilität und **R**echnersehen VaMoRs, ein 1985/86 umgerüsteter 5-Tonnen-Kastenwagen DB 508, mit dem der größte Teil aller bisherigen Entwicklungen validiert wurde, und

2. VaMoRs-PKW, kurz VaMP, eine 1993/94 im Rahmen des EU-REKA-Projektes 'Prometheus' umgerüstete S-Klasse-Limousine Mercedes 500 SEL.

Ihre heutige Ausstattung wird nachfolgend kurz beschrieben.

## VaMoRs

Dieses Fahrzeug (Bild 19, 31) ist nach eineinhalb Jahrzehnten demonstrierter Spitzenleistungen unter den sehenden autonomen Straßenfahrzeugen weltweit bekannt. Es hat 1990 eine leistungsfähigere Stromversorgung (10 KW) erhalten, die Kameraaufhängung erfolgte von der Decke hängend auf

einer neuen, direkt angetriebenen Zweiachsen-Plattform, und es wurde ein Operatorarbeitsplatz eingerichtet, so dass auch längere Versuchsfahrten durchgeführt werden können.

Im Jahr 1998 wurde das neue Fahrzeugauge MarVEye eingerichtet (s.u.), das eine Stereobasis von 30 cm hat und sowohl mit parallelen wie auch mit divergent angeordneten Nahbereichskameras betrieben werden kann. Seit 1999 ist das Spezialrechnersystem VFE\_200 unse-

res amerikanischen Autonav-Partners Sarnoff in VaMoRs eingerichtet.

Während das Spezialrechnersystem VFE\_200 z.Z. noch etwa 30 Liter Volumen hat, wird eine miniaturisierte Version im Jahr 2001 als Einschubkarte im Europaformat für einen PC zur Verfügung stehen.

Am Rande sei hier vermerkt, dass VaMoRs heute das einzige verbliebene Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität der ersten Generation ist (Mitte der 80-er Jahre); es hat



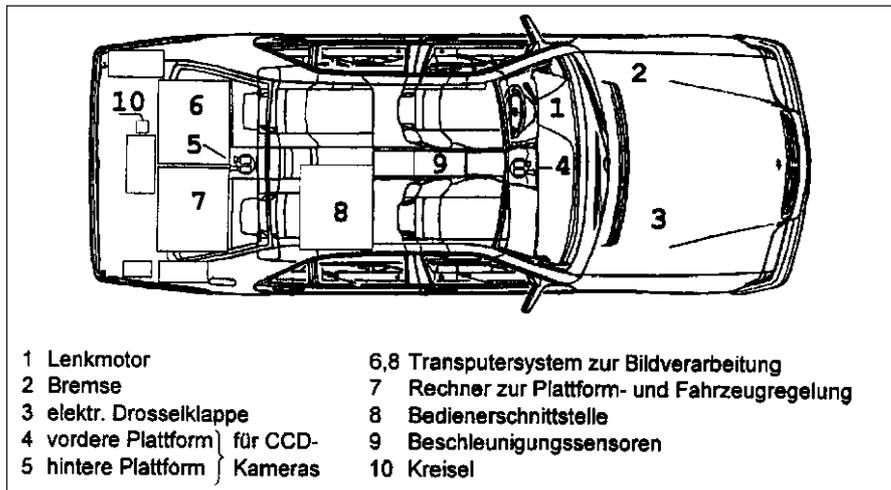
**Bild 37:**  
Demonstrationsfahrzeug ViTA von Daimler-Benz; Prometheus-Demonstration 1991 in Turin

sowohl bezüglich der demonstrieren ‚Firsts‘ als auch der Lebensdauer weltweit eine Spitzenstellung. Es wurde zuletzt hauptsächlich zur Entwicklung der Fähigkeit der autonomen Missionsdurchführung auf Wegenetzen niederer Ordnung eingesetzt.

Für den Industriepartner Daimler-Benz wurde Anfang der 90-er Jahre ein ähnlicher Kastenwagen, genannt Vision Technology Application (ViTA), mit einem Sehsystem der UniBwM ausgerüstet; er bestritt die zweite Demonstration im Prometheus-Projekt 1991 in Turin (s. Bild 37).

### VaMP (VaMoRs-P)

Dieser S-Klasse-PKW wurde in der Endphase des EUREKA-Projektes ‚Prometheus‘ umgerüstet, um das Fahren mit höheren Geschwindigkeiten bis 130 km/h auf Autobahnen zu demonstrieren; gleichzeitig sollte gezeigt werden, dass die Hardware zwischenzeitlich so viel kleiner werden kann, dass sie selbst bei paralleler Verarbeitung von vier Fernsehsignalen in einem PKW Platz findet.



**Bild 38:**  
VaMoRs-PKW, kurz 'VaMP' mit Einbauort der Komponenten

Bild 38 zeigt den Mercedes 500 SEL 'VAMP' als Foto (oben), mit den Einbauorten der Mess- und Stellglieder sowie der Rechnerhard-

ware (unten). Das Zwillingfahrzeug VITA\_II unseres Industriepartners Daimler-Benz hatte alle Elektronik im Kofferraum unterge-

bracht, obwohl diese noch umfangreicher war als bei VaMP; dort wurde auf gute Zugänglichkeit aller Komponenten zugunsten eines voll verfügbaren Innenraumes für Passagiere verzichtet. Bei VaMP standen die leichte Austauschbarkeit und der Bedienungskomfort während der Entwicklung im Vordergrund.

Außerdem basierten die Erkennungs- und Fahrleistungen bei VaMP auf einem reinen Transputer-system [Dickmanns, 94], während in VITA\_II noch zusätzliche andere Rechner und 14 zusätzliche Kameras vorhanden waren<sup>1</sup>.

## Architektur der verteilten Rechnersysteme

In VaMP arbeiteten 1994 an die 60 Transputer, teils 16-bit-Prozessoren T-222 zur Kommunikation und Merkmalextraktion, teils 32-bit-Prozessoren T-805 zur numerischen Daten- und zur Wissensverarbeitung parallel; diese waren in einen 'Fahrzeugrechner' zur Aufnahme von Messdaten und zur Ausgabe von Steuerdaten, einen 'Plattformrechner' zur Blickrichtungssteue-

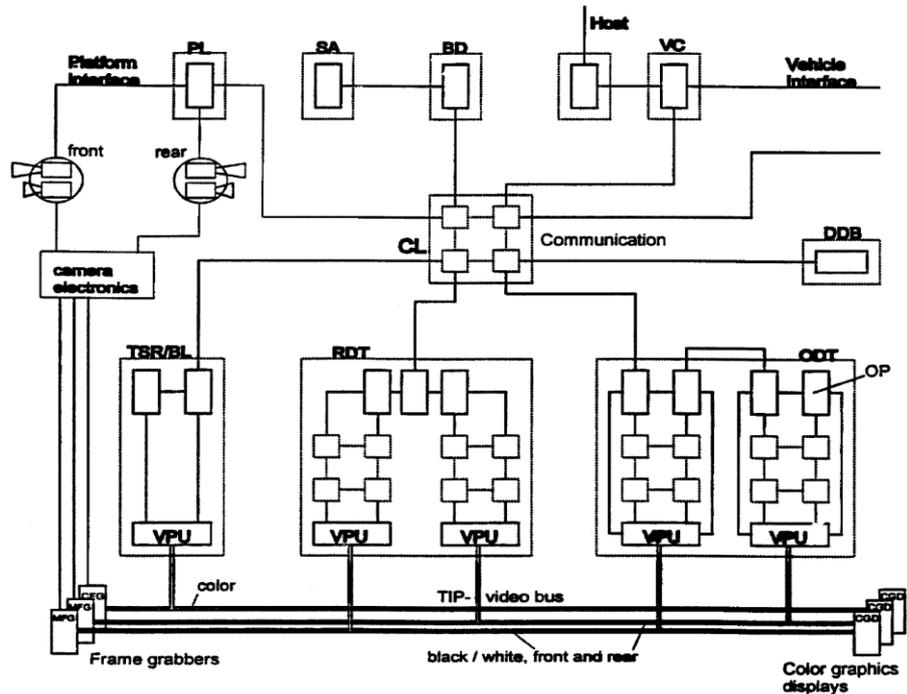


Bild 39: 'Anwendungsrechner' des Fahrzeugs VaMP mit 20 Transputern T222 (Quadrat, 16-bit) und 26 T805 (Rechtecke, 32-bit) Parallelrechnern zur Wahrnehmung und Verhaltenssteuerung

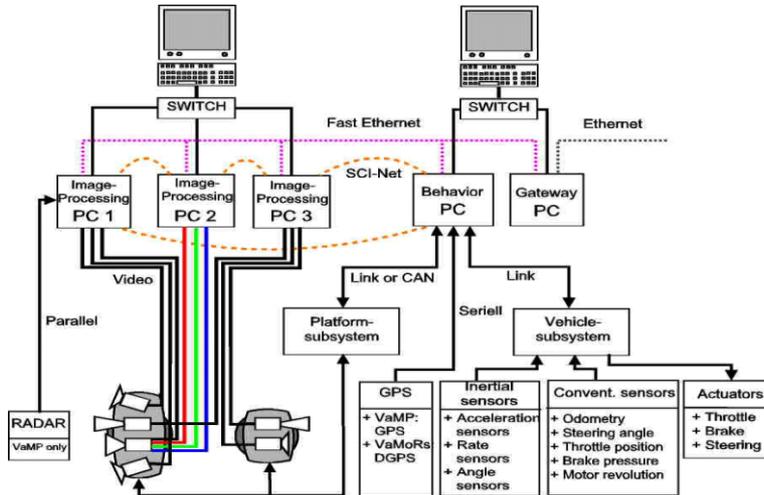
ring und den sogenannten 'Anwendungsrechner' gruppiert.

Bild 39 zeigt den 'Anwendungsrechner' mit 46 verteilten Prozessoren, die die parallelen Bilddatenströme von vier Kameras verarbeiteten. Nähere Einzelheiten sind in [IV'94:] zu finden. Dieses System

war damals eines der aufwendigsten und leistungsfähigsten. Seine Hardware-Architektur entspricht Bild 32 weiter oben.

Jeder Transputer hatte vier parallele Kommunikationskanäle, wodurch der Datenaustausch im Netzwerk erleichtert wurde. Da es gemäß dem

<sup>1</sup>Ulmer, B.: VITA II – Active Collision Avoidance in Real Traffic. Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles '94, Paris, 1994



**Bild 40: Commercial-off-the-shelf (COTS\_) Hardware des Systems der dritten Generation ‚EMS-Vision‘ (2000)**

Transputerkonzept kein Betriebssystem gab, musste einiger Aufwand in die Software-Entwicklung gesteckt werden; hier hat V. von Holt Anfang der 90-er Jahre beispielhaft gewirkt.

Leider hat die nächste Rechnergeneration nach diesem Konzept den Weg auf den Markt nicht rechtzeitig geschafft, so dass für das Folgesystem ein Umstieg bei der Rechnerhardware erforderlich wurde. Nach einem Zwischenschritt mit Power PC-Prozessoren und erneuter Pin-Inkompatibilität bei der Entwick-

lung der Prozessoren dieser Reihe wurde Anfang 1997 entschieden, für die weitere Entwicklung auf ‚Mainstream‘-PC’s mit frei am Markt verfügbaren Komponenten zu setzen. In den Vorgängersystemen waren stets Spezialentwicklungen enthalten gewesen, da die normale PC-Linie noch nicht hinreichend leistungsfähig war. Dies hatte sich zwischenzeitlich geändert. Bild 40 zeigt die Rechnerhardware mit Sensoren und Aktuatoren für das neue EMS-Vision System. Zur Zeit sind Dualprozessor-Systeme Pentium II und III im Einsatz. Der Um-

stieg auf die nächste Entwicklungsstufe kann nun innerhalb von ein paar Stunden erfolgen.

Außer fahrzeugnahen Interfacekomponenten sind Hard- und Software für beide Fahrzeuge weitgehend identisch.

Als Fahrzeug-Subsysteme wurden die alten Transputersysteme der vorigen Generation beibehalten (unten rechts), während für die Blickrichtungssteuerung auch neue Industrie-PC eingesetzt werden (Plattform-subsystem). Beide Fahrzeuge haben zur Ortung GPS-Empfänger, die im Sekundentakt arbeiten. Mit Radar ist nur das VaMP ausgerüstet.

Drei der Dualprozessor-Systeme sind der visuellen Wahrnehmung, d.h. der Bildverarbeitung, Objekthypothesen-Generierung und rekursiven Zustandsschätzung für Objekte verschiedener Klassen gewidmet (PC 1 bis 3). Der Vierte bearbeitet die Situationsanalyse und Verhaltensentscheidung (Behavior PC); er bildet die Schnittstelle zu den fahrzeugnahen Subsystemen, die mit den Sensoren und Aktuatoren Daten austauschen. Ein Gateway-PC dient als Interface zum Menschen; hierü-

# Landeanflug von Flugzeugen

ber werden auch die Programme der eingebettet betriebenen Rechner geladen.

Genauere Beschreibungen des Gesamtsystems und seiner Teile finden sich in sieben Veröffentlichungen auf dem Symposium ‚Intelligent Vehicles 2000‘ und in einer Reihe von Dissertationen ab dem Jahr 2000 (s. Literatur [IV‘00]; auf einige Aspekte wird weiter unten noch eingegangen).

*Results on ‚Hybrid Adaptive Cruise Control‘ (HACC) with VaMP and EMS-Vision combined with radar can best be seen from the following two video sequences. The vehicle is controlled by the human driver in lateral direction (steering wheel actuation), and automatically (with limited authority) in longitudinal direction, keeping a safe, speed-dependent distance to the vehicle in front. This is achieved by exploiting radar signals for hypothesis generation and estimation of range (distance) and range rate, while vision is used for hypothesis testing and precise estimation of lateral position both of the own and other vehicles relative to the lane:*

< HACC-day > (~1 minute)

< HACC-night > (~1 minute)

(for identification of cooperation partners see pages 117/118)

1982 war mit der Dissertation Meissner das maschinelle Echtzeitsehen für einfache Prozesse wie das Balancieren eines Stabes in 1 Freiheitsgrad oder die Querlenkung eines Straßenfahrzeugs soweit demonstriert, dass für die Weiterführung dieser Aufgaben Drittmittel eingeworben werden konnten. Die frei werdende Grundfinanzierung wurde für die Bearbeitung eines anspruchsvollen Themas hergenommen, das zu jener Zeit wohl bei jedem Gutachter den Kommentar der ‚Spinnerei‘ hervorgerufen hätte.

Mit den vorliegenden Erfahrungen bei der Straßenerkennung und im Bewusstsein einer langfristigen stetigen Bearbeitung schien ein Aufgreifen dieses Themas Landeanflug aber zeitgerecht: 1. bewiesen biologische Systeme und vor allem der menschliche Pilot, dass diese Aufgabe lösbar ist, und 2. zeigte die Entwicklung digitaler Mikroprozessoren mit einer Steigerungsrate der Rechenleistung von einem Faktor 10 etwa alle 5 Jahre (der mittleren Dauer einer Dissertation), dass im Rahmen von zwei Dissertationen

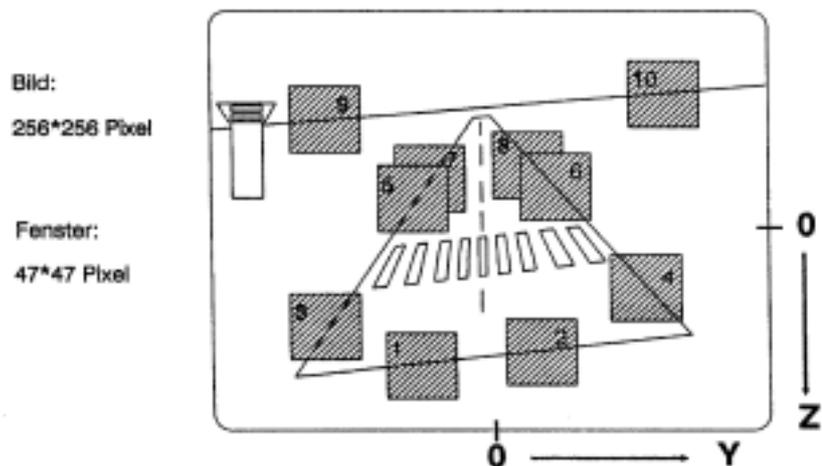


Bild 41:  
Rekursiv ausgewertete Bildbereiche beim Landeanflug (nach [Schell 92])

mit 100-fach gewachsener Datenverarbeitungskapazität praktische Ergebnisse sollten erzielt werden können. Dies hat sich dann bestätigt!

Von G. Eberl als erstem dieser Doktoranden wurde das Thema aufbereitet und in der Weise formuliert, für die sich später bei uns der Name 4-D-Ansatz durchsetzte (s. oben). Alle Interpretationen der Bildfolge erfolgten im 3-D-Raum und in der Zeit; für die Landebahn als Rechteck in der Horizontalebene ergaben sich stetig veränderte Aspektbedingungen durch die Eigenbewegungen des Kameraträgers Flugzeug, dessen Bewegung als (differentielles) dynamisches Modell in Rechnung gestellt wurde.

Dadurch ergab sich in ganz natürlicher Weise die Verbindung von Wahrnehmen und Steuern, die man als 'dynamisches Verhalten' bezeichnen kann. Das Wahrnehmen wurde über die bekannten rekursiven Schätzverfahren realisiert (Derivate des 'erweiterten Kalman Filters'), die um die Perspektivabbildung als Messmodell erweitert wurden; daraus resultierte unmittelbar

der räumliche Relativzustand zur Landebahn einschließlich der jeweils drei rotatorischen und translatorischen Geschwindigkeitskomponenten. Das zielgerichtete Steuern war dann einfach als Zustandsregler zu realisieren.

Die gesamten Modellvorstellungen in allen sechs räumlichen Bewegungsfreiheitsgraden mit vier unabhängigen Steuerverläufen waren schon sehr komplex. Es wundert daher nicht, dass im Rahmen der ersten Dissertation [Eberl, 87] 'nur' der ungestörte Anflug auf den letzten ca. 900 Metern in der Simulation demonstriert werden konnte; allerdings war die Bildfolgenverarbeitung auch damals schon als echte Hardware im Kreis. Die Flugzeugbewegung wurde rein visuell simuliert (ähnlich wie in sog. 'Festsitz-Simulatoren' für menschliche Piloten). Bild 41 zeigt die Verteilung der Merkmale auf der Landebahn und am Horizont. Die Ergebnisse wurden international veröffentlicht [Dickmanns, 88; Dickmanns, Graefe, 88].

R. Schell setzte die Arbeiten in den



**Bild 42:**  
**Der Dreiachsen-Bewegungs-Simulator (DBS) mit Videoprojektor**

Jahren 87 bis 92 fort; durch Hinzunahme leicht an Bord messbarer konventioneller Messgrößen konnte das Verhalten wesentlich robuster gegen Störungen, z.B. von Wind und Böenfeldern, gemacht werden. War in [Eberl, 87] die aerodynamische Geschwindigkeit die einzige konventionelle Messgröße, so kamen nun die Radarhöhe (aus einem Radarhöhenmesser) und die inertialen Drehgeschwindigkeiten und Drehlagen für die hochfrequen-



**Bild 43:**  
Weltweit erstes Testflugzeug mit der Fähigkeit zum visuellen Erkennen des Relativzustandes zur Landebahn in allen sechs Freiheitsgraden (Do-128 der TU Braunschweig mit Sehsystem der UniBwM)

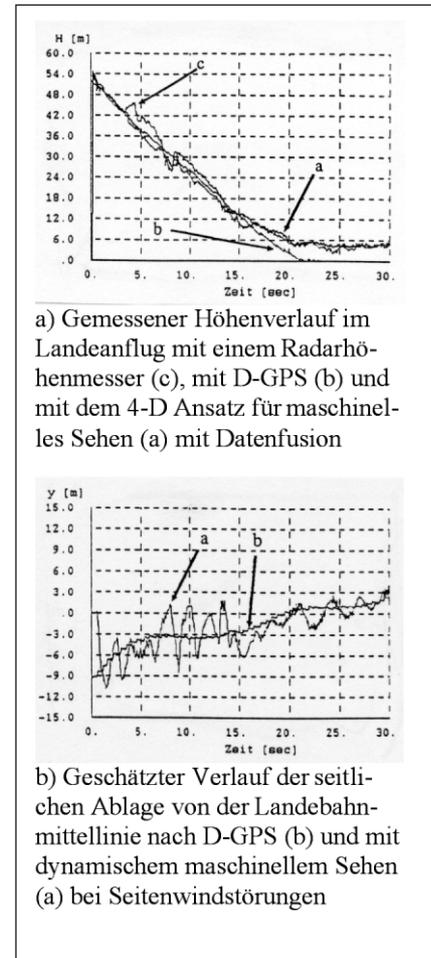
ten Signalanteile mit hinzu. Da diese Signale fast keine Totzeiteffekte enthalten, die wegen der hohen Datenrate bei der Bildfolgenverarbeitung unvermeidbar sind (dort einige Zehntel-Sekunden), ergibt sich hierdurch ein wesentlich verbessertes Gesamtverhalten. Ferner werden mit den inertialen Messgrößen auch die aktuellen Störgrößen erfasst.

In Simulationen mit physisch auf dem Dreiaachsen-Bewegungssimulator (DBS, s. Bild 42) realisierten Drehbewegungen konnte nachgewiesen werden, dass mit diesem Ansatz sogar Landeanflüge auf

räumlich gekrümmten Bahnen beherrschbar sind [Schell, 92]; hierbei fand eine inertielle Stabilisierung der Blickrichtung mit überlagerter Blickfixierung auf die Landebahn durch eine Zweiachsen-Plattform für die Kameraaufhängung statt (s. Bild 42). Mit diesem Entwicklungsstand konnten erste Flugversuche, natürlich nur für den ‘Wahrnehmungsteil’, gewagt werden.

Die DFG bewilligte entsprechende Mittel für Flugversuche mit der zweistrahligem Turbo-Propeller Maschine Do 128 der TU Braunschweig (Prof. Schänzer), s. Bild 43. Im Mai und August 1991 fanden entsprechende Flugkampagnen am Flughafen Braunschweig statt, die erste praktische Erfolge lieferten, aber auch aufzeigten, wo weitere Verbesserungen anzusetzen waren.

Bild 44 zeigt Ergebnisse vom Mai 91, die mit nur einer Woche Einrüst- und Vorbereitungsarbeiten vor Ort erzielt werden konnten; dies war nur möglich dank der sorgfältigen Vorarbeiten von Herrn Schell am DBS. Bild 44a zeigt das Vertikalprofil des Höhenverlaufs: Während



**Bild 44:** Flugversuchsergebnisse mit einem zweistrahligem Turbopropeller Flugzeug der TU Braunschweig



**Bild 45:**  
Fliegender Simulator ATTAS des DLR, der im Rahmen des Projektes CAMA als Versuchsträger diente.

im Anflugbereich der Radarhöhenmesser je nach Bodenprofil und Bewuchs/Bebauung Sprünge zeigt, ist der geschätzte Höhenverlauf mit Bildauswertung merklich glatter; über der Landebahn stimmen beide gut überein.

Im stationären Anflugteil ist das Differential Global Positioning System (DGPS)-Signal glatt; bei Einleitung des Abfangbogens durch den Piloten entsteht aber ein Fehler. Der Pilot fing das Flugzeug so ab, dass es in 5 bis 6 m Höhe über der Landebahn horizontal flog und dann durch Gasgeben durchstartete. Diese Arbeiten wurden ab 1992 von den Mitarbeitern Werner und Fürst

[Dickmanns et al., 94] im Rahmen des CAMA-Projektes (s. unten) weitergeführt.

1993 fand noch einmal eine Flugkampagne mit der TU-Braunschweig auf der Dornier Do-128 statt, bei der eine bifokale

Kameraanordnung eine frühere Entdeckung der Landebahn gestattete. Als Rechnersystem war hier wie zu jener Zeit bei den Bodenfahrzeugen ein Transputersystem mit C als Programmiersprache im Einsatz. Es wurden wertvolle Anregungen für den weiteren Ausbau gewonnen.

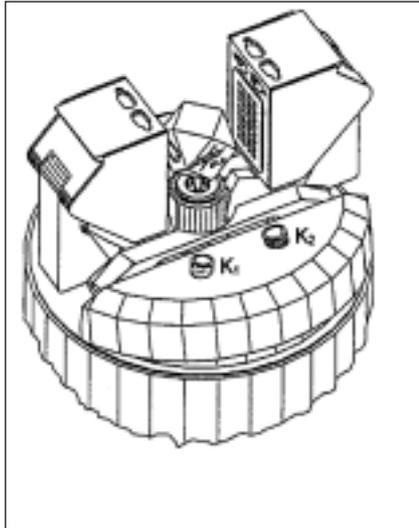
Dieser weitere Ausbau sollte, wiederum parallel zu den Bodenfahrzeugen, auf COTS-Hardware in C++ als Programmiersprache im Rahmen des Projektes ‚Crew Assistant Military Aircraft‘ CAMA (von Kollege Onken) erfolgen. Zur Szenenrepräsentation wurde der von Dirk Dickmanns<sup>1</sup> entwickelte Szenenbaum übernommen, der das Ge-

samtsystem wesentlich flexibler macht. In den Jahren 2000/2001 konnten die Flugversuche mit dem ‚Fliegenden Simulator ATTAS‘ (Bild 45) des DLR Braunschweig erfolgen, einem zweistrahligen Transportflugzeug. Aus übergeordneten Gründen waren die Kameras fest am Cockpit montiert; die Auswertung musste off-line erfolgen. Ergebnisse finden sich in der Dissertationsschrift [Fürst, 01].

Im Rahmen des Projektes CAMA wurde eine weitere Themenstellung aufgegriffen: die Erkennung der Blickzuwendung des Piloten in einem Transporter-Cockpit. Dieses Vorhaben war durch häufigeren Mitarbeiterwechsel belastet, der z.T. durch die speziellen Randbedingungen an der UniBwM bedingt war. A. Schubert hat dieses Projekt schließlich betreut und erste Ergebnisse erzielt [Schubert, 98, 99]. Die Aufgabe bestand darin, mit Kameras in der Instrumententafel den Piloten zu beobachten und festzustellen, welchem Gerät oder Teil der Außenwelt er sein Interesse zuwendet.

<sup>1</sup>Siehe Fußnote S. 36

# Greifen eines freifliegenden Körpers im Weltall



**Bild 46:**  
Zweifingrige Roboterhand mit Stereo-Kamera K1 und K2 (DLR)

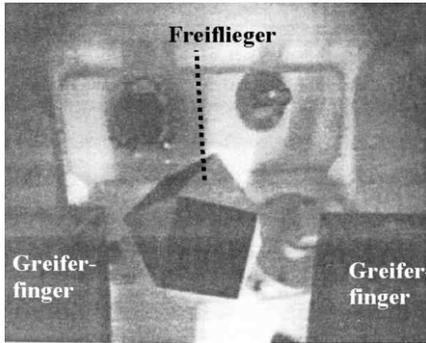
In der deutschen Spacelab-Mission D2 vom 26.4. bis 6.5.1993 war eines der Hauptexperimente das 'Robotik Technologie Experiment' ROTEX, das von Prof. G. Hirzinger, DLR Oberpfaffenhofen, geleitet wurde. Mit einem Roboterarm an Bord des Spacelab in der Ladebucht des Space-Shuttle Orbiters Columbia sollten, ferngesteuert von der Erde aus, einige elementare Robotikaufgaben wie z.B. das Betätigen eines Bajonettverschlusses, das In-

einanderpassen von zwei Teilen und das Greifen eines freifliegenden Körpers im All demonstriert werden. Der Roboterarm mit sechs Freiheitsgraden war in einer Zelle von 110x80x50 cm Abmessungen in einem der Experimente-Racks des Spacelab montiert; die vom DLR-Institut für Robotik und Systemdynamik entwickelte Hand war mit vielen verschiedenen Sensoren bestückt, u.a. auch mit einem Satz von Stereokameras (s. Bild 46), die den Greifbereich der beiden Finger überschauten. Die Rechner zur Datenverarbeitung befanden sich in der Bodenstation in Oberpfaffenhofen (Mission Control Center MCC). Wegen der Signalführung über drei geostationäre Relaisatelliten und durch eine Reihe von Bodenstationrechnern ergab sich eine Verzugszeit von etwa 3 Sekunden jeweils für den Hin- und Rückweg zwischen Spacelab und MCC.

Unser Institut war zunächst im Unterauftrag der DLR mit der Erstellung der Software zur Kompensation dieser Totzeit bei manuellem und automatischem Betrieb eingeschaltet [Fagerer, 90]. Im Lauf der

Kontakte wurde klar, dass der 4-D-Ansatz zum dynamischen monokularen Sehen auch ein aussichtsreicher Kandidat zur Lösung der automatischen Greifaufgabe war. Dieser Lösungsweg wurde aus der Eigenfinanzierung des Instituts für Systemdynamik und Flugmechanik LRT mit dem von Dirk Dickmanns (UniBwM Informatik) entwickelten Verfahren zur 3-D-Objektrepräsentation erarbeitet. In zwei Vergleichstests mit dem von der DLR entwickelten Stereoverfahren im Herbst 92 und im Frühjahr 93 zeigte sich die größere Reife und Robustheit des 4-D-Ansatzes, der daraufhin zum Einsatz bei D2 ausgewählt wurde.

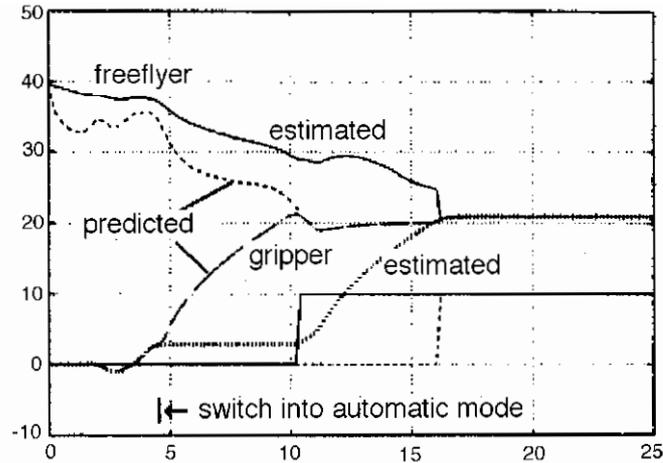
Am 2. Mai 1993 konnte das Greifexperiment mit automatischer Fernsteuerung nach dem 4-D-Ansatz erfolgreich durchgeführt werden; bezüglich einer detaillierteren Beschreibung sei auf [Fagerer et al., 94; Fagerer, 96] verwiesen. Dies war das erste Mal weltweit, dass ein freifliegender Körper im schwererefreien Raum durch maschinelles Sehen automatisch gegriffen wurde (s. Bild 47), ein weiteres 'First' für



**Bild 47:**  
Historisches erstes Greifen eines 'Freifliegers' im Weltall an Bord Spacelab D2, Shuttle-Orbiter 'Columbus' (2. Mai 1993)

den 4-D-Ansatz zum dynamischen Sehen.

Bild 48 zeigt den zeitlichen Verlauf einiger Zustandsgrößen zwischen dem Zentrum des Greifers und den Fingern der Hand, wobei sowohl die geschätzten realen Werte an Bord als auch die totzeitbehafteten Messwerte angegeben sind, auf denen alle geschätzten und prädierten Werte beruhen. Dieser Ver-



Horizontale Achse: Zeit in Sekunden; vertikale Achse: x-Abstand in mm

Start of manual control at about 2 seconds; switch to automatic control at 4,8 seconds.

Actual grasping at about 16 seconds.

**Bild 48:**

Zustandsverläufe zwischen Greiferfinger und Freiflieger, wie sie aus den verzögerten Messdaten in Echtzeit rekonstruiert, vorhergesagt und zum autonomen Greifen verwendet wurden. Man erkennt deutlich die Totzeit von 6 Sekunden zwischen Messwertaufnahme, von der die Entscheidung abhängt, und Ausführung der Entscheidung im Spacelab (unten Mitte und rechts).

such kann als automatische Telemanipulation aufgefasst werden, wobei die Rechner im Missionskontrollzentrum der DFVLR in Oberpfaffenhofen den Greifvorgang im Spacelab erfolgreich steuerten. Dies erfolgte auf der Basis

von Messwerten, die über Nordafrika im Weltall erfasst wurden, sowie von Wissen über die dynamischen Prozesse im komplexen Gesamtsystem.

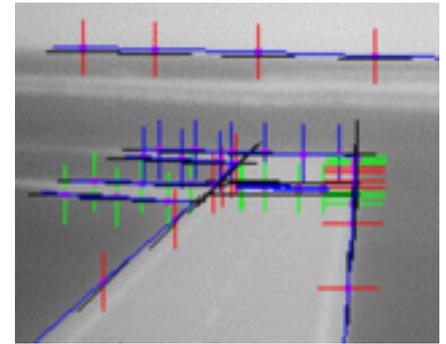
# Landmarken-Navigation von Hubschraubern

Wegen der starken Verkopplung aller Bewegungen beim Hubschrauber ist dessen gezielte Steuerung eine der schwierigsten Aufgaben sowohl für den Menschen wie für die Automatik. Nach den Erfahrungen mit der automatischen visuellen Führung von Straßenfahrzeugen und Flugzeugen im Landeanflug wurde 1993 damit begonnen, auch Hubschrauber das selbstständige Fliegen auf der Basis eigener inertialer und visueller Wahrnehmung zu lehren. Die Kombination von preiswerten Inertialsensoren, an deren Driftverhalten keine hohen Anforderungen gestellt werden, mit abbildenden Sensoren hat sich als wesentlich und effizient herausgestellt: Das schnelle Kurzzeitverhalten des eigenen Körpers wird durch die Inertialsensoren im wesentlichen richtig und mit sehr geringem Zeitverzug erfasst, während die niederfrequenten Driftprobleme leicht über die (inertial stabilisierte) Bildverarbeitung in den Griff zu bekommen sind; nur auf diesem Weg lassen sich Störungen von Böen und variablen Windfeldern trotz des relativ großen Zeitverzugs bei der Bildverarbeitung beherrschen.

Der Ansatz zum sehenden Hubschrauber beruht deshalb auf dem fixierenden sakkadischen Sehen wie es sich auch bei Wirbeltieren im biologischen Bereich durchgesetzt hat: Schnelle Winkelgeschwindigkeitsstörungen werden nach inertialer Messung durch eine hochfrequente Gegensteuerung (500 Hz) kompensiert, während die Langzeitstabilität durch Blickfixierung auf gut erkennbare ortsfeste Merkmale (Landmarken) nach deren Vorhersage über ein Bewegungsmodell im 3-D-Raum und der Zeit sichergestellt wird; die Bildfolgenverarbeitung erfolgt im 40 ms-Takt (25 Hz) mit 2 bis 3 Takten Totzeit.

Das Gesamtkonzept wurde von S. Werner im Rahmen des ESPRIT-Projektes 'CLEOPATRA' erstellt [Werner, 94]. Partner waren in diesem Projekt die Firma Eurocopter Deutschland (ECD) und das DLR-Institut für Flugmechanik in Braunschweig.

Neben dem bifokalen aktiven Sehen im optischen Bereich soll längerfristig eine Erkennung der Umwelt über ein rotierendes Radar mit syn-



**Bild 49:**  
**'Hardware-in-the-Loop' (HIL-) Simulation**  
**von erdnahen Hubschrauberflügen am DBS**  
**des Instituts [Werner 97]**

thetischer Apertur (ROSAR, Firmen DASA-Ottobrunn und Perimos (Ulm)) für den Allwetterbetrieb möglich werden.

Das Verfahren wurde zunächst im 'Hardware-in-the-Loop'- (HIL) Simulationskreis mit dem DBS entwickelt (s. Bild 49).

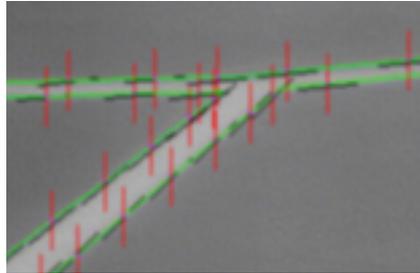
Die Aufgabe bestand darin, eine komplette Mission in Bodennähe voll autonom durchzuführen, wobei eine Orientierung an visuellen Landmarken erfolgen soll. Da im Lauf dieses Projektes für später Flugversuche mit einem Hubschrauber des DLR-Braunschweig geplant waren, wurde der nähere



**Bild 50:**  
Abzuffliegende Mission in der Umgebung  
des Flughafens Braunschweig

Bereich um den Flugplatz Waggum als Basis für die Simulation gewählt und im Simulationskreis der UniBwM zum Dreiachsen-Bewegungssimulator (DBS) repräsentiert. Bild 50 zeigt die auszuführende Mission mit einem Start am

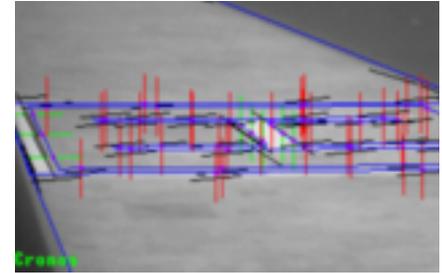
**Bild 51:**  
Visuelle Landmarkenerkennung:



**51a) Straßenverzweigung im Echtzeit-Simulationskreis mit realer Bildfolgenverarbeitung (25 Hz)**

Ostende der Landebahn, dem Flug zu einigen Wegpunkten und dem Rückflug zum Westende der Landebahn mit einem Helikopter-Landeplatz (markiert mit dem Großbuchstaben H) auf einer benachbarten Rollbahn.

Die im Bild 51a) gezeigte Weggabelung ist eine typische Landmarke, wie sie zur Navigation herangezogen wird. Die vertikalen Striche markieren die Suchpfade für die Extraktion der Kantenmerkmale; die kurzen dunklen Striche sind die gefundenen geeigneten Kanten, aus denen der Straßenverlauf rekonstruiert wurde (durchgezogene hellere Linien). Das bisher angesammelte



**51b) Landeplatz H zur Hubschrauber-Navigation (Endanflug)**

Wissen über Form und Erscheinungsbild der Weggabelung wird zur Spezifikation der Operatoren für die 25 mal pro Sekunde stattfindende Bildverarbeitung ausgenutzt. Dabei wird die Eigenbewegung voll in Rechnung gestellt (Zustandsvorhersage).

Im Bild 51b) ist die Erkennung des Helikopter-H als Landmarke dargestellt. Alle möglichen auftretenden perspektivischen Verzerrungen muss das System handhaben können.

Aus dem Bild wird erkennbar, dass die Kanten des Objektes auch bei nicht optimal abgestimmter Spezifikation der Parameter zur Kantenex-

tration noch hinreichend genau erfasst werden.

Leider konnten diese Ergebnisse nur in der Echtzeitsimulation mit realer Bildverarbeitung erzielt werden. Der für reale Flugversuche geplante Versuchshubschrauber des DLR stand zum Zeitpunkt der Einsatzreife des Verfahrens nicht mehr zur Verfügung. Das Projekt musste mit der Simulation am Dreiachsen-Bewegungs-Simulator des Instituts (DBS) 1997 mit der Dissertation von Herrn Werner abgeschlossen werden [Werner, 97]. Mit dieser Missionsdemonstration war ein weiterer wichtiger Schritt in der Entwicklung des dynamischen Sehens für Fahrzeuge aller Art getan.

*The film shows the end of a mission performed by landmark navigation including GPS and inertial angular orientation sensing around the airport of Braunschweig (Lower Sachsonia, Germany) in the ,hardware-in-the-loop‘ simulation facility of UBM / ISF; this facility allows real vision hardware (two cameras with different focal lengths) on the 3-axis-(angular)-motion-simulator (DBS) in front of a cylindrical screen onto which the computer generated view from the helicopter is projected.*

*The ,quadsplit image‘ shows in the upper left quadrant the image from the mild tele lens and in the upper right that of the stronger tele camera (twice the focal length); in the lower left subimage you see the 3-axis-(angular)-motion-simulator, and the lower right quadrant shows a perspective view of the helicopter as seen from a ,chaser-aircraft‘ for observation.*

*After passing the last cross-country waypoint (given by GPS) the helicopter in the sequence shown is on its flight from north-west towards the western end of the runway. The runway may already be recognized by the observer in the lower right color image. After some time, the automatic system discovers the runway and homes in on the western tip of it, where it first tries to discover the two interconnections to the taxiway (known from the database to exist). At the same time it tries to localize the initial marker on the runway. Because of the initially poor resolution it looks for a single rectangular area which is brighter than the surrounding runway, though the real markings are several rectangles together forming the larger one (with its longest extension normal to their own).*

*When approaching, the small rectangles are individually recognized (and marked in the images). Now the system knows exactly where it is. It plans its further route first along the runway in easterly direction, from where it should be able to visually recognize a taxiway junction as landmark. From map information it knows that the Helipad **H** for touch down is on the taxiway leading towards the flight path chosen. Therefore, it first tries to find the landmark ,triple junction‘ of the taxiways and then searches for the Helipad **H** encased by a rectangle somewhat nearer for initiating deceleration and transition to hovering.*

*The final sequence shows this hovering position from the chase aircraft circling the **H**.*

**<Helicopter Landmark Navigation>**

(~4 minutes)

# Bi- und multifokales sakkadisches Sehen

Bei allen Fahrzeuganwendungen stellt man in der Praxis bei Bildern mit einigen Hundert Zeilen und Spalten bald fest, dass je nach gewählter Brennweite der Kamera entweder das Gesichtsfeld (Apertur) oder die Auflösung nicht ausreichend ist. Statt Spezialchips mit inhomogener Bildpunktdichte zu entwickeln, wurde schon Anfang der 80-er Jahre vorgezogen, zwei Kameras mit unterschiedlichen Brennweiten relativ zueinander fest auf eine Zweiachsen-Plattform zu montieren, die die Blickrichtung dem jeweiligen Bedarf entsprechend hochdynamisch ausrichten kann.

Bild 52 zeigt die erste für das dyna-



**Bild 52:**  
Erste Zweiachsen-Plattform mit Zahnriementrieb und Schrittmotoren (1984)

mische Sehen selbst entwickelte Zweiachsen-Plattform aus dem Jahr 1984 mit Zahnriementrieb über Schrittmotoren; sie war relativ groß wegen der damals noch sperrigen CCD-Kameras. Sie wurde zu einer Zeit gebaut, als international das Schlagwort vom 'aktiven Sehen' noch nicht aufgekommen war; zur Blickfixierung auf den Merkmalschwerpunkt gekrümmter Straßen war sie ein Novum.

Zur genaueren Objekterkennung gestattete sie, im Weitwinkelbild entdeckte Objekte durch entsprechende Blickrichtungsänderung in das Zentrum des Telebildes zu verschieben. Mit drei- bis vierfach höherer Auflösung (entsprechend dem Brennweitenverhältnis) konnte das Objekt nun genauer analysiert werden. Entsprechend den biologischen Wirbeltieraugen spricht man auch hier von 'Sakkaden'. Der 4-D-Ansatz mit zeitlichen Vorhersagen über dynamische Modelle ist für den Einsatz dieses aufmerksamkeitsgesteuerten aktiven Sehens bestens geeignet. Sowohl die Orientierung auf physische Objekte wie auch die Basierung auf Erwartungen gemäß



**Bild 53:**  
Gier-Plattform für PKW mit Direktantrieb und berührungsloser Messung

dem dynamischen Verhalten, z.B. des Fahrzeugs, das den Sensor trägt, und der Plattform zur Blickrichtungssteuerung, tragen wesentlich zur Erkennung der Invarianzen des beobachteten Prozesses bei; aus verwischten Bildern ist eine Erkennung der Umwelt ziemlich hoffnungslos. Inertiale Stabilisierung und Blickfixierung auf kontinuierlich bewegte Objekte, ggf. auf mehrere in schneller Folge, erlauben erst das Verstehen komplexer bewegter Szenen.

Mit den kleiner gewordenen Kameras, vor allem denen mit abgesetzter Elektronik, konnten auch die Abmessungen der Plattformen schrumpfen. Selbst beim Übergang

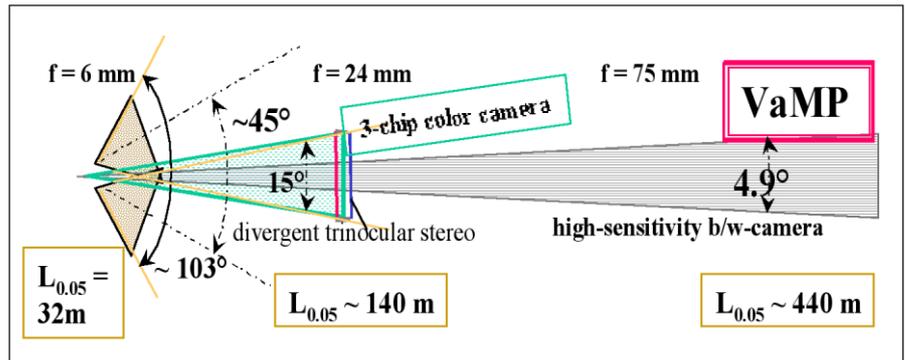
zum Direktantrieb mit Torque-Motoren konnten hinreichend große Drehbeschleunigungen (ca.  $10^4 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ ) erzielt werden. Ausgehend von teuren Winkelencodern und Drehgeschwindigkeitssensoren wurden ständig vereinfachte Lösungen untersucht, um preislich vertretbare, aber trotzdem leistungsfähige Zweiaxsen-Plattformen zu erhalten. Hierbei haben sich im Bereich der Systemauslegung und der werkstattlichen Fertigung vor allem die Herren Oestereicher (Mechanik) und Hollmayer (Elektronik) große Verdienste erworben. In ein Gesamtsystem integriert wurde alles von J. Schiehlen, der die inertialen und die Bildverarbeitungs-Regelkreise aufeinander abstimmt und mit Methoden der modernen Regeltheorie optimal zur Entfaltung brachte [Schiehlen, 95; Dickmanns, Schiehlen, 94].

Bild 53 zeigt die horizontale Blickrichtungssteuerung mit den Miniatur-CCD-Kameras wie sie in den Fahrzeugen VaMP und VITA II (Daimler-Benz) eingebaut war; die Gesichtsfelder betragen etwa  $13^\circ$  und  $42^\circ$  ( $f = 24$  und  $7.5$  mm).

Eine Aufgabenanalyse für sehende Straßenfahrzeuge [Dickmanns, 95] hat gezeigt, dass vier CCD-Kameras mit drei unterschiedlichen Brennweiten auf einer Plattform alle Anforderungen über den gesamten Fahrbereich vom langsamen Manövrieren in enger Umgebung bis zum Fahren mit hoher Geschwindigkeit und in dichtem Autoverkehr effizient abdecken können. Bei relativ geringer Gesamtdatenrate (nur 2 - 3 % im Vergleich zu voller Auflösung im gesamten Blickfeld) kann mit der Brennweite  $f = 4$  bis  $6$  mm ein horizontales Gesichtsfeld von  $100$  bis  $130^\circ$  abgedeckt werden, wobei sich im Zentralbereich die Fähigkeit

zum binokularen oder trinokularen Stereosehen ergibt. Mit zwei unterschiedlichen Tele-Brennweiten (z.B.  $16$  bis  $24$  mm und  $50$  bis  $75$  mm) können Unterbereiche je nach Bedarf durch Blickzuwendung hochaufgelöst abgebildet werden.

Das divergente Stereosehen mit der Anordnung gemäß Bild 54 ist zwar ungewöhnlich, hat aber (bei erhöhtem Rechenbedarf) eine leicht verbesserte Auflösung gegenüber dem parallelen Stereo; diese Kameraanordnung vergrößert das Gesamtgesichtsfeld und erlaubt gleichzeitig im zentralen Nahbereich binokulares Stereosehen, d.h. die räumliche Interpretation aus einem gut er-



**Bild 54:** Gesichtsfelder des multifokalen aktiven/reaktiven Fahrzeugauges (MarVEye) aus konventionellen CCD-Kameras



**Bild 55:**  
Multifokale Gierplattform für das sakkadische Sehen im VaMP

kennbaren Merkmal in einem Bildpaar. Bei einer Brennweitenstufung mit dem Faktor 4 enthält jedes größer aufgelöste Bild die Information der 2. Pyramidenstufe des nächst feiner aufgelösten Bildes. Diese Information ist parallel und ohne Beanspruchung von Rechenleistung direkt verfügbar; sie kann zur Steigerung der Erkennungssicherheit und der Robustheit genutzt werden.

Bild 55 zeigt die neue horizontale Blickrichtungssteuerung mit vier Miniatur-CCD-Kameras gemäß Bild 54 wie sie nun im Fahrzeug VaMP eingebaut ist. Bild 56 stellt die abgebildeten Bereiche in den Fernsehbildern gemäß Bild 54 dar. Gemeinsam mit der Sakkadensteuerung, die eine Änderung der Blickrichtung um einige -zig Grad in



**Bild 56:**  
In EMS-Vision parallel verfügbare Bilder zur gleichzeitigen Auswertung und Interpretation

einem kleinen Bruchteil einer Sekunde erlaubt, ergibt sich damit eine neue Qualität von maschinellem Sehen, was den Sichtbereich und die aufmerksamkeitsgesteuerte örtliche Auflösung betrifft.

Mit dieser Generation von Zweiaxsen-Plattformen, die mit 500 Hz mit einfachen Inertialsensoren kurzzeitstabilisiert werden und mit 25 Hz aus der Bildfolgenverarbeitung langzeitstabilisiert oder blickfixiert betrieben werden, stehen preiswerte

leistungsfähige Einheiten zur Verfügung, die das multifokale sakkadische Sehen praktisch realisierbar werden lassen. Die Motoren und die Winkelmesser (Resolver) arbeiten derzeit schon berührungslos; die Signalübertragung von mehreren CCD-Kameras erfolgt z.Z. analog über lose hängende Kabel. Nach Validierung des Prinzips sollen kleine Einheiten dieses „Multifokalen aktiven/reaktiven Fahrzeugganges“ aus einem Guss entwickelt werden (MarVEye).

Als wünschenswerte Langzeitlösung werden digitale Kameras mit drahtloser Übertragung der Bilddaten vom bewegten auf den statischen Teil der Plattform angesehen. Die Gesichtsfelder von MarVEye im Bild 54 sind auf den Blick in etwa parallel zur Grundfläche entworfen, um in verschiedenen Entfernungen Felder von etwa 35 m Breite in der realen Welt mit einer Auflösung von etwa 5 cm pro Pixel abzubilden. Bei üblichen Fahrbahnmarkierungen bedeutet dies, dass diese in mindestens zwei Pixeln abgebildet werden. Auf eine Fahrzeugbreite entfallen so mindestens ca. 30 Pixel, was eine gute Erkennung zulässt.

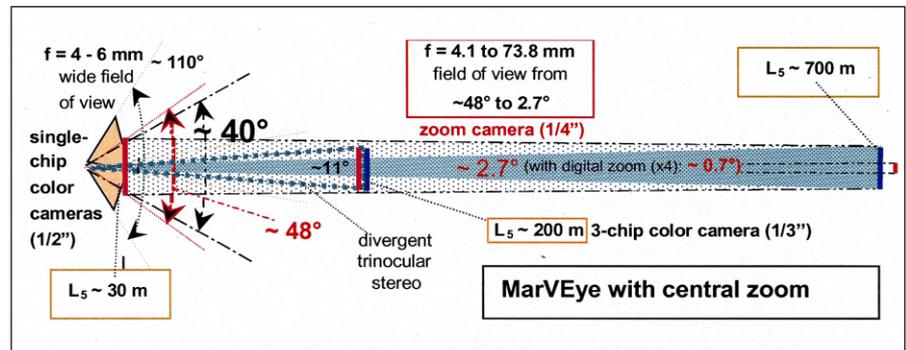
Die mit der Kameraformation nach Bild 55 parallel aufgenommenen Bilder können mit einer speziellen Elektronik in einem sogenannten ‚Quadsplit‘-Bild dargestellt werden. Bild 56 ist eine solche Aufnahme einer innerstädtischen Szene, die die Leistungsfähigkeit von MarVEye verdeutlichen soll.

Die untere Hälfte zeigt die beiden Weitwinkelbilder mit dem zentralen

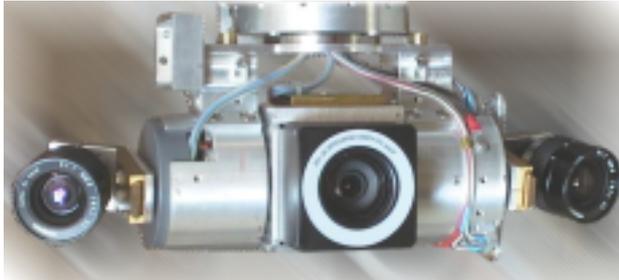
Überlappungsbereich. Das darin zu sehende Fahrzeug wird im Bild der milden Telekamera (oben links, etwa dreimal so groß) nochmals abgebildet; hier ist dessen Nummernschild lesbar. Man erkennt deutlich über dem PKW den vorausfahrenden Kastenwagen. Im Bild oben rechts wird der links markierte Ausschnitt nochmals etwa um den Faktor drei vergrößert, und man ist in der Lage, das Nummernschild des Kastenwagens durch Heck- und Frontwindschutzscheibe des PKW zu lesen. Die Auflösung dieses schwarz/weiß-Bildes ist etwa hundertmal größer als die der Weitwinkelbilder (Zahl der Pixel pro Flächeneinheit in der realen Welt). Der

Vorteil dieser multifokalen Parallelbilder gegenüber einer einzelnen Zoom-Kamera ist die Tatsache, dass diese Bilder mit der unterschiedlichen Auflösung alle gleichzeitig verfügbar sind; man hat gleichzeitig den Überblick und das hochauflösende Detail. Der Ausschnitt mit hoher Auflösung kann schnell an den Ort von Interesse in den Weitwinkel-Bildern verschoben werden (Sakkade).

Zur Untersuchung, ob die beiden Telekameras durch eine einzige Kamera mit variabler Brennweitenverstellung vom Auswerteprozess aus ersetzt werden kann (Bild 57), wurde nach Erscheinen eines



**Bild 57:** Prinzipskizze zum Fahrzeugauge ‘MarVEye’ mit zentraler Zoom-Kamera und weitem motorischem Verstellbereich;  $L_5$  = Entfernung, von der aus 1 Bildpunkt 5 cm normal zur optischen Achse entspricht



**Bild 58:**  
MarVEye 5, ausgelegt für eine zentrale Zoom-Kamera gemäß Bild 57

zweckmäßigen Typs auf dem Markt die Zweiachsen-Plattform gemäß Bild 58 entwickelt; sie hat eine große Stereobasis und mit der zentralen Kamera einen vom Rechner aussteuerbaren Zoom-Bereich von 1 zu 18 optisch; durch digitale Interpolation wird dieses Verhältnis bei maximaler optischer Brennweite auf 1 zu 72 erhöht. (Die Erfahrung muss zeigen, welche Wertebereiche die günstigsten Ergebnisse liefern.)

Da die Auslegung mit einer Ausrichtmöglichkeit für alle Kameras auch im Nicken relativ groß baut, wurde abschließend eine Konfiguration als Kompromisslösung zwischen optischen und mechanischen Gesichtspunkten entwickelt. Die Weitwinkelkameras

sitzen fest auf einer Einachsen-Plattform, die nur um die Hochachse giert (wie Bild 55). Dies liefert einen weiten horizontalen Blickbereich von über 180°. Die Welle ist als große Hohlwelle ausgelegt, in der die Telekamera axial ebenfalls fest eingebaut werden kann. Nickbewegungen werden durch einen Spiegel im Strahlengang kompensiert (zur Stabilisierung); über dessen Ausrichtung wird auch die vertikale Blickrichtung gesteuert.

Diese Konfiguration baut klein und minimiert die Trägheitsmomente; wegen der geringen Trägheit des Spiegels ist in der Nickachse mit wenig Aufwand eine sehr gute Dynamik erzielbar (siehe Bild 59).



**Bild 59:**  
MarVEye 6 mit Spiegel

Alle diese Plattformen sind als prinzipielle Lösungen zur Entwicklung der erforderlichen Regelungs- und Bildverarbeitungs-Algorithmen mit einfachen Mitteln gebaut worden. Für eine noch auszuwählende endgültige Auslegung können durch professionellen Entwurf und Spezifikation bestimmter Bauelemente wesentlich kompaktere Lösungen gefunden werden.

# Stand der Gesamtentwicklung

## Dynamisches maschinelles Sehen:

---

### Erwartungsbasiertes Multifokales Sakkadisches Sehen

Die Sichtbarkeit bei Regen und Nebel lässt im optischen Wellenlängenbereich zu wünschen übrig. Radar ist für diese Fälle der bessere Sensor; allerdings ist die laterale Ortungsgenauigkeit hierbei in der Regel nicht hinreichend. Deshalb wird sich wohl die Kombination mit visuellen Sensoren durchsetzen, wie sie vom Institut in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner untersucht wurde [Hofmann, et al. 00].

Auch für die Anwendungen in der Luftfahrt (Lande-anflug für konventionelle Flugzeuge, Hubschrauberflug in Bodennähe) wird der Einsatz abbildender Radarsensoren untersucht. Die bisherigen Ergebnisse lassen erkennen, dass mit steigender Rechenleistung und verbesserter Sensorik in der nahen Zukunft mit brauchbaren Ergebnissen zu rechnen sein wird.

Welche Rolle Laser-Entfernungsmesser längerfristig spielen werden, ist z.Z. noch nicht abzusehen. Einige Erfahrungen wurden im Primus-

Projekt (mit der Fa. Dornier und deren Entfernungsbild-Kamera EBK) sowie durch die Mitbetreuung einer Dissertation an der UniBw Hamburg gewonnen. Auf diesem Gebiet ist international eine intensive Entwicklung im Gang, die beobachtet werden sollte.

Das Institut war während der letzten 20 Jahre auf globaler Skala wohl eines der aktivsten Zentren zur Entwicklung des dynamischen maschinellen Sehens mit der breitesten Anwendungspalette; die vorangehenden Abschnitte haben gezeigt, dass nicht nur die Luft- und Raumfahrtbereiche bearbeitet wurden. Autonome Flurförderfahrzeuge wurden ebenso untersucht wie Straßenfahrzeuge, die durch das 'Prometheus'-Projekt mit Abstand die größte Aufmerksamkeit gefunden haben; insgesamt wurden sieben Radfahrzeuge und ein Kettenfahrzeug mit Sichtsystemen der UniBwM ausgerüstet, davon die ersten drei in Zusammenarbeit mit dem Institut für Messtechnik der Fakultät.

Die entwickelte Systemarchitektur für Parallelrechner mit einem Konzept, das auch im Hardwareaufbau auf physische Objekte und die Vorhersage von Erwartungswerten für diese ausgerichtet ist, charakterisiert unseren Lösungsansatz. Das bifokale und neuerdings trifokale Sehen mit gleichzeitiger Auswertung von Bildfolgen mit unterschiedlichen Brennweiten (foveal-peripher) und die aktive Blickrichtungssteuerung mit hoher Dynamik machen den Ansatz effizient.

Inertiale Blickrichtungsstabilisierung und merkmalsorientierte Blickfixierung mit der Fähigkeit zur schnellen Umorientierung auf ein anderes Objekt von momentanem Interesse gestatten schnelle Anpassungen an neue Gegebenheiten auch bei größeren Störungen und Eigenbewegungen. Diese Fähigkeit des sog. 'sakkadischen' Sehens wird vom 4-D-Ansatz mit der zeitlichen Modellierung voll unterstützt.

Analysen zur erforderlichen Größe des Gesichtsfeldes und des Auflösungsbedarfs bei verschiedenen Aufgaben der Luft- und Raumfahrt und im Bodenverkehr auf Straßen und im Gelände haben deutlich die Notwendigkeit zur Leistungssteigerung in diese beiden Richtungen erkennen lassen. Für den Nahbereich wurde zusätzlich die Fähigkeit zum binokularen (zweiäugigen) oder gar trinokularen Stereosehen gewünscht, um anhand eines einzigen gut erkennbaren Merkmals den Abstand zu einem Objekt sicher abschätzen zu können.

Die MarVEye-Kameraanordnung realisiert ein großes Gesichtsfeld im Nahbereich und große Ortsauflösung im fovealen Bereich. Die direkte parallele Verfügbarkeit von Bildmaterial auf verschiedenen Auflösungsebenen durch multifokale Kamerasysteme reduziert Totzeiteffekte und – vor allem – den Datenstrom und damit die erforderliche Rechenleistung. Die Anordnung von vier Kameras mit trifokaler Brennweitenauslegung gemäß den Bildern 54 bis 56 hat nur eine Datenrate von etwa 2 bis 3 % im

Vergleich zu einer fächerförmigen Kameraanordnung mit dem gleichen Gesichtsfeld und der hohen Auflösung überall. Diese dem Wirbeltierauge nachempfundene Systemauslegung erfordert die Fähigkeit zur schnellen Blickausrichtung und zur objektorientierten Deutung der Bildsignale im 3-D-Raum und in der Zeit.

Um diese Entwicklung auf eine leicht verallgemeinerbare Basis zu gründen, wurden 4-D-Objektdatenbanken konzipiert und erstellt, die auf den Sehprozess im 4-D-Ansatz zugeschnitten sind. Sie enthalten sowohl die Form- als auch die Bewegungs-Charakteristiken von Objektklassen in generischer Form, so dass nach der Aktivierung mittels einer Objekthypothese noch gewisse Parameter den beobachteten Gegebenheiten angepasst werden können.

‘Subjekte’ sind als Objekte mit der Fähigkeit zur eigenen Betätigung von Steuerungen definiert, die sie in Abhängigkeit von Messdaten oder auf der Basis der Kombination von Messdaten und internen Informationszuständen im Programmsystem betätigen können. Hiermit ist es

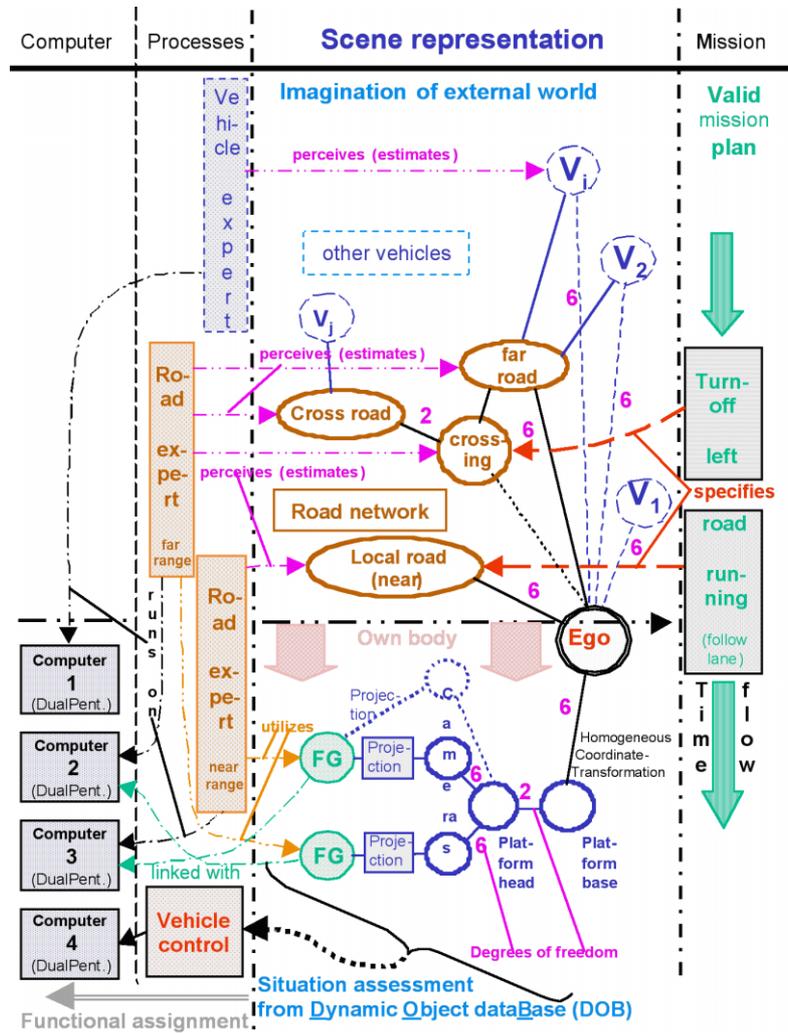
möglich, Verhaltens-Stereotype wie reflexartige Reaktionen auf Störungen oder ereignisabhängige Veranlassungen von zeitlichen Steuersequenzen zu triggern.

Dadurch ergeben sich sehr flexible Möglichkeiten, voll- oder teilautonome Systeme der Zukunft zu entwickeln.

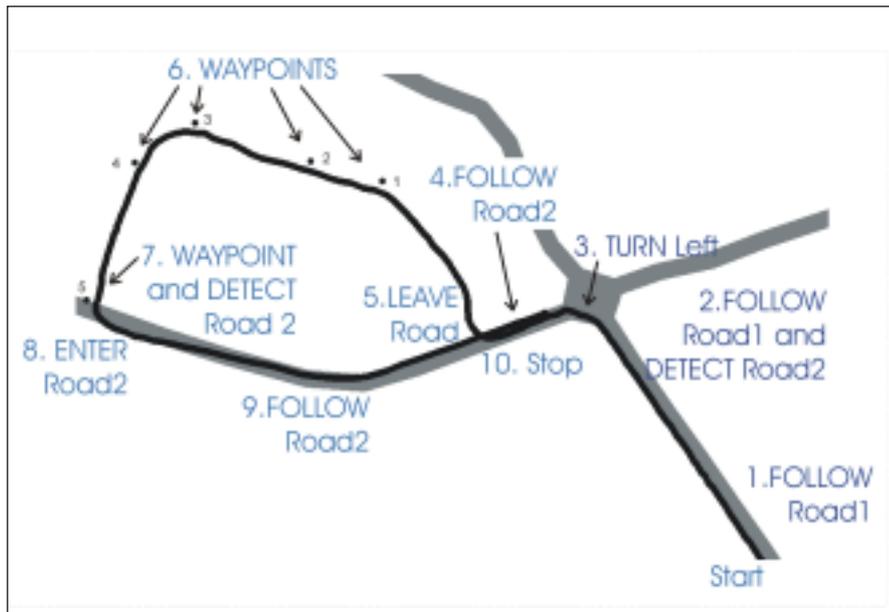
Vollautonome Missionsdurchführung ergibt sich in Kombination mit Wissen verarbeitenden Programnteilen entsprechend Bild 60 und den weiter oben geschilderten Ansätzen bei der Landmarken-Navigation.

Bild 61 zeigt eine autonom ausgeführte Mission auf dem Versuchsgelände ‚Flughafen Neubiberg‘, wie sie mit dem ‚Global Positioning System‘ GPS vermessen wurde: Der Start erfolgte unten rechts auf einer Rollbahn; das Fahrzeug fuhr zunächst der Fahrbahn nach (1), entdeckte den linken Abzweig (2) und bog auf diese Fahrbahn ein (3). Nach einer gewissen Wegstrecke auf der neuen Fahrbahn (4) bog es plangemäß nach rechts ab (5) auf eine Grasfläche.

Hier folgt das Fahrzeug einer Sequenz von Wegpunkten 1 bis 7, die es am Ende etwa rechtwinklig wieder auf die Fahrbahn 2 führt (8). Auf diese biegt es nach links ein und folgt ihr bis zum vorherigen Abzweigpunkt; dort stoppt es (10). Die Annäherung an diese Straße und ihre visuelle Vermessung zeigt Bild 62: Der Graph oben links zeigt über der Zeit, welchem Wegpunkt gerade gefolgt wird. Der mittlere Graph zeigt die geschätzte Entfernung, und der untere den Azimut-Winkel zum nächsten Wegpunkt. Solange das Fahrzeug die Fahrbahn 2 nicht sieht, ergeben sich Abstand und Azimut aus GPS-Messungen (1-Sekunden-Takt (Stufen)). Zum Zeitpunkt 156 Sekunden wird die Hypothese der Querstraße mit einem neuen Wegpunkt in den Szenenbaum eingehängt. Bei 162 Sekunden wird sie visuell erkannt. Rechts erkennt man die zunehmend größere Abbildung der Fahrbahn 2 bei Annäherung; Teilbild a (oben) entspricht dem Zeitpunkt 162 s. Teilbilder b (mitte) und c (unten) sind auf der Zeitachse unten links markiert. Bei etwa 176 Sekunden erreicht das Fahrzeug die Fahrbahn



**Bild 60:** Verteilte Wissenspräsentation in EMS-Vision: Rechner, Prozesse, Szenenbaum zum Befahren einer Kreuzung und Missionsplan-Ausschnitt



**Bild 61:**  
Mit GPS vermessene gefahrene Bahn von VaMoRs bei einer komplexen Missionsfolge

und biegt mit einem getriggerten Manöver auf diese ein, der es dann im Modus ‚Fahrbahn-Folgen‘ bis zum Haltepunkt entlang fährt.

Für Assistenzsysteme, wie sie im Bereich der Flugführung am Institut von Prof. Onken und WM entwickelt werden, sind als Aktivitäten Warnungen bzw. teilweise korrigierende Steuerungsaktivierungen vorgesehen.

Die zu erwartende rapide Weiterentwicklung der Sensor- und der Rechentechnik wird diese autonomen Systeme ständig leistungsfähiger werden lassen (vor allem die der abbildenden Sensoren in den verschiedenen Frequenzbereichen der elektromagnetischen Strahlung). Der Autor ist davon überzeugt, dass diese Entwicklung eine neue Evolutionsstufe der Technik darstellen wird, die auch im gesellschaftlichen

Bereich weitgehende Konsequenzen haben wird.

Die Fähigkeit dieser Systeme zum selbstständigen Lernen wird über die Verbreitung dieser Technik wesentlich mitentschieden. Auf diesem Gebiet werden vom Institut Ansätze favorisiert, die die entwickelten grundlegenden Fähigkeiten in Raum und Zeit ausnutzen. Zu unterscheiden sind dabei generelle Wahrnehmungsfähigkeiten, die auch in überwiegend statischen Umgebungen oder bei stationärem Aufbau der Kameras eingesetzt werden können, und die Verhaltensfähigkeiten, die die Steuerung der Eigenbewegung in unterschiedlichen Situationen betreffen. Auf diesem Gebiet ist noch erhebliche Entwicklungsarbeit zu leisten.

In der folgenden Tabelle sind die erzielten Pionierleistungen auf dem Gebiet des dynamischen maschinellen Sehens übersichtlich zusammengestellt.

Für Anwendungen im Verteidigungsbereich sind abbildende Sensoren wie Infrarotkameras oder Low-Light-Level TV-Kameras von

Interesse. Sie gestatten unter gewissen Bedingungen das Fahren bei

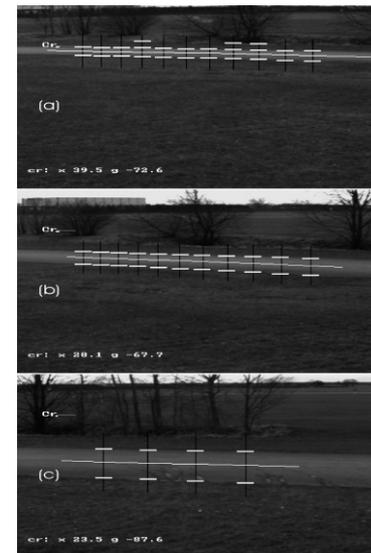
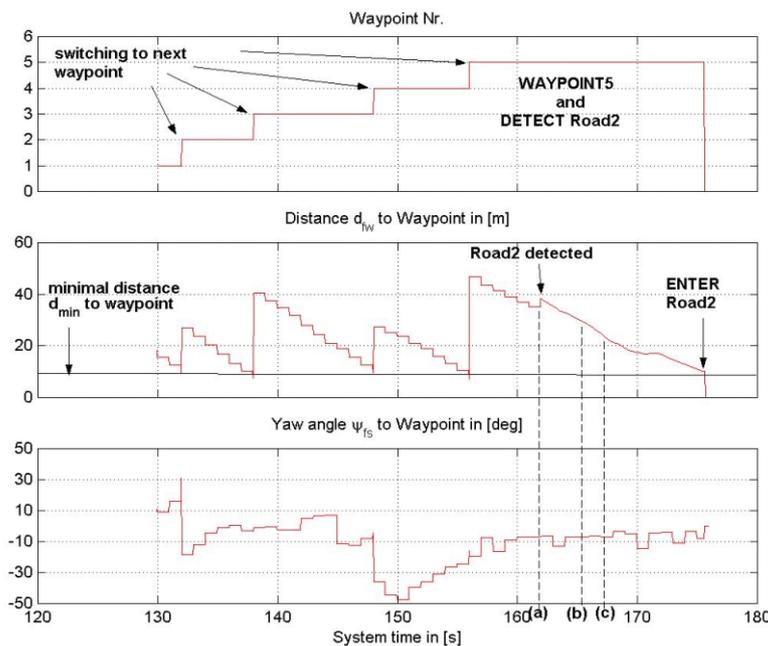
Nacht ohne aktive Beleuchtung. Zur Untersuchung dieser Anwen-

dungsfelder wurden entsprechende Sensoren beschafft und getestet.

*By clicking on the following link you should see a video film made with EMS-Vision and VaMoRs in the year 2000 at the military test site Pfullendorf. The sequence of maneuvers corresponds to phases 1 to 4 in figure 60. However, the roads were relatively small and had a gravel cover, while figure 61 has been documented on the taxiways of the former airport Neubiberg, at which UBM is situated. These taxiways have partly concrete and partly MacAdam surface.*

*Saccadic vision in the film allows to view both the root of the cross road and some part further into the intended direction. This alleviates good estimates for the width and the angle of the crossroad; with these data the turn maneuver is specified in detail.*

Film:  [< Turn-off VaMoRs\\_EMS >](#)  (~2 minutes)



**Bild 62:** Missionsfortschritt bei Querfeldein-Fahrt mit visueller Erkennung der Fahrbahn, auf die aufgefahen werden soll

Datum	Leistungsgegenstand	Details auf S.
.		
1982	Balance eines invertierten Pendels mit einem Elektrokarren	42
1984	Erste simulierte Autofahrt in Echtzeit mit realer Bildverarbeitung im ‚BVV1‘	48
1986	Andocken eines Luftkissenfahrzeugs (Satelliten-Modellregelstrecke)	44
1986	Linien-basierte vollautonome Längs- und Querführung in der Rutschpfanne, VaMoRs	49
1987	Hochgeschwindigkeitsfahrten auf freier Autobahn (96 km/h; > 20 km)	50
1988	Anhalten vor einem stationären Hindernis in definiertem Abstand	55
1990	Erkennung von horizontaler und vertikaler Straßenkrümmung	51
1991	Konvoi-Fahren (Stop and Go)	56
1991	Visueller Landeanflug: vollautonome Schätzung des Relativzustands	73
1992	VaMoRs und VITA fahren vollautonom im normalen Autobahnverkehr mit	55
1992	Erkennen von Querstraßen und Abbiegen auf diese	53
1993	Greifen eines freifliegenden Körpers im All: Spacelab D2, ROTEX	77
1994	Bifokales sakkadisches Sehen	82
1994	Fahren im normalen dreispurigen französischen Autoroute-Verkehr (Paris-Senlis) mit Geschw. bis 130 km/h; parallele Erkennung des Relativzustandes zu 10 anderen Fahrzeugen (vorne und hinten); autonome Entscheidung zum Spurwechsel: PKW-Fahrzeuge VaMP, VITA II (Daimler-Benz AG)	56
1995	Langstreckentest Odense (longitudinal + lateral > 1600km)	
1997	Hardware-In-the-Loop – simulierte Mission für Hubschrauber	79
1999	50 km/h mit Kettenfahrzeug auf Feldweg (Dornier)	54
2000	Anhalten vor Graben (60 cm breit) mit Geschwindigkeiten bis zu 16 km/h auf einer Grasoberfläche (Stereo mit VFE 200 der Sarnoff Corporation)	61

**Tabelle 2: Pionierleistungen auf dem Gebiet des dynamischen maschinellen Sehens (monokular)**

# Promotionen

---

Dr.-Ing. **H.-G. Meissner**

## **Steuerung dynamischer Systeme aufgrund bildhafter Informationen**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. V. Graefe

Tag der Promotion: 20.07.1982

Eine hierarchisch gegliederte Geräteanordnung zur Bewegungssteuerung durch bildhafte Information wurde aufgebaut. Darin übernimmt ein Prozessrechner komplexe Aufgaben zur Steuerung des dynamischen Systems. Die Balance eines invertierten Pendels auf einem Elektrokarren und die Führung eines simulierten Fahrzeugs werden behandelt. Entscheidende Bedeutung hat ein dynamisches Modell des Prozesses, wodurch eine Systemregelung über wenige Bilddaten erfolgen kann. Nach dem Anschluss eines TV-Bildsensorysystems, das einfache Muster erkennt und daraus Messdaten für den Steuerrechner gewinnt, wird ein reales System ausschließlich aufgrund visueller Informationen in Echtzeit automatisch gesteuert. Darauf aufbauend folgen Untersuchungen von besonderen Effekten der Bewegungsinterpretation durch Rechnersehen.

Dr.-Ing. **G. Eberl**

## **Automatischer Landeanflug durch Rechnersehen**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. V. Graefe

Tag der Promotion: 29.06.1987

Die Problemstellung Endphase des Landeanflugs wurde für die Behandlung mittels Rechnersehen (in einem Festsitz-Simulationskreis) grundlegend aufbereitet. Zur Bildsignalverarbeitung und zur Reglerauslegung wurden Lösungen erarbeitet und im Simulationskreis mit vorhandener Hardware zur Echtzeit-Bildfolgeninterpretation getestet. Es konnte nachgewiesen werden, dass mit dem am Institut entwickelten 4-D-Verfahren die Aufgabe mit verfügbarer Mikroprozessortechnologie grundsätzlich gelöst werden kann. Über vier Steuergrößen wurden alle zwölf Zustandsgrößen des Flugzeugs bis zum Aufsetzen auf die Landebahn geregelt; die aerodynamische Anströmgeschwindigkeit wurde als einzige Größe konventionell gemessen (simuliert).

Dr.-Ing. **H.J. Wünsche**

## **Erfassung und Steuerung von Bewegungen durch Rechnersehen**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. V. Graefe

Tag der Promotion: 30.07.1987

Es wurde ein allgemeines Verfahren zum monokularen räumlichen Sehen in Echtzeit bei bekannten Objekten in der Umgebung entwickelt. Anwendungen an zwei Beispielen werden diskutiert: 1. die Balance eines (instabilen) invertierten Pendels auf einem Elektrokarren und 2. das ebene Andocken eines Luftkissenfahrzeugs in einer Modellreglstrecke im Labor an einen dreidimensionalen Partner durch Reaktionsantrieb; dies simuliert eine Andockaufgabe in der Raumfahrt. Das Sichtsystem wählt sich autonom die günstigsten Merkmale zur Relativlagebestimmung aus. Durch die Verwendung eines sequentiellen Ansatzes zur Messwertverarbeitung wird der Interpretationsprozess sehr flexibel bei Verdeckungen und anderen Messwertstörungen. Das entwickelte Verfahren dehnt die Methoden zur rekursiven Zustandsschätzung (Ableitungen aus dem Kalman-Filter) auf die Bildfolgenverarbeitung aus.

---

Dr.-Ing. **A. Zapp**

### **Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns,  
Prof. V. Graefe

Tag der Promotion: 08.09.1988

Das 4-D-Verfahren zum Echtzeit-Rechnersehen wird auf die autonome Führung von Straßenfahrzeugen angewandt. Zwei rekursive Schätzprozesse kooperieren um einerseits die Straßenparameter wie horizontale Krümmung im Vorausschaubereich und andererseits den Relativzustand des Fahrzeugs zur Fahrbahn zu schätzen. Aus diesen Daten werden die Steuergrößen für die Längs- und die Querführung so ermittelt, dass eine gewünschte geschwindigkeitsabhängige Fahrdynamik über den gesamten Betriebsbereich des Fahrzeugs erreicht wird. Bestimmte Verhaltensfähigkeiten wie Spurfahren, Spurwechsel, Anhalten vor oder Umfahren eines Hindernisses werden durch verschiedene Rückkopplungsgesetze bzw. Steuersequenzen erzielt. Die Fahrgeschwindigkeit wird selbsttätig der Fahrbahnkrümmung so angepasst, dass eine maximale Querbeschleunigung nicht überschritten wird. Ergebnisse im Simulationskreis und mit VaMoRs werden dargestellt.

Dr.-Ing. **B. Mysliwetz**

### **Parallelrechnerbasierte Bildfolgeninterpretation zur autonomen Fahrzeugführung**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns,  
Prof. G. Färber (TU München)

Tag der Promotion: 10.08.1990

Ein rechentechnisch sehr effizienter Auswertungsansatz, mit dem Bewegungs-, Lage- und Formparameter in Echtzeit aus monokularen Bildfolgen extrahiert werden können, wird in einer realen Anwendung zur Fahrbahnverlaufs- und Relativlageerfassung eines autonomen Straßenfahrzeugs dargestellt. Mittels dynamischer und geometrischer Modelle, deren Zustände bzw. Parameter über instationäre Kalman-Filter geschätzt und damit den Szenenveränderungen nachgeführt werden, erfolgt eine Interpretation der Bildfolge direkt in regelungsorientierten Größen. Es wird gezeigt, dass der räumlich/zeitliche Modellansatz gerade in natürlichen Szenen dazu genutzt werden kann, aus zunächst überbestimmten und mehrdeutigen Bildmerkmalbeschreibungen bzw. Messwerten die jeweils 'korrekten' zu selektieren. Dadurch gelingt die robuste und genaue Erfassung des Fahrbahnverlaufs sowie der Fahrzeugrelativlage auch unter sehr ungünstigen Beleuchtungs- und Szenenverhältnissen.

Dr.-Ing. **K.-D. Otto**

### **Linear-quadratischer Entwurf mit Strukturvorgaben**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns,  
Prof. C. Landgraf (TU Berlin)

Tag der Promotion: 19.09.1990

Für lineare, kontinuierliche, zeitinvariante Mehrgrößensysteme wird der Zusammenhang zwischen dem indirekten linear-quadratischen Riccati-Entwurf und der direkten Eigenwert/Eigenvektor-Festlegung aufgezeigt. Es werden zwei praktikable Verfahren entwickelt und untersucht, um die Vorteile beider Entwurfsmethoden zu nutzen. Die Funktionstüchtigkeit wird an Beispielen nachgewiesen. Zur weiteren Charakterisierung der im Sinne eines quadratischen Gütekriteriums optimalen Systeme wird das Redundanzproblem des Riccati-Entwurfs für Mehrgrößensysteme vollständig gelöst. Der benutzte neue Ansatz lässt es zu, alle Gütekriterien in Äquivalenzklassen einzuteilen, wobei alle Mitglieder einer Äquivalenzklasse auf denselben Zustandsregler führen. In jeder Klasse gibt es ein nichtredundantes Element, das in einer kanonischen Form dargestellt werden kann. Außerdem kann nachgewiesen werden, dass innerhalb einer Äquivalenzklasse die positive Definitheit der Gewichtungsmatrix für die Zustands-

größen keine invariante Eigenschaft ist. Aufgrund dieser Erkenntnis wird der Begriff "Eignung" von quadratischen Gütekriterien entsprechend neu definiert.

Dr.-Ing. **F.R. Schell**

### **Bordautonomer automatischer Landeanflug aufgrund bildhafter und inertialer Meßdatenauswertung**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. R. Onken

Tag der Promotion: 23.03.1992

Durch eine Kombination von optischer und inertialer Messdatenauswertung ist ein bordautonomer automatischer Landeanflug mit verfügbarer Technik in Echtzeit möglich. Der Ansatz zur Realisierung gelingt über eine Kombination von räumlich/zeitlichen Modellen der Flugzeugdynamik und der Umwelt, in welcher sich das Flugzeug bewegt. Mit Hilfe der Kalman-Filter-Technik werden diese Modelle mit realen, optischen und inertialen, Messdaten verknüpft, wodurch auf den aktuellen Flugzustand geschlossen werden kann. Bei Vorgabe einer dreidimensionalen Sollbahn wird ein vollautomatischer Anflug mit anschließender Landung durchgeführt. Voraussetzung für die Verwirklichung in Echtzeit ist ein hie-

rarchisch strukturierter, paralleler Aufbau im Systemansatz und eine zusätzliche, zeitliche und logische Parallelisierung der einzelnen Ebenen. Als weiterer Beitrag wird ein Schätzverfahren vorgestellt, das basierend auf optischer Information die Breite der Landebahn in Echtzeit ermittelt. Ergebnisse aus Simulation und realen Flugversuchen werden präsentiert und bewertet.

Dr.-Ing. **B. Uhrmeister**

### **Verbesserung der Lenkung eines Luft-Luft-Flugkörpers durch einen abbildenden Sensor**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. K. Well (TU Stuttgart)

Tag der Promotion: 28.04.1992

Es wird untersucht, welche Verbesserung die Ergänzung bzw. der Ersatz des Radars durch einen abbildenden Sensor einem Flugkörper bringt, der ein manövrierendes Luftziel bekämpft. Zunächst werden die Leistungssteigerungen des radargeführten Flugkörpers ermittelt, die der Übergang von einfachen Lenkgesetzen wie der Proportionalnavigation und der Erweiterten Proportionalnavigation hin zu aufwendigeren Lenkungen ergibt, die nach den Verfahren der Linear-Quadratischen Optimierung, der Polfestlegung und des Linea-

ren Differentialspiels entworfen sind. Zwar steigert der Aufwand die Treffgenauigkeit, jedoch kann auch er die Grenze nicht überwinden, die der Glint zieht. Ein dem Glint vergleichbares Messrauschen kennen die abbildenden Sensoren nicht. Ihre wenig verrauschten und verzögerten Messungen gestatten die Filterung recht guter Lenksignale. Eine damit versorgte erweiterte Proportionalnavigation senkt den Trefffehler auf etwa ein Zehntel des mit Radarführung erreichbaren.

Dr.-Ing. **J. Schick**

### **Gleichzeitige Erkennung von Form und Bewegung durch Rechnersehen**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. V. Graefe

Tag der Promotion: 16.06.1992

Mit dem vorgestellten Verfahren werden aus Videobildfolgen synthetisch generierter Szenen die Form und Bewegung von Straßenfahrzeugen erkannt. Der Erkennungsprozess stützt sich auf Bildmessdaten der Objekte zusammen mit räumlich/zeitlichen Modellvorstellungen über Objekte und deren Bewegungen (4D). Die Kanten des räumlichen Objektmodells werden einzeln aus den Abweichungen der projizierten Modellvorstellung zu den Bildmessda-

ten mit Hilfe eines rekursiven Schätzverfahrens über getrennte Schätzprozesse ermittelt. Von der Bildverarbeitung unabhängige Prozesse formieren durch Annahmen über die räumliche Gestalt und das Bewegungsverhalten der Objekte die einzelnen Kanten zu einer verbesserten Modellvorstellung über Form und Bewegung. Der Erkennungsprozess basiert auf kantenorientierten Verfahren bei der Repräsentation von Objekten, der Vermessung von Bildern und der getrennten Schätzung von Formparametern und Bewegungsgrößen. Die Formen der Objekte werden über ein generisches Polyedermodell repräsentiert.

Dr.-Ing. **Ch. Hock**

### **Wissensbasierte Fahrzeugführung mit Landmarken für autonome Roboter**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. R. Onken

Tag der Promotion: 22.02.1994

In der vorliegenden Arbeit wird eine Untersuchung zur wissensbasierten Steuerung von sehenden und verstehenden Maschinen dargestellt, die am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik durchgeführt wurde. Seit eini-

gen Jahren stehen autonome, mobile Roboter (AMR) im Mittelpunkt zahlreicher Forschungsaktivitäten. Außerhalb der industriellen Anwendung als flexible Transportsysteme zeichnen sich zunehmend Einsatzmöglichkeiten im Dienstleistungsbereich ab, etwa Versorgungssysteme in Krankenhäusern oder Reinigungsautomaten in Bahnhöfen. Auch Navigationshilfen und Fahrerunterstützungssysteme profitieren von den Erkenntnissen, die bei der Entwicklung eines autonomen Fahrzeugführungssystems gewonnen werden. Um einem Roboter die Orientierung in seiner Umgebung zu ermöglichen, erweist es sich als sinnvoll, auf das Verfahren der relativen Landmarkennavigation zurückzugreifen. Dazu muss die Maschine in der Lage sein, Objekte und deren räumliche Relativanordnung zu erkennen und zu begreifen. Der Erkennungsprozess stützt sich auf ein rechen-technisch sehr effizientes, modellgestütztes Verarbeitungskonzept zur Echtzeit-Auswertung von monokularen Bildfolgen. Das Verständnis für die Umwelt ergibt sich aus den räumlich/zeitlichen Modellvorstellungen über darin vorhandene Objekte und deren Bewegungsverhalten. Diese Aufgabenstellung bildet die Grundlage für die Entwicklung eines Verfahrens zur wissensbasierten Navigation mit Landmarken für autonome mobile Roboter. Die-

ses wird auf realen Systemen eingesetzt. Die Erprobung wurde sowohl mit dem Autonomen Testfahrzeug für Halbenbereiche zur Entwicklung von Navigations- und Erkennungssystemen (ATHENE) als auch mit dem Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen (VaMoRs) durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsphase werden präsentiert und diskutiert.

Dr.-Ing. **C. Brüdigam**

### **Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. R. Onken

Tag der Promotion: 22.06.1994

In der folgenden Arbeit werden verschiedene Fahrmanöver und die dazu notwendigen Grundlagen wie Modellierung, Sensorauswertung und Reglerentwurf für autonome Fahrzeuge vorgestellt, die sich in gut strukturierten Umgebungen, beispielsweise den deutschen Autobahnen, bewegen können. Wichtigste Signalquelle bei diesem System ist die bifokale Bildverarbeitung, welche die notwendigen Informationen über Fahrbahn und Hindernisse sowie die Relativlage des Fahrzeugs

bezüglich der Fahrbahn liefert. Mit Hilfe eines umfangreichen Sensorpakets werden die Informationen gewonnen, die von der Bildverarbeitung nicht zur Verfügung gestellt werden können. Die Signalverarbeitung und notwendige, automatisch ablaufende Eichprozesse werden vorgestellt. Das Modell für die Fahrzeuglängs- und -querführung wird aufgestellt, anschließend erfolgt die Beschreibung der nötigen Regler in Struktur und Realisierung. Besonders berücksichtigt werden dabei die verschiedenen im System auftretenden Totzeiten. Aufbauend auf dem grundlegenden Fahrmanöver Spurhaltung sind Erweiterungen entwickelt worden wie Spurwechsel, Überholmanöver, Konvoi- bzw. Staufahren und Querführung durch direkte Objektverfolgung ohne Straßensicht. Als Alternative zu den eher klassischen Methoden, mit denen die oben genannten Fahrmanöver realisiert wurden, konnte für die Längsregelung auch ein Ansatz mit Fuzzy Logic verwirklicht werden. Für die Querführung wurde ein Impulssteuermanöver entwickelt, das durch Lerneffekte ohne exakte Modellierung des Systems auskommt. Alle angesprochenen Punkte wurden auf dem Versuchsträger "VaMoRs" des Instituts für Systemdynamik und Flugmechanik realisiert; die Ergebnisse werden vorgestellt und ausführlich diskutiert.

Dr.-Ing. **M. Schmid**

### **3-D-Erkennung von Fahrzeugen in Echtzeit aus monokularen Bildfolgen**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. G. Färber (TU München)

Tag der Promotion: 12.09.1994

Diese Arbeit beschreibt ein Verfahren, das die 3-D-Objekterkennung von gängigen Straßenfahrzeugen in autobahnähnlichen Szenen aus kooperativen monokularen Bildfolgen in Echtzeit auch bei teilweiser Verdeckung gewährleistet. Der beschriebene Ansatz basiert auf einem räumlich/zeitlichen 4-D-Modell zur Objektverfolgung und relativen Zustandsschätzung und auf wissensbasierten Methoden zur Korrespondenzanalyse und Hypothesenüberprüfung. Die Erkennungsaufgabe wird in einer zyklischen Verarbeitungsstruktur gelöst durch die Kombination eines schnellen Algorithmus zur Detektion und Klassifikation im 2-D-Bild mit einem modellgestützten Verfahren zur 3-D-Verfolgung. Die Fahrzeuge werden rechnerintern als symmetrische 3-D-Polyedermodelle repräsentiert. Die Klassifikation unterscheidet drei Objektklassen: LKW, Kleinbus und Fließheck-PKW. Innerhalb dieser drei Objektklassen werden die relevanten Formparameter durch eine gleichzeitige Form- und Bewegungsschätzung

automatisch zur Laufzeit angepasst. Bis zu zwei sich unabhängig bewegende Fahrzeuge können bei einer Zykluszeit von 200 ms in Echtzeit verarbeitet werden. Das auf einem Transputernetz implementierte System mit einer heterarchischen Architektur wurde mit realen Bildsequenzen von Autobahnszenen getestet. Die erzielten Ergebnisse werden mit Videobildern und graphischen Plots dargestellt.

Dr.-Ing. **W. Kinzel**

### **Präattentive und attentive Bildverarbeitungsschritte zur visuellen Erkennung von Fußgängern**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. G. Hauske (TU München)

Tag der Promotion: 16.09.1994

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag, Menschen in typischen Situationen des Straßenverkehrs durch Auswerten von Videobild-Sequenzen automatisch zu erkennen. Ihr besonderes Merkmal ist die enge Verbindung von datengetriebener und modellbasierter Verarbeitung. Bei der Implementation auf einer Workstation wurde berücksichtigt, dass das Verfahren in einem selbstfahrenden Straßenfahrzeug einsetzbar ist. Im einzelnen wird zunächst

die zur Deutung von mehrgliedrigen Objekten nötige Modellierung anhand eines realisierten Animationswerkzeuges dargestellt. Der zentrale Teil, die visuelle Erkennung von Fußgängern, leistet eine anwendungsbezogene Bildaufbereitung. Diese beinhaltet die Auswahl relevanter Bildausschnitte, eine effiziente Konturerfassung, kantenbasierte Segmentierung, erste Regionenzuordnungen und einen Vergleich mit dem allgemeinen Modell einer menschlichen Figur. Hierdurch kann eine Korrespondenz zwischen Bild- und Modellbestandteilen hergestellt werden. Weiter werden Gliedmaßenbewegungen mittels Schätzung der auftretenden Gelenkwinkel bestimmt. Hierbei werden Kalman-Filter für unterschiedliche Bewegungsannahmen verwendet.

Dr.-Ing. **A. Baader**

### **Ein Umwelterfassungssystem für multisensorielle Montageroboter**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. G. Hirzinger (DLR Oberpfaffenhofen)

Tag der Promotion: 04.05.1995

Sowohl im Bereich der Telerobotik als auch für vollautonome Roboterarme kommt dem Aufbau geometrischer

Umweltmodelle aus Sensordaten eine zentrale Bedeutung zu. Die vorliegende Arbeit auf der Basis eines Sensor-in-Hand Roboterarms behandelt den Aufbau eines Umweltmodells mit einer Sensorik, die nicht aus einem festen Montagepunkt in der unbekanntem Roboterarbeitsumgebung misst. Die Sensoren, vor allem Laserentfernungsmesser, Stereokamera und taktile Sensoren, nehmen daher Daten aus einem sich kontinuierlich ändernden Blickwinkel auf. Durch die Bewegung des Robotergreifers entsteht im Koordinatensystem der Roboterbasis eine ungeordnete Sensordatenwolke, die zu einer sinnvollen Beschreibung der Oberfläche der unbekanntem Objekte verarbeitet werden muss. Dazu wurde aus dem Algorithmus der selbstorganisierenden Merkmalskarten von Kohonen ein Verfahren zur Oberflächenrekonstruktion und -modellierung entwickelt. Typische Probleme der Oberflächenrekonstruktion, wie Oberflächenunstetigkeiten, Integration verschiedenartiger Sensorinformation oder Fragen der effizienten Implementierung wurden erfolgreich behandelt.

Dr.-Ing. **J. Schiehlen**

### **Kameraplattformen für aktiv sehende Fahrzeuge**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. A. Böttiger

Tag der Promotion: 02.06.1995

Durch eine gesteuerte Bildaufnahme lässt sich die Leistungsfähigkeit des Rechnersehens wesentlich steigern. Hoch dynamische Zweiachsen-Plattformen mit bifokaler Kameraanordnung für die anspruchsvolle maschinelle Wahrnehmung in intelligenten Fahrzeugen werden vorgestellt. Ein Konzept für die Blickrichtungssteuerung wird erstellt und eine dafür geeignete Regelung entworfen. Für die Blickrichtungssteuerung sind zwei Betriebsarten wichtig, erstens schnelle Blickrichtungsänderungen um interessante Bereiche in den Blickbereich zu bringen und zweitens die Verfolgung eines sich bewegenden Objekts. Durch die rechenleistungsintensive Bildauswertung entsteht eine Totzeit, die durch Prädiktion der geschätzten Objektbewegung auszugleichen ist. Mit einem unterlagerten Drehgeschwindigkeitsregler lässt sich eine gute Störunterdrückung und eine schnelle inertielle Stabilisierung erreichen. Die Leistungsfähigkeit dieses Systems wird in Experimenten gezeigt.

---

Dr.-Ing. **F. Thomanek**

**Visuelle Erkennung und Zustandsschätzung von mehreren Straßenfahrzeugen zur autonomen Fahrzeugführung.**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. G. Färber (TU München)

Tag der Promotion: 25.01.1996

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der visuellen Erkennung von Verkehrsteilnehmern mittels Echtzeit-Bildverarbeitung. Gegenüber bestehenden Systemen wird erstmals eine globale Deutung der Szenerie mit einer vollständigen Zustandsbeschreibung der Bewegung aller Objekte vorgestellt. Dabei werden die Informationen aus vier monochromen Fernsehkameras zur Interpretation herangezogen. - Das System ist in der Lage, bis zu 10 Objekte vom Typ PKW, LKW und mit Einschränkungen Motorrad zu detektieren und mit einer Abtastrate von 12,5 Hz zu verfolgen. Dabei bestehen für die Erkennung bezüglich der Größe, Form und Farbe der Verkehrsteilnehmer keine Einschränkungen. Die räumlich/zeitliche Deutung der Objekte erlaubt zusätzlich eine Überwachung nicht einsehbarer Bereiche. - Das entwickelte Erkennungssystem ist in fünf verschiedene Testfahrzeuge integriert. Insgesamt konnten damit einige tausend Ki-

lometer im öffentlichen Straßenverkehr autonom zurückgelegt werden.

Dr.-Ing. **Ch. Fagerer**

**Automatische Teleoperation eines Tracking- und Greifvorgangs im Weltraum, basierend auf Bilddatenauswertung**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. G. Hirzinger (DLR Oberpfaffenhofen)

Tag der Promotion: 29.01.1996

In dieser Arbeit wird ein System vorgestellt, das die Fernsteuerung eines Roboterarmes im Weltraum von einer weit entfernten Station aus, gestützt auf einer Auswertung von Kamerabildern, ermöglicht, obwohl die Datenübertragungszeit bei diesen Aufgaben mehrere Sekunden betragen kann. Wegen diesen, von Menschen nicht mehr zu bewältigenden, Totzeiten war es bisher nicht möglich, sich bewegende Objekte zu verfolgen und zu greifen. Beschrieben wird dieses System anhand eines Experimentes, das im Rahmen von Rotex während der D2-Mission (2. Deutsche Spacelab Mission) im April/Mai 1993 durchgeführt wurde und das Greifen eines freischwebenden Objektes (genannt Freiflieger) zum Ziel hatte.

Grundlage des Lösungskonzeptes ist die Beschreibung der realen Systeme durch Modelle. Dies betrifft nicht nur die dynamischen Bewegungsmodelle des Roboterarmes und des Freifliegers, sondern auch ein Modell der auftretenden Totzeiten. Dabei werden die Modelldaten durch den Vergleich mit den Messdaten, die aus inertialen Sensoren für den Roboterarm und aus Ergebnissen einer Interpretation von Bilddaten für den Freiflieger gewonnen werden, korrigiert. Die Anpassung der Modelldaten an die Realität wird durch Schätzverfahren verwirklicht, die auf den Methoden der linearen Schätztheorie beruhen und als Kalman-Filter ausgelegt sind. Zur Bestimmung der Lage des Freifliegers wird ein Verfahren eingesetzt, das sich im Rahmen der Forschungsarbeiten des Instituts für Systemdynamik und Flugmechanik der UniBw München als besonders erfolgreich erwiesen hat, dem 4-D-Modellansatz. Mit Hilfe dieses Ansatzes ist es möglich, die dreidimensionale Lage eines Objektes durch die Verwendung eines raum/zeitlichen Modells und der perspektivischen Projektion aus monokularen Bildfolgen zu bestimmen.

Zur Überbrückung der Datenübermittlungszeiten wird ein Verfahren vorgestellt, das die Relativlage vorausschätzt, die nach Ablauf der Übertra-

gung zum Roboter vorhanden sein wird. Dadurch kann zum einen dem Operateur diese Lage grafisch dargestellt werden und zum anderen können Steuergrößen berechnet werden, die für die Automation des Greifvorganges notwendig sind, wodurch eine 'Quasi' totzeitfreie Steuerung möglich wird.

Mit Hilfe dieses Systems, das wirkungsvoll die Stärken des Menschen mit den Vorteilen der Maschine kombiniert, konnte zum ersten Mal ein sich bewegendes Objekt im Weltraum durch einen von der Bodenstation aus gesteuerten Roboter automatisch eingefangen werden.

**Dr.-Ing. N. Müller:**

### **Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Fahrzeug**

Referenten : Prof. E.D. Dickmanns, Prof. R. Onken

Tag der Promotion: 12.03.1996

Zu den grundlegenden Fähigkeiten, die ein vollautonomes System beherrschen muss, zählt das Manövrieren auf engem Raum. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, welches einem Straßenfahrzeug ermög-

licht, autonom in eine Querstraße abzubiegen.

Wesentlich für das Manöver ist das Erkennen und Vermessen der Querstraße durch die Verarbeitung monokularer Bildfolgen in Echtzeit. In Abhängigkeit von den durch Bildverarbeitung ermittelten geometrischen Gegebenheiten an einem Abzweig wird eine Sollbahn berechnet und in Form eines Vorsteuergesetzes für die Längs- und Querführung des Fahrzeugs vorgegeben. Um die Straße während des Kurvenfahrens im Sichtbereich zu halten, wird der Blick in die Querstraße gerichtet. Die Blickrichtungsvorsteuerung stellt einen zentralen Bestandteil des Manövers dar.

Die Verhaltensauswahl, ob abgezweigt werden soll, wird von einem übergeordneten Navigator erwartet. Als Entscheidungsgrundlage für die Verhaltensauswahl dient eine in globalen Koordinaten bestimmte Position. Sie wird unter Verwendung der Messwerte aus Inertialsensoren, aus propriozeptiven Gebern und aus einem GPS-Empfänger ermittelt. Außerdem gehen Schätzwerte aus der Bildverarbeitung in Verbindung mit Kartenwissen in die Positionsbestimmung ein.

Testfahrten, die mit dem "Versuchsfahrzeug zur autonomen Mobilität und Rechnersehen" (VaMoRs) durchgeführt wurden, belegen die Leistungsfähigkeit des Verfahrens.

**Dr.-Ing. R. Behringer:**

### **Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. G. Färber (TU München)

Tag der Promotion: 14.03.1996

In dieser Arbeit wird ein System beschrieben, das eine visuelle Erfassung des räumlichen Fahrbahnverlaufes sowie der eigenen Relativlage zur Fahrbahn mittels Auswertung bifokaler Bildfolgen leistet. Der Kernansatz basiert auf einer rekursiven Zustandsschätzung mittels Kalmanfilterung, wobei der geschätzte Zustandsvektor ein dynamisches Modell der Eigenbewegung sowie ein geometrisches Modell des Straßenverlaufes beschreibt. Wegen seiner Konzeption zum Betrieb in Echtzeit kann dieses System grundsätzlich sowohl zur automatischen Spurhaltung eines Kraftfahrzeugs als auch zur bloßen Messung von Fahrspurkrümmung und -breite während der

Fahrt verwendet werden. Es zeigte seine Praxistauglichkeit im Einsatz in einem Experimentalfahrzeug, mit dem mehrere tausend Kilometer auf europäischen Autobahnen sowie Landstraßen und Feldwegen in autonomer Fahrt zurückgelegt wurden.

Dr.-Ing. **A. Schubert**

### **Synthese diskreter Zustandsregler durch eine Verbindung direkter und indirekter Methoden**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. A. Böttiger

Tag der Promotion: 08.10.1996

Aus dem Bereich des linear-quadratischen Entwurfes für zeitinvariante, diskrete Mehrgrößensysteme werden vier Themengebiete behandelt.

Das Asymptotische Entwurfsverfahren für diskrete Systeme ermöglicht eine Verbindung zwischen der direkten Eigenwert/Eigenvektor-Festlegung und dem indirekten linear-quadratischen Entwurf. Mit den mathematischen Methoden der Eigenwert/Eigenvektor-Festlegung wird ein Idealmodell für den geschlossenen Regelkreis vorgegeben, aus dem die Gewichtungsmatrizen für das quadratische Gütekriterium bestimmt werden. Mittels eines in das Gü-

tekriterium eingeführten sogenannten Kompromissparameters kann das Idealmodell auf Kosten des Stellaufwandes beliebig angenähert werden.

Die Tatsache, dass im Rahmen des linear-quadratischen Entwurfes mehr Parameter im Gütekriterium festzulegen sind, als in dem vollständigen Zustandsregler als Ergebnis des Entwurfes auftreten und somit die Minimierung verschiedener Gütekriterien zu demselben Zustandsregler führt, wird als Redundanzproblem bezeichnet. Durch die Definition von Äquivalenzklassen für die Zustandsgrößengewichtungsmatrix sowie äquivalenter Paare von Zustands- und Steuergrößengewichtungsmatrizen wird dieses Problem vollständig gelöst.

Zur Berechnung der optimalen Zustandsrückführung bei Systemen mit bestimmten singulären Systemmatrizen wird eine neue Vorgehensweise aufgezeigt, bei der die Problemstellung auf ein bekanntes Lösungsschema für nichtsinguläre Systemmatrizen durch Reduktion der Ordnung zurückgeführt werden kann.

Schließlich gelingt es, Aussagen über die Lage der Pole eines diskreten geschlossenen Systems, das optimal im Sinne eines quadratischen Gütekriteriums ist, zu treffen.

Dr.-Ing. **S. Werner**

### **Maschinelle Wahrnehmung für den bordautonomen automatischen Hubschrauberflug**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. R. Onken

Tag der Promotion: 17.07.1997

Diese Arbeit stellt ein maschinelles Wahrnehmungssystem für den bordautonomen automatischen Hubschrauberflug vor. Durch die Auswertung konventioneller bordeigener Sensordaten sowie von Relativlageinformationen zu Landmarken von einem Bildverarbeitungssystem mit rekursiven Schätzverfahren gelingt die Bestimmung des dynamischen Zustands des Hubschraubers. Dabei ergänzen sich die Genauigkeit der Inertialsensoren in höheren Frequenzbereichen mit der Güte der Bildverarbeitung für niedrige Frequenzen bei hoher örtlicher Auflösung.

Basierend auf dieser Zustandsschätzung wird die Flugführungs- und Flugregelungsaufgabe gelöst; vollautomatische Hubschraubermissionen können damit bordautonom durchgeführt werden.

Mit einer Erprobung in Echtzeitsimula-

tionen mit realen Hardware-Komponenten im Kreis konnte unter diversen Randbedingungen die Effizienz des maschinellen Wahrnehmungssystems nachgewiesen werden.

Dr.-Ing. **Markus Maurer**

### **Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. R. Onken

Tag der Promotion: 21.07.2000

In der vorliegenden Arbeit wird ein hardwareunabhängiges Gesamtkonzept für die flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen vorgestellt, das aus langjähriger praktischer Erfahrung mit sehenden Versuchsfahrzeugen abstrahiert wurde. Das Konzept umfasst die hierarchische, verhaltensorientierte Systemarchitektur, die objektorientierte Wissensrepräsentation, die automatische Generierung von Verhalten und die situationsgerechte, maschinelle Verhaltensentscheidung. Der Grad der Automatisierung als neuer Freiheitsgrad im System wird abhängig von der aktuellen Leistungsfähigkeit gewählt, die durch Güte-

maße bestimmt wird. Für die flexible Automatisierung werden geeignete Strukturen zur Generierung von Verhalten vorgestellt. Die Initiative und Verantwortung für autonomes Handeln im System übernimmt die zentrale Entscheidungsinstanz. Die entwickelten Ansätze wurden im Versuchsfahrzeug VaMP erfolgreich getestet, das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde.

International Maßstäbe gesetzt hat VaMP bei Fahrten mit automatischer Quer- und Längsführung im öffentlichen Straßenverkehr. Mit dem erwartungsbasierten, multifokalen, sakkadischen Wahrnehmungssystem wurden exemplarisch die Grade der Automatisierung 'hybrider, adaptiver Tempomat', 'automatische Querführung', 'automatische Notbremsung' und 'autonome Längs- und Querführung' erfolgreich demonstriert.

Dr.-Ing. **André Rieder**

### **Fahrzeuge sehen - Multisensorielle Fahrzeugerkennung in einem verteilten Rechnersystem für autonome Fahrzeuge**

Referenten: Prof. E.D. Dickmanns, Prof. B. Radig (TU München)

Tag der Promotion: 24. 10. 2000

Die Dissertation befasst sich mit der Verwirklichung eines erwartungsbasierten, multifokalen, sakkadischen Wahrnehmungssystems zur Steuerung autonomer Fahrzeuge.

Durch die überwiegende Verwendung von Standardkomponenten ist das System offen für zukünftige Fortschritte auf dem Prozessor- und Zubehörmarkt. Die Vernetzung mehrerer Rechner erlaubt eine freie Skalierbarkeit. Die Defizite der PC-Systeme in Bezug auf Echtzeitfähigkeit, Synchronisation und Kommunikation werden durch entsprechende softwaretechnische Erweiterungen behoben.

Besonderer Wert wird darauf gelegt, die bisher einzeln nachgewiesenen Fähigkeiten der Fahrzeugführung in einem einheitlichen Gesamtsystem zusammenzuführen. Dazu werden mit Hilfe der dynamischen Objektdaten-

---

basis und einer vereinheitlichten Repräsentation der Szene die nötigen Kommunikationsmöglichkeiten geschaffen, über die sowohl Kontroll- als auch Datenfluss abgewickelt werden können.

Die Wahrnehmung basiert auf unterschiedlichen Sensoren, überwiegend aber auf der Auswertung von Videobildern. Diese stammen von einem MarVEye genannten Kamerasystem, bestehend aus vier Kameras mit drei verschiedenen Brennweiten. Dieses Fahrzeugauge ist auf einer Plattform montiert, so dass es vom System ausgerichtet werden kann. Echtzeitfähige Bildverarbeitungsalgorithmen, die durch Stereo- und Bewegungsanalyse diese besondere Kameraanordnung ausnutzen, werden vorgestellt.

Die Verarbeitung der Daten erfolgt nach dem 4D-Ansatz zur maschinellen Wahrnehmung. Das vorgestellte System unterstützt den Aufbau der dabei benötigten Form- und Dynamikmodelle und stellt für einige Objekte allgemeinen Interesses fertige Modelle zur Verfügung. Die Realisierung des Kalmanfilters wird dahingehend erweitert, dass es den Anforderungen eines verteilten Systems gerecht wird.

Der experimentelle Nachweis der Leistungsfähigkeit des Systems wurde anhand der Erkennung von Fremdfahrzeugen mittels Radar und Videodaten erbracht.

## **Erwartete Dissertationen:**

### **Baten:**

**Erkennung der 3-D Oberflächenstruktur**

### **von Holt:**

**Erkennung von 3-D Objekten bei Bewegung**

### **Lützeler:**

**Fahrbahnerkennung zum Manövrieren auf Wegenetzen mit aktivem Sehen**

### **Fürst:**

**Landeanflug mit EMS-Vision**

### **Gregor:**

**Fähigkeiten zur Landmarken-Navigation und Missionsdurchführung**

### **Pellkofer:**

**Aufmerksamkeits- und Blickrichtungssteuerung in EMS-Vision**

### **Siedersberger:**

**Fahrzeugsteuerung mit EMS-Vision**

### **Hofmann:**

**Rein visuelles Staufahren mit EMS-Vision**

# Veröffentlichungen

## 1975-1981

### **Dickmanns E.D.; Well K.H.:**

Approximate Solution of Optimal Control Problems Using Third-Order Hermite Polynomial Functions. IFIP-TC 7, VI Techn. Conf. on Optimization Techniques, Novosibirsk (1974). Proc. Springer-Verlag, 1975

### **Dickmanns E.D.:**

Efficient Convergence- and Mesh-refinement Strategies for Solving General ordinary Two-Point-Boundary-Value Problems by Collocated Hermite Approximation. 2nd IFAC Workshop on Control Applications of Nonlinear Programming and Optimization, Oberpfaffenhofen, Sept. 1980

### **Dickmanns E.D.:**

Optimaler Delphin-Segelflug. XVII. OSTIV Congress, Paderborn, 1981

## 1982

### **Meissner H.G.:**

Steuerung dynamischer Systeme aufgrund bildhafter Informationen. Dissertation, 1982

## 1983

### **Dickmanns E.D.:**

Zeitoptimaler dynamischer Streckensegelflug, Zeitschrift für Flugwissen-

schaften und Weltraumforschung (ZFW), Vol. 2, Vol. 3, 1983

### **Dickmanns E.D.:**

Collocated Hermite Approximation Applied to Optimally Periodic Dolphin-Style Soaring. Proceedings of the 4th IFAC-Workshop on Control Applications of Nonlinear Programming and Optimization, San Francisco, June 1983

### **Meissner H.G.; Dickmanns E.D.:**

Control of an Unstable Plant by Computer Vision. In T.S. Huang (ed): Image Sequence Processing and Dynamic Scene Analysis. Springer-Verlag, Berlin, 1983, pp 532-548

## 1984

### **Dickmanns E.D.:**

Optimal Dolphin-Style Soaring. Aero-Revue 2, 1984, pp 33-35

### **Dickmanns E.D.; Zapp A.; Otto K.-D.:**

Ein Simulationskreis zur Entwicklung einer automatischen Fahrzeugführung mit bildhaften und inertialen Signalen. In Breiteneker, et al. (ed): Simulationstechnik, Informatik-Fachberichte 85, Springer-Verlag, 1984, pp 554-558

## 1985

Dickmanns E.D.: Systemanalyse und Regelkreissynthese, Teubner Verlag, Stuttgart, 1985

### **Dickmanns E.D.:**

2-D-Object Recognition and Representation using Normalized Curvature Functions. In M.H. Hamza (ed): Proc. IASTED Int. Symposium on Robotics and Automation, Acta Press, 1985, pp 9-13

### **Dickmanns E.D.:**

Normierte Krümmungsfunktionen zur Darstellung und Erkennung ebener Figuren. In H. Niemann (ed): Mustererkennung 1985, Informatik Fachberichte 107, Springer-Verlag, 1985, pp 58ff

### **Dickmanns E.D.; Wünsche H.-J.:**

Drehlage-Regelung eines Satelliten durch Echtzeit-Bildfolgenverarbeitung. In H. Niemann (ed): Mustererkennung 1985, Informatik Fachberichte 107, Springer-Verlag, 1985, pp 239-243

### **Dickmanns E.D.; Zapp A.:**

Guiding Land Vehicles Along Roadways by Computer Vision. Proc. Congres Automatique 1985, AFCET, Toulouse, 1985, pp 233-244

**Zapp A.; Kuhnert K.-D.:**

Wissensgesteuerte Bildfolgenauswertung zur automatischen Führung von Straßenfahrzeugen in Echtzeit. In H. Niemann (ed): Mustererkennung 1985, Informatik Fachberichte 107, Springer-Verlag, 1985, pp 102-106

**1986****Dickmanns E.D.; Wünsche H.-J.:**

Satellite Rendezvous Maneuvers by Means of Computer Vision. Jahrestagung der DGLR, München, Okt. 1986. In: Jahrbuch 1986 Bd. 1 der DGLR, Bonn, pp 251-259

**Dickmanns E.D.; Wünsche H.-J.:**

Regelung mittels Rechnersehen. Automatisierungstechnik (at), 34 1/1986 pp. 16-22

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

A Curvature-based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision. In: 'Mobile Robots', SPIE Proc. Vol. 727, Cambridge, Mass., Oct 1986, pp 161-168

**Myśliwetz B.; Dickmanns E.D.:**

A Vision System with Active Gaze Control for real-time Interpretation of Well Structured Dynamic Scenes. In L.O. Hertzberger (ed): Proc. of 1st

Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-1), Amsterdam, Dec. 1986, pp 477-483

**Wünsche H.-J.:**

Detection and Control of Mobile Robot Motion by Real-Time Computer Vision. In N. Marquino (ed): Advances in Intelligent Robotics Systems. Proc. of the SPIE, Vol. 727, 1986, pp 100-109

**1987****Dickmanns E.D.:**

4-D-Dynamic Scene Analysis with Integral Spatio-Temporal Models. 4th Int. Symposium on Robotics Research, Santa Cruz, 1987

**Dickmanns E.D.:**

4-D-Szenenanalyse mit integralen raum/zeitlichen Modellen. In E. Paulus (Hrsg.): Mustererkennung 1987, Informatik Fachberichte 149, Springer-Verlag, 1987, pp 257-271

**Dickmanns E.D.; Eberl G.:**

Automatischer Landeanflug durch maschinelles Sehen. Jahrestagung der DGLR (DGLR-Jahrbuch 1987), Berlin, 1987, pp 294-300

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

Autonomous High Speed Road Vehicle

Guidance by Computer Vision. 10th IFAC World Congress Munich, Preprint Vol. 4, 1987, pp 232-237

**Eberl G.:**

Automatischer Landeanflug durch Rechnersehen. Dissertation, UniBwM/LRT, 1987

**Myśliwetz B.; Dickmanns E.D.:**

Distributed Scene Analysis for Autonomous Road Vehicle Guidance. Proc. SPIE Conference on Mobile Robots, Vol. 852, Cambridge, USA, Nov 1987, pp 72-79

**Wünsche H.-J.:**

Bewegungssteuerung durch Rechnersehen. Dissertation, UniBwM/LRT, 1987

**1988****Dickmanns E.D.:**

Computer Vision for Flight Vehicles. Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung (ZFW), Vol. 12 (88), 1988, pp 71-79

**Dickmanns E.D.:**

Dynamic Computer Vision for Mobile Robot Control. In R.A. Jarvis (ed): Proc. of the Int. Symposium and Exposition on Robots, Sydney, Nov 1988, pp 314-327

**Dickmanns E.D.:**

An Integrated Approach to Feature Based Dynamic Vision. Int. Conference on Vision and Pattern Recognition (CVPR), Ann Arbor, 1988, pp 820-825

**Dickmanns E.D.:**

Object Recognition and Real-Time Relative State Estimation Under Egomotion. In A.K. Jain (ed): Real-Time Object Measurement and Classification. Springer-Verlag, Berlin, 1988, pp 41-56

**Dickmanns E.D.:**

Vehicle Guidance by Computer Vision. In Linkwitz et al. (eds.): Workshop Documents 'High Precision Navigation', Symposium May 1988, Stuttgart, Springer-Verlag, Berlin 1989, pp 86-96

**Dickmanns E.D.; Graefe V.:**

Sehendes Auto fährt Weltrekord. Hochschulkurier UniBwM Nr. 14, 1988

**Dickmanns E.D.; Graefe V.:**

a) Dynamic monocular machine vision. Machine Vision and Applications, Springer International, Vol. 1, 1988, pp 223-240. b) Applications of dynamic monocular machine vision. (ibid), 1988, pp 241-261

**Mysliwetz B.; Dickmanns E.D.:**

Ein verteiltes System zur Echtzeitinterpretation von Straßenszenen für die

autonome Fahrzeugführung. In R. Lauber (ed): Prozeßrechensysteme, Informatik Fachberichte 167, Springer-Verlag, 1988, pp 664-673

**Wünsche H.-J.:**

Bewegungssteuerung durch Rechnersehen. Fachberichte Messen, Steuern, Regeln Bd. 10, Springer-Verlag, Berlin, 1988

**Zapp A.:**

Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen, Dissertation, Uni BwM/LRT, 1988

**Zapp A.; Graefe V.:**

Die Möglichkeiten autonom mobiler Systeme. Int. Symp. Forschung und neue Technologien im Verkehr, 1988

## 1989

**Dickmanns E.D.:**

Vehicle Control through Computer Vision. In Singh (ed): Systems & Control Encyclopedia, 1. Supplement. Pergamon Books Ltd., Oxford, 1989

**Dickmanns E.D.:**

Subject-Object Discrimination in 4-D Dynamic Scene Interpretation by Machine Vision. Proc. IEEE-Workshop on Visual Motion, Newport Beach, 1989, pp 298-304

**Dickmanns E.D.:**

Simulation for the Development of a Visual Autopilot-System for Road Vehicles. In M.R. Heller (ed): Automotive Simulation. Springer-Verlag, Berlin, May 1989, pp 11-22

**Dickmanns E.D.:**

Dynamic Computer Vision for Autonomous Road Vehicle Guidance. 21st Int. Symp. on Automotive Technology and Automation, Wiesbaden, 1989 (ISATA)

**Dickmanns E.D.; Christians T.:**

Relative 3-D-state Estimation for Autonomous Visual Guidance of Road Vehicles. In T. Kanade et al (eds): 'Intelligent Autonomous Systems 2', Amsterdam, Dec. 1989, Vol. 2, pp 683-693;

**Schell F.-R.; Dickmanns E.D.:**

Autonomous Automatic Landing through Computer Vision. AGARD Conference Proc. No. CP-455: Advances in Techniques and Technologies for Air Vehicle Navigation and Guidance, Lissabon, May 1989, pp 24.1-24.9

## 1990

### **Dickmanns E.D.:**

Visual Dynamic Scene Understanding Exploiting High-Level Spatio-Temporal Models. 10th Int. Conference on Pattern Recognition, Computer Architecture for Vision and Pattern Recognition, Atlantic City, N.J., 1990

### **Dickmanns E.D.:**

Dynamic Vision for Intelligent Motion Control. Proc. IEEE-Workshop on Intelligent Motion Control, Istanbul, 1990

### **Dickmanns E.D.; Mysliwetz B.; Christians T.:**

Spatio-Temporal Guidance of Autonomous Vehicles by Computer Vision. IEEE-Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No. 6, 1990, Special Issue on Unmanned Vehicles and Intelligent Robotic Systems, pp 1273-1284

### **Mysliwetz B.:**

Parallelrechnerbasierte Bildfolgen-Interpretation zur autonomen Fahrzeugsteuerung. Dissertation, Uni BwM/LRT, 10.8.1990

### **Otto K.-D.:**

Linear-quadratischer Entwurf mit Strukturvorgaben. Dissertation, Uni BwM/LRT, 19.9.1990

## 1991

### **Dickmanns E.D.:**

Vehicle guidance by computer vision. In Papageorgiou (ed.): Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems, Pergamon Press, Oxford, pp 597-602

### **Dickmanns E.D.:**

Active Vision through Prediction-Error-Feedback. NATO Advanced Study Institute on Active Perception and Robot Vision, Maratea, Italy, July 89. Springer-Verlag, 1991

### **Dickmanns E.D.:**

Dynamic Vision and Multi-Sensor Data Fusion Exploiting High-Level Spatio-temporal Models, 1991, IJCAI, Sydney

### **Dickmanns E.D.:**

Visuelle autonome Straßenfahrzeugführung. Techn. Akademie Esslingen, 2. Symp. Bildverarbeitung, 1991

### **Dickmanns E.D.:**

4-D Dynamic Vision for Intelligent Motion Control. In C. Harris (ed): Int. Journal for Engineering Applications of AI (IJEAAI), Special Issue 'Intelligent Autonomous Vehicles Research', Vol. 4, No. 4, pp 301-307, 1991

### **Dickmanns E.D.; Christians T.:**

Relative 3-D-State Estimation for Autonomous Visual Guidance of Road Vehicles. Int. Conf. on Robotics and Autonomous Systems, Vol. 7, Elsevier Science Publ., pp 113-123, 1991

### **Hock C.:**

Landmark Navigation with ATHENE. 5. Int. Conf. on Advanced Robotics, Pisa, Italy, June 1991

### **Schick J.; Dickmanns E.D.:**

Simultaneous Estimation of 3-D Shape and Motion of Objects by Computer Vision. IEEE Workshop on Visual Motion, Princeton, N.J., 1991

### **Uhrmeister B.:**

Verbesserung der Lenkung eines Luft-Luft-Flugkörpers durch einen abbildenden Sensor. Dissertation, UniBwM/LRT, 1992

## 1992

### **Behringer R.; von Holt V.;**

### **Dickmanns D.:**

Road and Relative Ego-State Recognition. In: Proc. Int. Symp. 'Intelligent Vehicles', IEEE, SAE, Detroit, 1992

**Dickmanns E.D.:**

Expectation-Based Dynamic Scene Understanding. In A. Blake and A. Yuille (eds.): „Active Vision“, MIT Press, Cambridge, Mass., 1992, pp. 303-335

**Dickmanns E.D.:**

A General Dynamic Vision Architecture for UGV and UAV. Journal of Applied Intelligence 2, 1992, pp. 251-270

**Dickmanns E.D.:**

Vision Based Intelligent Control of Autonomous Vehicles. Proc. of 11th European Meeting on Cybernetics and Systems Research EMCSR, Wien, 1992

**Dickmanns E.D.:**

Machine Perception Exploiting High-Level Spatio-Temporal Models. AGARD Lecture Series 185 'Machine Perception', Hampton, VA, Munich, Madrid, Sept./Oct. 1992

**Dickmanns E.D.; Mysliwetz B.:**

Recursive 3-D Road and Relative Ego-State Recognition. IEEE-Transactions PAMI, Vol. 14, No. 2, Special Issue on 'Interpretation of 3-D Scenes', Feb 1992, pp 199-213

**Dickmanns E.D.; Schell F.-R.:**

Visual Autonomous Automatic Landing of Airplanes. AGARD Symp. on Advances in Guidance and Control of Pre-

cision Guided Weapons, Ottawa, May 1992

**Fagerer C.; Hirzinger G.:**

Predictive Telerobotic Concept for Grasping a Floating Object. IFAC, Spacecraft Automation and On-Board Autonomous Mission Control, Darmstadt, Sept. 1992

**Hock C.; Dickmanns E.D.:**

Intelligent Navigation for Autonomous Robots Using Dynamic Vision. XVII-th Congress of the Int. Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Washington, D.C., Aug. 1992

**Kinzel W.; Dickmanns E.D.:**

Moving Humans Recognition Using Spatio-Temporal Models. XVII-th Congress of the Int. Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Washington, D.C., Aug. 1992

**Müller N.:**

Feedforward Control for Curve Steering for an Autonomous Road Vehicle. IEEE Int. Conference Robotics and Automation, Nice, 1992, pp 200-205

**Schell F.R.:**

Computer Vision for Autonomous Flight Guidance and Landing, IFAC Symposium Aerospace Control '92, Otobrunn, Sept. 1992

**Schell F.R.:**

Bordautonomer automatischer Landeanflug aufgrund bildhafter und inertialer Meßdatenauswertung, Dissertation, UniBwM/LRT, 23.3.1992

**Schell F.R.; Dickmanns E.D.:**

Autonomous Landing of Airplanes by Dynamic Machine Vision. Proc. IEEE-Workshop on 'Applications of Computer Vision', Palm Springs, Nov/Dec 1992

**Schick J.:**

Gleichzeitige Erkennung von Form und Bewegung durch Rechnersehen, Dissertation, UniBwM/LRT, 16.6.1992

**Schmid M.:**

Recognition of Partially Occluded Moving Objects. XVII th Congress of the Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Washington D.C., 1992

**Thomanek F.; Dickmanns D.:**

Obstacle Detection, Tracking and State Estimation for Autonomous Road Vehicle Guidance. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, (IROS) Vol. II, Raleigh, 1992, pp. 1399-1406

## 1993

### **Behringer R.:**

Quantitative Kurserfassung einer Fahrspur durch Befahren mit einem sehenden Fahrzeug. DAGM, Lübeck, 1993

### **Dickmanns E.D.:**

Active Bifocal Vision in Automatic Road Vehicle Guidance. Int. Conf. on Digital Signal Processing and II Int. Conf. on Computer Applications to Engineering Systems, Cyprus, 1993

### **Dickmanns E.D.:**

Bifocal Vision for Mobile Robot Control. IEEE Internat. Symp. on Industrial Electronics (ISIE), Budapest, 1993

### **Dickmanns E.D.:**

Bifocal Dynamic Vision for Vehicle Control. 6th Internat. Symp. on Robotics Research, Hidden Valley, PA, 1993

### **Dickmanns E.D.; Behringer R.;**

### **Brüdigam C.; Dickmanns D.;**

### **Thomanek F.; v. Holt V.:**

An All-Transputer Visual Autobahn-Autopilot/Copilot. Proc. ICCV'93, Berlin, May 1993. Also in TAT/WTC'93, Aachen, Sept. 1993

### **Schiehlen J.; Dickmanns E.D.:**

Two-Axis Camera Platform for Machine Vision. AGARD Conference Proc. 539 'Pointing and Tracking Systems', Seattle 1993, pp 22-1 - 22-6

### **Schmid M.:**

Real Time Recognition of Partially Occluded Vehicles by Dynamic Vision. ECC, Groningen, NL, 1993

### **Schmid M.; Thomanek F.:**

Real Time Detection and Recognition of Vehicles for an Autonomous Guidance and Control System. Pattern Recognition and Image Analysis, Vol. 3, No. 3, 1993, pp 377-380

### **Semenov A.:**

Numerical Optimization of Aircraft Trajectories in the Presence of Wind-shear - AIAA-93-549. AIAA/DGLR Fifth International Aerospace Planes and Hypersonics Technologies Conference, Munich, Germany, 1993

## 1994

(Die mit \* gekennzeichneten Veröffentlichungen sind zusammenfassende Berichte am Ende des Prometheus-Projektes auf dem Symposium Intelligent Vehicles '94, im Text mit [IV '94] referenziert.)

### **\*Behringer R.:**

Road Recognition from Multifocal Vision. In Masaki (ed.): Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles '94, Paris, Oct. 1994, pp 302-307

### **Behringer R.; Hötzl S.:**

Simultaneous Estimation of Pitch Angle and Lane Width from the Video Image of a Marked Road. IEEE-Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'94), Neubiberg, Sept. 1994

### **Brüdigam C.:**

Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung. Dissertation, Uni BwM/LRT, 22.6.1994

### **Dickmanns E.D.:**

The 4-D Approach to Visual Control of Autonomous Systems. AIAA/NASA Conf. on Intelligent Robots in Field, Factory, Service and Space (CIRFFSS) Houston, TX, March 1994, pp 483-493

**Dickmanns, E.D.:**

The 4-D-Approach to Dynamic Machine Vision. 33rd IEEE Conference on Decision and Control, Lake Buena Vista, FL, Dec. 1994

**Dickmanns E.D.:**

Active Bifocal Vision. In: S. Impedovo (ed.). Progress in Image Analysis and Processing III, World Scientific Publ. Co. Singapore, 1994, pp 481-496

**\*Dickmanns E.D.; Behringer R.; Dickmanns D.; Hildebrandt T.; Maurer M.; Thomanek F.; Schiehlen J.:**

The Seeing Passenger Car 'VaMoRs-P'. In Masaki (ed): Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles '94, Paris, Oct. 1994, pp 68-73

**Dickmanns E.D.; Fagerer C.; Dickmanns D.:**

Visual Grasping with Long Delay Time of a Free Floating Object in Orbit. 4th IFAC Symposium on Robot Control (SY.RO.CO.'94), Capri, Italy, 1994, pp 947-952

**Dickmanns E.D.; Werner S.; Kraus S.; Schell F.-R.:**

Experimental Results in Autonomous Landing Approaches by Dynamic Machine Vision. SPIE Conf. 'Image Sensing, Processing, and Understanding for Guidance and Control of Aerospace Vehicles', Orlando, FL, 1994

**Fagerer C.; Dickmanns E.D.;****Dickmanns D.:**

Visual Grasping with Long Delay Time of a Free Floating Object in Orbit. J. Autonomous Robots, Vol. 1, No. 1, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1994

**Hock C.:**

Wissensbasierte Fahrzeugführung mit Landmarken für autonome Roboter. Dissertation, UniBwM/LRT, 22.2.1994

**Hock C.; Behringer R.; Thomanek F.:**

Intelligent Navigation for a Seeing Road Vehicle using Landmark Recognition. In: 'Close Range Techniques and Machine Vision', ISPRS, Melbourne, 1994

**\*v. Holt V.:**

Tracking and Classification of Overtaking Vehicles on Autobahnen. In Masaki (ed): Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles'94, Paris, Oct. 1994, pp 314-319

**Kinzel W.:**

Pedestrian Recognition by Modelling their Shapes and Movements. In S. Impedovo (ed.): Progress in Image Analysis and Processing III; Proc. of the 7th International Conference on Image Analysis and Processing, International Association for Pattern Recognition (IAPR), Sept. 1993, World Scientific, Singapore, 1994, pp. 547-554

**Kinzel W.:**

Präattentive und attentive Bildverarbeitungsschritte zur visuellen Erkennung von Fußgängern. Dissertation, Uni BwM/LRT, 16.9.1994

**Maurer M.; Behringer R.; Dickmanns D.; Hildebrandt T.; Thomanek F.; Schiehlen J.; Dickmanns E.D.:**

VaMoRs-P An Advanced Platform for Visual Autonomous Road Vehicle Guidance. SPIE Conference 'Mobile Robots IX', Oct. 31 - Nov 4, 1994, pp 239-248

**Schell F.R.; Dickmanns E.D.:**

Autonomous Landing of Airplanes by Dynamic Machine Vision. Machine Vision and Application, Vol. 7, No. 3, 1994, pp 127-134

**\*Schiehlen J.; Dickmanns E.D.:**

A Camera Platform for Intelligent Vehicles. In Masaki (ed): Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles '94, Paris, Oct. 1994, pp 393-398

**Schiehlen J.; Dickmanns E.D.:**

Design and Control of a Camera Platform for Machine Vision. IEEE -Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'94), Neubiberg, Sept. 1994, pp 2058-2063

---

**Schmid M.:**

An Approach to Modelbased 3-D-Recognition of Vehicles in Real Time by Machine Vision. IEEE-Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'94), Neubiberg, Sept. 1994

**Schmid M.:**

3-D-Erkennung von Fahrzeugen in Echtzeit aus monokularen Bildfolgen. Dissertation, UniBwM/LRT, 12.9.1994

**\*Thomanek F.; Dickmanns E.D.; Dickmanns D.:**

Multiple Object Recognition and Scene Interpretation for Autonomous Road Vehicle Guidance. In Masaki (ed): Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles '94, Paris, Oct. 1994, 231-236

---

**1995**

---

**Baader A.:**

Ein Umwelterfassungssystem für multisensorielle Montageroboter. Dissertation, UniBwM/LRT, 4.5.1995

**Baten S.; Müller N.:**

Navigation with an Autonomous Vehicle on Arbitrary Roads. In Linkwitz et al. (eds): High Precision Navigation. Dümmler Verlag, Bonn, 1995, pp. 415-442

**Dickmanns E.D.:**

Road vehicle eyes for high precision

navigation. In Linkwitz et al. (eds): High Precision Navigation. Dümmler Verlag, Bonn, 1995, pp 329-336

**Dickmanns E.D.:**

Performance Improvements for Autonomous Road Vehicles. Proc. Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems (IAS-4), Karlsruhe, 1995, pp 2-14

**Dickmanns E.D.:**

Driving Simulator Software Techniques as Means for Perceptual Integration in Autonomous Vehicles. 4th European Cars/Trucks Symposium, Schliersee, 1995, Springer Verlag

**Dickmanns E.D.:**

Parallel Use of Differential and Integral Representations for Realising Efficient Mobile Robots. Proc. 7th International Symposium on Robotics Research, Munich, Oct. 1995

**Dickmanns E.D.; Müller N.:**

Scene Recognition and Navigation Capabilities for Lane Changes and Turns in Vision-Based Vehicle Guidance. Control Engineering Practice, 2nd IFAC Conf. on Intelligent Autonomous Vehicles-95, Helsinki 1995

**Dickmanns E.D.; Baten S.:**

3-D surface recognition by recursive estimation methods. Conf. on Digital

Photogrammetry and Remote Sensing '95, St. Petersburg, Russia, SPIE Vol. 2646, 1995, pp 225-232

**Dickmanns E.D.; Thomanek F.;****Maurer M.:**

Multi Object Tracking. UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Deliverable D2.3.5 ESPRIT Project 8329 CLEOPATRA, Neubiberg, May 1995

**Müller N.; Baten S.:**

Image Processing based Navigation with an Autonomous Car. Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems, IAS-4, Karlsruhe, 1995, pp 591-98

**Schiehlen J.:**

Kameraplattformen für aktiv sehende Fahrzeuge. Dissertation, 2.6.1995

**Thomanek F.; Dickmanns E.D.:**

Autonomous Road Vehicle Guidance in Normal Traffic. Proc. ACCV '95, Singapore, 1995

**Werner S.; Buchwieser A.;****Dickmanns E.D.:**

Real-Time Simulation of Visual Machine Perception for Helicopter Flight Assistance. Proc. SPIE - Aero Sense, Orlando, FL, April 1995

---

## 1996

### **Behringer R.:**

Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug. Dissertation, 14.3.1996

### **Behringer R.; Maurer M.:**

Results on Visual Road Recognition for Road Vehicle Guidance. In Masaki (ed): Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles '96, Tokyo, Sept. 1996, pp 415-420

### **Dickmanns E.D.:**

Entwicklungsschritte zur Erhöhung von Sicherheit und Komfort durch sehende Autos. Automatisierungstechnik 44, Sonderheft 'Regelungstechnik im Auto', Oldenbourg Verlag, München, Mai 1996

### **Fagerer C.:**

Automatische Teleoperation eines Tracking- und Greifvorgangs im Welt- raum basierend auf Bilddatenauswertung. Dissertation, UniBwM/LRT, 29.1.1996

### **IBer. 96:**

20 Jahre Institut für Systemdynamik und Flugmechanik. Festschrift, Jan. 1996

### **Lützeler M.; Dickmanns E.D.;**

#### **Maurer M.:**

Ein kompaktes System zur visuellen Straßenerkennung. 18. DAGM Symposium Mustererkennung 1996, Heidelberg, Sept. 1996, pp 619-626

### **Maurer M.; Behringer R.; Fürst S.; Thomanek F.; Dickmanns E.D.:**

A Compact Vision System for Road Vehicle Guidance. 13th Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR), Vienna, Austria, August 25-29, 1996, pp 313-317

### **Maurer M.; Dickmanns E.D.:**

Seeing vehicles on 'Autobahnen'. EUROmotor, Telematic/Vehicle and Environment, Aachen, Nov. 11-12, 1996

### **Maurer M.; Thomanek F.; Dickmanns E.D.:**

Motion Understanding. UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Deliverable D2.3.7 ESPRIT Project 8329 CLEOPATRA, Neubiberg, March 1996

### **Müller N.:**

Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Straßenfahrzeug. Dissertation, UniBwM/LRT, 12.3.1996

### **Rieder A.:**

Trinocular Divergent Stereo Vision. 13th Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR), Vienna, Austria, August 25-29, 1996, pp 859-863

### **Schubert A.:**

Synthese diskreter Zustandsregler durch eine Verbindung direkter und indirekter Methoden. Dissertation Uni BwM/LRT, 8.10.1996

### **Thomanek F.:**

Visuelle Erkennung und Zustandsschätzung von mehreren Straßenfahrzeugen zur autonomen Fahrzeugführung. Dissertation, UniBwM/LRT, 25.1.1996

### **Werner S.; Fürst S.; Dickmanns D.; Dickmanns E.D.:**

A vision-based multisensor machine perception system for autonomous aircraft landing approach. Enhanced and Synthetic Vision AeroSense '96, SPIE, Vol. 2736, Orlando, FL, April 1996, pp 54-63

## 1997

### **Dickmanns E.D.:**

Vehicles Capable of Dynamic Vision. Proc. 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97), Vol. 2, Nagoya, Japan, 1997, pp 1577-1592

### **Dickmanns E.D.:**

Simultaneous use of differential and integral models for joint visual/inertial perception. SFB 527 Symp. on 'Hybrid Information Processing in Adaptive Autonomous Vehicles', Reisenburg (Günzburg), June 22-24, 1997.

### **Dickmanns E.D.:**

Parallels between simulation techniques for vehicle motion and perceptual integration in autonomous vehicles. Proc. European Simulation Symposium (ESS'97), Passau, Oct. 1997, pp 5-12

### **Dickmanns E.D.; Fürst S.; Schubert A.; Dickmanns D.:**

Intelligently controlled feature extraction in dynamic scenes. UniBwM/LRT/WE 13/FB/97-1, 1997

### **Dickmanns D.:**

Rahmensystem für visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer. Dissertation, UniBwM, INF, 1997

### **Fürst S.; Werner S.; Dickmanns D.; Dickmanns E.D.:**

Landmark navigation and autonomous landing approach with obstacle detection for aircraft. AeroSense '97, SPIE Proc. Vol. 3088, Orlando FL, April 20-25, 1997, pp 94-105

**Fürst S.; Werner S.; Dickmanns E.D.:** Autonomous Landmark Navigation and Landing Approach with Obstacle Detection for Aircraft. 10th European Aerospace Conference 'Free Flight', Amsterdam, NL, Oct. 20-21, 1997, pp 36-1 – 36-11

### **Gregor R.; Baten S.; von Holt V.; Lützel M.; Maurer M.; Rieder A.; Dickmanns E.D.:**

A low-cost vision system for automotive applications. Proc. 30th ISATA, Florence, Italy, June 16-19, 1997, pp 195-201

### **Lützel M.; Dickmanns E.D.:**

Steigerung der Robustheit bei der Straßenerkennung. 5. TAE Symposium Bildverarbeitung, Esslingen, Nov. 1997

### **Maurer M.; Dickmanns E.D.:**

An advanced control architecture for autonomous vehicles. AeroSense '97, SPIE Proc. Vol. 3087, Orlando FL, April 20-25, 1997, pp 94-105

### **Maurer M.; Dickmanns E.D.:**

A System Architecture for Autonomous Visual Road Vehicle Guidance. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC '97), Boston, MA, Nov. 9-12. 1997.

### **Werner S.:**

Maschinelle Wahrnehmung für den bordautonomen automatischen Hub-schrauberflug. Dissertation,, UniBwM, LRT, 17.7.1997.

## 1998

### **Baten S.; Lützel M.; Dickmanns E.D ; Mandelbaum R.; Burt P.:**

Techniques for Autonomous Off-Road Navigation. IEEE Intelligent Systems, Vol. 13, No. 6, 1998, pp 57-65

### **Dickmanns E.D.:**

An Approach to Robust Dynamic Vision. Proc. Workshop on Robust Vision Systems, Leuven, May 1998.

### **Dickmanns E.D.:**

Information Processing Architecture for Mission Performance of Autonomous Systems Capable of Dynamic Vision. SCI Symp. on "The Application of Information Technologies (Computer Science) to Mission Systems", Monterey, CA, 20-22 April 1998.

**Dickmanns E.D.:**

Expectation-based, Multifocal, Saccadic Vision for Perceiving Dynamic Scenes (EMS-Vision). In C. Freska (ed.): Proc. in Artificial Intelligence, Vol. 8, 1998, pp 47-54

**Dickmanns E.D.:**

Autonomes Fahren – Sehende Fahrzeuge für den Straßenverkehr. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 4/1998, 1998.

**Dickmanns E.D.:**

Vehicles capable of dynamic vision: a new breed of technical beings? Artificial Intelligence 103, Elsevier, 1998, pp 49-76

**Fürst S.; Werner S.; Dickmanns E.D.:**

A single-computer HWIL simulation facility for real-time vision systems. SPIE Proc. Vol. 3368, Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-loop Testing III AeroSense '98, Orlando, FL, 13-17 April 1998.

**Fürst S.; Dickmanns E.D.:**

A Vision Based Navigation System for Autonomous Aircraft. 5th Int. Conf. on Intelligent Autonomous Vehicles 'IAS-5', Sapporo, JP, June 1998, pp 765-774

**von Holt V.; Baten S.:**

Perceptual Architecture for a Vision System of Autonomous Vehicles. Intern. Conf. on Intelligent Vehicles, Stuttgart, Okt. 1998.

**Lützel M.; Dickmanns E.D.:**

Road recognition with MarVEye. Intern. Conf. on Intelligent Vehicles, Stuttgart, Okt. 1998.

**Maurer M.:**

A Framework for Flexible Automation of Semi-autonomous Land Vehicles. IEEE Intern. Symp. on Intelligent Control (ISIC), Gaithersburg, Maryland, Sept. 14-17, 1998, pp 531-536

**Schubert A.; Dickmanns E.D.:**

Real-Time Gaze Observation for Tracking Human Control of Attention. In: H. Wechsler, P.J. Phillips, V. Bruce, F.F. Soulié, T. Huang (ed.): Face Recognition: From theory to Applications, Springer, Berlin, 1998, pp 617-626

**1999****Dickmanns E.D.; Wuensche H.-J.:**

Dynamic Vision for Perception and Control of Motion. In: B. Jaehne, H. Haußenecker and P. Geißler (eds.) Handbook of Computer Vision and Applications, Vol. 3, Academic Press, 1999, pp 569-620

**Dickmanns E.D.; Maurer M.:**

Eine Systemarchitektur für sehende autonome Fahrzeuge. at – Automatisierungstechnik 47, Heft 2, R. Oldenbourg Verlag, 1999, pp 70-79

**Dickmanns E.D.:**

An Expectation-based, Multi-focal Saccadic (EMS) Vision System for Vehicle Guidance. Intern. Symp. on Robotics and Research (ISRR'99), Salt Lake City, Utah, October 9-12, 1999

**Fürst S., Dickmanns E.D.:**

A vision based navigation system for autonomous aircraft. Robotics and Autonomous Systems 28, 1999, pp 173-184

**2000**

*(Die mit \* gekennzeichneten Veröffentlichungen sind zusammenfassende Berichte auf dem Symposium Intelligent Vehicles '00, im Text mit [IV '00] referenziert.)*

**Dickmanns E.D.; Maurer M.:**

Expectation-based, Multi-focal, Saccadic (EMS-) Vision for Vehicle Guidance. IFAC Symposium on Control in Transportation Systems 2000, Braunschweig, 13-15 June 2000

---

**Dickmanns E.D.:**

Expectation-based, Multi-focal, Saccadic (EMS) Vision for Ground Vehicle Guidance. IFAC Conference on Mechatronic Systems, Darmstadt, Germany, Sept. 18-20, 2000

**Dickmanns E.D.:**

Vertebrate-type Vision for Autonomous Vehicles. Conf. 'Intelligent Systems and Applications' (ISA'2000), Symposium 4: Biologically Inspired Systems (BIS'2000), Univ. of Wollongong, Australia, Dec. 12-15, 2000

**Dickmanns E.D.:**

A Distributed Visual Perception System for Road Vehicle Guidance. Conf. 'Intelligent Systems and Applications' (ISA'2000), Symposium 3: Industrial Systems (IS'2000), Univ. of Wollongong, Australia, Dec. 12-15, 2000

**\*Lützel M.; Dickmanns, E.D.:**

EMS-Vision: Recognition of Intersections on Unmarked Road Networks. Proc. Int. Symp. on Intelligent Vehicles (IV'2000), Dearborn, (MI) , Oct. 4-5, 2000

**\*Gregor R.; Lützel M.; Pellkofer M.; Siedersberger K.H.; Dickmanns E.D.:**

EMS-Vision: A Perceptual System for Autonomous Vehicles. Proc. Int. Sympo-

sium on Intelligent Vehicles (IV'2000), Dearborn, (MI), Oct. 4-5, 2000

**\*Gregor R.; Dickmanns E.D.:**

EMS-Vision: Mission Performance on Road Networks. Proc. Int. Symp. on Intelligent Vehicles (IV'2000), Dearborn, (MI), Oct. 4-5, 2000

**\*Hofmann U.; Rieder A; Dickmanns E.D.:**

EMS-Vision: Application to Hybrid Adaptive Cruise Control. Proc. Int. Symp. on Intelligent Vehicles (IV'2000), Dearborn, (MI), Oct. 4-5, 2000

**\*Maurer M:**

Knowledge Representation for Flexible Automation of Land Vehicles. Proc. Int. Symp. on Intelligent Vehicles (IV'2000), Dearborn, (MI), Oct. 4-5, 2000

**\*Pellkofer M.; Dickmanns E.D.:**

EMS-Vision: Gaze Control in Autonomous Vehicles. Proc. Int. Symp. on Intelligent Vehicles (IV'2000), Dearborn, (MI), Oct. 4-5, 2000

**\*Siedersberger K.-H.:**

EMS-Vision: Enhanced Abilities for Locomotion. Proc. Int. Symp. on Intelligent Vehicles (IV'2000), Dearborn, (MI), Oct. 4-5, 2000

---

**2001****Dickmanns E.D.:**

Efficient Computation of Intensity Profiles for Real-Time Vision. Proc. Workshop 'Robot Vision 2001', Auckland, Feb. 2001

**Gregor R.; Lützel M.; Dickmanns E.D.:**

EMS-Vision: Combining on- and off-road driving. SPIE AeroSense'01: Unmanned Ground Vehicle Technology III, Orlando, FL, April 2001

**Gregor R.; Lützel M.; Pellkofer M.; Siedersberger K.-H.; Dickmanns E.D.:**

A Vision System for Autonomous Ground Vehicles with a Wide Range of Maneuvering Capabilities. ICVS, Vancouver, July 2001

**Hofmann U.; Rieder A.; Dickmanns E.D.:**

Radar and Vision Data Fusion for Hybrid Adaptive Cruise Control on Highways. Proc. ICVS, Vancouver, July 2001

**Siedersberger K.-H.; Pellkofer M.; Lützel M.; Dickmanns E.D.; Rieder A.; Mandelbaum R.; Bogoni I.:**  
Combining EMS-Vision and Horopter Stereo for Obstacle Avoidance of Auto-

---

nomous Vehicles. Proc. ICVS Vancouver, July 2001

**Gregor R.; Lützeler M.; Pellkofer M.; Siedersberger K.-H.; Dickmanns E.D.:**

EMS-Vision: A Perceptual System for Autonomous Vehicles. ITS-Journal 'Special Issue IEEE Trans on ITS' (to appear)

**Pellkofer M.; Lützeler M.; Dickmanns E. D.:**

Interaction of Perception and Gaze Control in Autonomous Vehicles. Proc. of Intelligent Robots and Computer Vision XX: Algorithms, Techniques, and Active Vision, SPIE International Symposium, Boston, Oct. 2001

**Dickmanns E.D.:**

Komplexes technisches Auge aus normalen CCD-Sensoren zur dynamischen Umgebungserfassung. Proc. Symp. „Bildverarbeitung 2001“, Ostfildern, Nov. 2001

# Eingeworbene Drittmittel-Forschungsaufträge

---

## 1.4.82 – 30.9.84

**Verwendung von Modellen zur Verbesserung der Interpretation dynamischer Szenen.** Im Rahmen des Förderprogramms Informationstechnologie des BMFT

## 1.10.84 – 30.6.87

**Erfassung und Steuerung von Bewegungen in einer technischen Umgebung durch Fernsehbildfolgen – Verarbeitung** (DFG)

## 1.7.85 – 31.12.86

**Multisensorielle Objekterkennung in natürlicher Umgebung** (MBB)

## 1.7.86 – 31.12.89

**Steigerung der Verkehrssicherheit durch automatische Hinderniserkennung und Fahrzeugführung;** Teil des Verbundprojektes „Autonom mobile System“ (BMFT, Daimler-Benz AG)

## 15.9.86 – 31.12.89

**Autonomes Landfahrzeug, Phase I** (BMVg)

## 10.12.86 – 31.12.92

**Rechnersehen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Fahrerunterstützung auf Autobahnen;** Teil des Eureka-Projektes PROMETHEUS, Verbundprojekt Pro-Art (BMFT, FhG, Daimler-Benz AG und andere Autohersteller; zusammen mit Prof. Onken im eigenen Institut, dem LRT-Institut für Meßtechnik und dem Informatik-Institut 2 (Prof. Niegel))

## 30.6.87 – 30.6.91

**4-D-Szenenerkennung mit integralen raum/zeitlichen Modellen** (DFG)

## 1.7.88 – 31.3.89

**Simulation eines Satellitenandockmanövers** (TZN/Rheinmetall)

## 1.4.89 – 30.9.89

**Simulation und Visualisierung eines Freifliegers im schwerelosen Raum** (DLR)

## 1.10.89 – 30.6.93

**Greifen eines Freifliegers** mit einem Roboterarm im Rahmen der D2-Mission (DLR)

## 1.7.90 – 31.12.94

**Bordautonomer Landeanflug** 1, 2, 3 (DFG)

## 1.1.90 – 31.12.92

**Autonomes Landfahrzeug, Phase II** (BMVg)

## 1.7.91 – 30.6.92

**4-D-Szene mit Krümmungen** (DFG)

## 29.1.92 – 31.7.92

**Experimentalprogramm Gefechtsfeldrobotik** (Dornier/Dasa)

## 1.1.93 – 31.12.94

**Erhöhung der Verkehrssicherheit durch sehende Autos – Phase III;** Teil des Eureka-Projektes PROMETHEUS III (BMFT, Daimler-Benz AG, zusammen mit Informatik-Institut 2 (Prof. Niegel))

### 1.2.93: - 31.12.01

**Intelligente Fahrzeugfunktionen**  
1, 2 und 3 (BMVg / BWB)

### 7.4.93 – 1997

**Studie PRIMUS** Portierung eines Verfahrens zur bordautonomen Erkennung von Wegen (Konturen) und zur eigenen Relativzustandsbestimmung auf das Experimentalfahrzeug „Robotik“, (Dornier/ DASA)

### 1.9.93 – 2001

**Crew Assistant Military Aircraft**  
I bis IV (CAMA, Prof. Onken):  
Teilprojekte  
Computer Vision External  
Computer Vision Internal

### 1.4.94 – 1996

**Cleopatra** (EG: High Performance Computing and Networking): Smart Helicopter (mit Eurocopter Deutschland ECD, DLR) Smart Vehicle (mit Daimler-Benz AG)

### 11/96 – 10/01

**Autonav<sup>4</sup>**: US – German Project (Agreement No. A-96-005) Concerning the Development of a Next Generation Autonomous Vehicle Navigation System (BWB)

### 1997 – 1999

**PRIMUS C**: Konturtracker und Zweiachsen-Plattform (Dornier/ DASA)

### 1997 – 1998

**Ein eingebettetes System zum sakkadischen maschinellen Sehen.** (DFG; Teil des Schwerpunktprogramms Entwurf und Entwurfmethodik eingebetteter Systeme)

### 1998 – 1999

**Hybrid Adaptive Cruise Control** (HACC); Radar-Kamera-System zur autonomen Abstandshalterung auf Schnellstraßen, Mannesmann VDO-AG

*An dieser Stelle sei allen Partnern für die erfolgreiche und vertrauensvolle Zusammenarbeit gedankt. Insbesondere die Anregungen aus praxisnahen Aufgabenstellungen mit unvorhersehbaren Schmutzeffekten sowie der Wettstreit mit Konkurrenten haben zur Entwicklung robuster Verfahren beigetragen.*

Die Gesamtsumme der Drittmittel betrug über 16 Millionen DM; dies entspricht ca. 125 Personenjahren.

# Gastprofessuren – Vortragsreihen

---

## Gastprofessuren:

### Frühjahr 1996

California Institute of Technology (CalTec), Pasadena CA, USA  
Course on ‚**Dynamic Vision for Intelligent Vehicles**‘

### Herbst 1998

Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge MA, USA  
Course on ‚**Dynamic Vision for Intelligent Vehicles**‘

### November 2000

University of Minnesota, Minneapolis, USA (2000)

## Gastaufenthalte mit Vortragsreihen:

### September 1981

National Defense Academy, Yokosuka, Japan  
Lecture Series on ‚**Optimal Trajectories and Numerical Methods**‘

### September 1986

Beijing University of Aeronautics & Astronautics, VR China  
Lecture Series on ‚**Optimal Trajectories and Numerical Methods**‘

### September 1995

University of Manchester, Manchester, UK,  
Lecture Series on ‚**Teaching Vehicles to See**‘

### Mai 1999

University of Bilbao, Spanien,  
Lecture Series on ‚**Dynamic Vision for Intelligent Vehicles**‘ in connection with the Spanish Conf. on Pattern Recognition 1999

### März/April 2001

Australian National University, Canberra, Australia  
Lecture Series on ‚**Vision for Road Vehicles**‘

# Lehre

---

Von den Universitäten und Technischen Hochschulen der Bundesrepublik Deutschland weisen 17 einen Diplomstudiengang ‘Maschinenbau’ aus. Mehrere dieser Universitäten/Hochschulen bieten auf dieser Basis die Studienrichtung ‘Luft- und Raumfahrttechnik’ an. Die TU Berlin führt die Studienrichtung ‘Luft- und Raumfahrttechnik’ im Fachbereich ‘Verkehrswesen’. Zwei Universitäten haben einen eigenständigen Diplomstudiengang ‘Luft- und Raumfahrttechnik’ eingerichtet. Zu diesen beiden zählt die Universität der Bundeswehr München.

Der Diplomstudiengang ‘Luft- und Raumfahrttechnik’ an der Universität der Bundeswehr München umfasste über 2 Jahrzehnte ein gemeinsames Grundstudium bis einschließlich 7. Trimester, sowie im Hauptstudium die beiden Studienrichtungen ‘Luft- und Raumfahrttechnik’ (LRT) und ‘Ingenieurplanungstechnik’ (IPT). Letztere legt mehr Gewicht auf die wirtschaftlichen Aspekte des Ingenieurwesens. Die Verwandtschaft zwischen ‘Luft- und Raumfahrttechnik’ und

‘Maschinenbau’ ist im Grundstudium ausgeprägt, mit einer Tendenz zur Betonung der mathematisch orientierten Fächer in der Luft- und Raumfahrttechnik.

In der Studienrichtung LRT wurden gemäß einem Vorschlag des Autors von Mitte der 70-er Jahre zunächst sechs Schwerpunkte zur Vertiefung angeboten; später kam eine siebte auf dem Gebiet der Festigkeit und Bauweisen hinzu (siehe folgende Tabelle):

- Thermodynamik,
- Fluiddynamik,
- Systemdynamik,
- Antriebe,
- Flugzeugbau,
- Raumfahrttechnik,
- Leichtbaustrukturen.

Die Vertiefungsrichtung ‘Systemdynamik’ wurde vom ISF betreut.

Das Curriculum für die Studienrichtung LRT umfaßt 9 Trimester, eingeschlossen zwei Studienarbeiten sowie ein 10. Trimester für die Diplomarbeit und die Abschlussprüfung.

# Studienablauf Luft- und Raumfahrttechnik nach dem Vordiplom

<b>T5</b>	Meßtechnik I	Flugmechanik I	Strömungsmechanik I	Steuer- und Regelungstechnik I	Einführung Elektronik		
<b>T6</b>	Meßtechnik II	Flugmechanik II	Strömungsmechanik II	Raumfahrttechnik I	Aerodynamik I	Num. Math. III	Leichtbau I
<b>T7</b>	Wärme- u. Stoffübertrag.	Luftfahrttechnik I	Strömungsmaschinen I	Steuer- und Regelungstechnik II	Rechneranw. II	Werkstoffe I	

<b>T8</b>	App.Praktik. I	Prozeßthermodyn.	Chem. Thermodyn.	Luft-/Raumfahrttechnik II	Rechneranw. III	Wahlpflichtfach	<b>Schwerpunkt</b>
<b>T9</b>	App.Praktik. II	Kälte- u. Klimat.	W a h l p f l i c h t f ä c h e r				<b>Thermodynamik</b>

<b>T8</b>	App.Praktik. I	Aerodynamik II	Strömungsphysik	Luft-/Raumfahrttechnik II	Rechneranwendung III	<b>Schwerpunkt</b>	
<b>T9</b>	App.Praktik. II	Höh. Ström. Mech.	W a h l p f l i c h t f ä c h e r				<b>Fluid-dynamik</b>

<b>T8</b>	App.Praktik. I	Anthropotechnik	Flugnavigation	Flugregelung	Luft-/Raumfahrttechnik II	Rechneranwendung III	<b>Schwerpunkt</b>
<b>T9</b>	App.Praktik. II	W a h l p f l i c h t f ä c h e r				<b>System-dynamik</b>	

<b>T8</b>	App.Praktik.	Strömungs- masch. II	Antriebs- komponenten	Luft-/Raum- fahrttechnik II	Werkstoffe II.4	<b>Schwer- punkt</b>
<b>T9</b>	Raketenantr.	W a h l p f l i c h t f ä c h e r				<b>Antriebe</b>

<b>T8</b>	App.Praktik.	Luftfahrt- fahrttechnik II	Strömungs- masch. II	Leichtbau II	Werkstoffe II.5	<b>Schwer- punkt</b>
<b>T9</b>	Luftfahrt- technik III	W a h l p f l i c h t f ä c h e r				<b>Flugzeug- bau</b>

<b>T8</b>	App.Praktik.	Luft-/Raum- fahrttechnik II	Astro- dynamik	Lagereg./ Dynamik	Werkstoffe II.6	<b>Schwer- punkt</b>
<b>T9</b>	Raketenantr.	W a h l p f l i c h t f ä c h e r				<b>Raumfahrt- technik</b>

<b>T8</b>	Werkstoffe II.7	Luft-/Raum- fahrttechnik II	Leichtbau II	Struktur- dynamik		<b>Schwer- punkt</b>
<b>T9</b>	App. Praktikum	Finite Elemente	W a h l p f l i c h t f ä c h e r			<b>Leichtbau- strukturen</b>

# Novellierung des Studienkonzeptes Ende der 90er Jahre

Mit der Personalreduktion an der UniBw in den 90-er Jahren wurde das Curriculum überarbeitet und neuen technischen Entwicklungen angepasst.

Die Mikrominiaturisierung in der Elektronik bei Sensoren, Kommunikationsmitteln und Datenverarbeitungsanlagen hatte zu der Möglichkeit der Systemintegration auf kleinstem Raum geführt. „Mechatronik“ trat auf der Komponentenebene als Schlagwort für integrierte mechanisch/elektronische Systeme auf und hat sich als neues Fachgebiet mit eigenen Fachtagungen / Sitzungen etabliert.

Vor dem Hintergrund der erfolgreichen Forschungsarbeiten an autonomen Boden- und Luftfahrzeugen an der Fakultät LRT der UniBwM schlug der Autor im Rahmen der Umstrukturierung eine Verbreiterung des Technikfeldes für die Fakultät vor. Da eine Mehrheit der Kollegen für eine Reduktion der Zahl der Vertiefungsrichtungen war, ergaben sich im Lauf einer mehr-

jährigen Diskussion schließlich neben der fortbestehenden Ingenieur-Planungstechnik vier technische Vertiefungsrichtungen auf der Systemebene:

1. Luftfahrttechnik,
2. Raumfahrttechnik,
3. Antriebssystemtechnik
4. Technik autonomer Systeme.

Bezüglich der Ausgestaltung der letzteren folgte die Fakultät weitgehend den Vorschlägen des Autors.

Dieses Gebiet wird mit fortschreitender Mikrominiaturisierung in Zukunft eine zunehmend wichtige Rolle spielen, vor allem auch im militärischen Bereich; sehende und autonom handlungsfähige Fahrzeuge aller Art sind nur ein Teilgebiet dieses Spektrums, das längerfristig fakultätsübergreifend organisiert werden sollte.

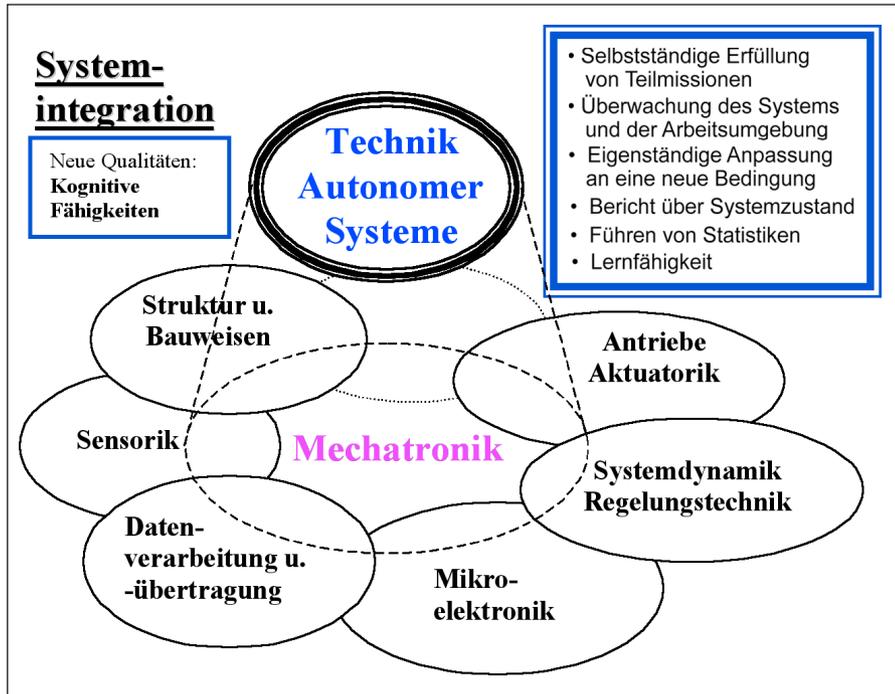
Eine allgemeine Einführung wird im folgenden Abschnitt gegeben. Den detaillierteren Vorschlag enthält Anhang C

## Vertiefungsrichtung TAS

Die folgende Abbildung soll verdeutlichen, dass die Technik Autonomer Systeme mehr ist als die Abstimmung aller Teilsysteme auf der Komponentenebene, was im wesentlichen durch den Begriff ‚Mechatronik‘ gekennzeichnet wird. Durch die Systemintegration mit Sensor- und Wissensbasierter Wahrnehmung, autonomer Entscheidungsfindung und Verhaltensrealisierung im Missionszusammenhang wird eine neue Qualität erreicht: Kognitives Verhalten. Dies macht die zukünftigen Systeme flexibel einsetzbar mit reduzierten Anforderungen an eine Betreuung durch den Menschen. Diese Systeme sollen auf das Zusammenspiel mit dem Menschen hin ausgelegt sein und dessen natürlichen Kommunikationsfähigkeiten entsprechen.

## Einführung

Luftfahrttechnik und Raumfahrttechnik werden auch in Zukunft im Verteidigungsbereich eine besonders wichtige Rolle spielen; die Beherrschung der Spitzentechnik ist nach wie vor für den Ausgang von



Auseinandersetzungen von entscheidender Bedeutung. Durch die zunehmende Leistungsfähigkeit automatischer (Teil-) Systeme und bei Abnahme der Größe der Streitkräfte werden autonome Fähigkeiten technischer Systeme an Bedeutung gewinnen, auch wenn der Mensch stets im Kreis bleiben soll. Bei Flugkörpern, Drohnen und Satelliten haben automatische Teilsysteme, bei den letzten beiden mit Te-

lepräsenz des Menschen über (breitbandige) Kommunikation, schon weitestgehend Einzug gehalten.

Mit der verfügbar werdenden Fähigkeit zum autonomen Erfassen der Umwelt über einen technischen Gesichtssinn und der daraus resultierenden 'Intelligenz' werden die bisherigen besonderen Fähigkeiten des Menschen an Bord für die Missionsdurchführung weiter entbeh-

lich. Bei Verlustgeräten mit einfachen Aufgaben wie z.B. Flugkörpern ist dieser Schritt bereits abgeschlossen. Für langandauernde Aufklärungsmissionen sowie für die Raumfahrt, wo die Lebenserhaltungssysteme für den Menschen recht aufwendig und besonders nachteilig sind, wird der Druck für eine weitergehende Automatisierung zunehmen.

Im zivilen Bereich lassen sich durch Einführung des Gesichtssinnes bei technischen Systemen, die sich bewegen können, die meisten einfachen Einsatzbereiche für menschliche Operateure ebenfalls flexibel automatisieren; ermüdende Überwachungs- und Steuerungsaufgaben können von technischen Systemen adäquater übernommen werden. Dies trifft wohl für die meisten Aufgaben der Fahrzeugführung in Routinebereichen zu.

Damit die technischen Systeme einen ähnlichen Leistungsstand wie der Mensch erreichen können, müssen sie neben der vielseitigen Sensorik, wie sie dem Menschen eigen ist, auch Wissen über die zu beobachten-

den und zu steuernden Prozesse haben. Dies erfordert auch eine 'bewusste' Wahrnehmung des Eigenzustandes und der eigenen Fähigkeiten. Damit ist die Entwicklung solcher Systeme nicht die isolierte Aufgabe eines aufgepfropften Fachgebietes, sondern sie erfordert die Ausrichtung aller schon immer notwendigen Teilsysteme (wie Struktur und Bauweisen, Antriebssysteme, sowie Kraft- und Momentenerzeugung durch Formgebung und Umströmungsbedingungen) auf diese neue Selbstüberwachung und Selbststeuerung hin.

Um als autonomes System zuverlässig agieren zu können, ist die Verfolgung und Überwachung des eigenen Systemzustandes und der Umweltbedingungen erforderlich. Letztere ist Aufgabe des externen Wahrnehmungsapparates; erstere erfordert jedoch die Mitwirkung, besser noch die primäre Gestaltungskraft, der einschlägigen Fachdisziplinen. Normale Betriebszustände müssen von außergewöhnlichen oder gar gefährlichen eigenständig unterschieden werden können; die dazu notwendigen Senso-

ren und Algorithmen zur Signalverarbeitung und Zustandserkennung sind von den Fachdisziplinen beizusteuern. Die zentrale Situationserfassung ist gemeinsam im Missionszusammenhang zu leisten. Hier hat der Mensch aufgrund seiner Erfahrung in gewissen Einsatzbereichen z.Z. noch große Vorzüge gegenüber technischen Systemen.

Damit ein möglichst reibungsloses Zusammenspiel zwischen Mensch und Maschine stattfinden kann, sollten die technischen Systeme auf die Fähigkeiten des Menschen hin angepasst sein. Diesem Gesichtspunkt ist bei der Vermittlung des Wissens über die Technik autonomer Systeme an den Nachwuchs besonderes Augenmerk zu schenken; dies soll durch spezielle Vorlesungen sichergestellt werden.

### **Curriculare Neuorientierung bei LRT**

Sowohl die Sensortechnik als auch die digitalen Datenverarbeitungsanlagen haben heute einen Stand erreicht, der Systementwürfe von einem Komplexitätsgrad möglich werden lässt, wie er bis vor kurzem

nur in biologischen Systemen vorgefunden werden konnte. Hierbei wird in zunehmendem Maße auch Wissen verarbeitet und in den Interpretationsprozess für Daten mit eingebracht. Diese Entwicklung wird in der Zukunft durch die weitere Leistungssteigerung bei den Mikroprozessoren (z.Z. etwa den Faktor 10 alle 4 bis 5 Jahre bei eher sinkenden Preisen) und durch leistungsfähige, preiswerte abbildende Sensoren in einem weiten Spektrum verstärkt. Der derzeitige Stand lässt erkennen, dass Maschinen und Fahrzeugen in der nahen Zukunft der Gesichtssinn für situationsangepasstes Handeln in Echtzeit eröffnet werden kann. Hierzu wurden an der UniBwM/LRT Pionierleistungen erbracht; es scheint deshalb angemessen, auch die Lehre um dieses neue Technikfeld mit einem weiten Anwendungsbereich zu erweitern.

Wegen der breiten Fundierung autonomer Systeme auch in den Bereichen der Elektrotechnik und der Informationsverarbeitung werden fakultätsübergreifende Lösungen mit den am Ort vorhandenen Fakultäten für Elektrotechnik und Informatik angestrebt.

In Ergänzung zu den systemorientierten Vertiefungsrichtungen LFT und RFT scheint es sinnvoll, als Systembereich neben der Luft- und der Raumfahrttechnik einen allgemeineren Anwendungsbereich 'Technik Autonomer Systeme' ins Auge zu fassen, in dem die Fähigkeiten und Anwendungsfelder systematisch behandelt werden, die durch die Kombination von leistungsfähigen Sensoren und die Datenfusion mit komplexer Software auf parallelen Rechnern einschließlich Wissensverarbeitung entstehen.

### **Zielsetzung**

Durch integrierte Entwürfe von Gesamtsystemen, bei denen die mechanischen und die elektronischen Teilsysteme optimal aufeinander und auf den menschlichen Betreiber abgestimmt sind, lassen sich leistungsfähigere und robustere Gesamtsysteme entwickeln. Dies wird gelegentlich durch das Kunstwort 'Mechatronik' sowie die etwas hochgestochene Bezeichnung 'Intelligente Systeme' gekennzeichnet. Ziel der Studienrichtung 'Technik Autonomer Systeme' ist es, auf der

Basis der Hochtechnologie für Luft- und Raumfahrttechnik Studenten mit dem notwendigen Grundlagenwissen auszustatten, so dass sie erfolgreich an der Verbreitung dieses Wissens in andere Technikbereiche und an der selbstständigen Weiterentwicklung in neuen Anwendungsfeldern mitwirken können. Für eine High-Tech-Nation mit hohen Lohnkosten ist es wesentlich, in dieser Entwicklung auf ein neues Integrationsniveau verschiedener Technikzweige hin die Nase vorne zu behalten. Diesem Ziel soll die Einrichtung einer Vertiefungsrichtung 'Technik Autonomer Systeme' dienen, in der dem interessierten Ingenieur Nachwuchs systematisch das erforderliche Systemdenken und die notwendigen technischen Grundlagen dargeboten werden.

Mehrere luftfahrttechnische Anwendungsbereiche sind treibende Faktoren in der Entwicklung der Technik autonomer Systeme: Flugkörper, Drohnen und die Synthesaufgabe für Flugführungssysteme mit wachsenden autonomen Fähigkeiten auf Seiten der technischen Komponenten. In der Raumfahrt er-

fordern die Robotikkomponenten und die Forderung nach Telepräsenz des Menschen diese Entwicklungsschritte. Die Abstimmung auf den Menschen ist in beiden Bereichen wesentlich, da nur so die Flexibilität und Gesamtzuverlässigkeit zur optimalen Nutzung der Investitionen erreicht werden kann. Eine allgemeine Vertiefungsrichtung mit dieser Zielsetzung ist aber nicht auf die Luft- und Raumfahrttechnik beschränkt; sie kann sehr wohl Studenten mit weiter gespannten allgemein-technischen Interessen anziehen und bietet der Fakultät eine breitere Basis für zukünftige Entwicklungen.

### **Skizze der Inhalte der Vertiefungsrichtung 'Technik Autonomer Systeme'<sup>1</sup>**

Die Grundlagen I sollen identisch mit denen aus LFT und RFT sein (31 TWS). Danach schließt sich eine verbreiterte Ausbildung in folgenden Bereichen an:

- Systemtheoretische Grundlagen,

<sup>1</sup>Professur TAS ist zur Zeit der Erstellung dieses Berichtes in der Ausschreibung.

- Sensortechnik für autonome Systeme, vor allem das Spektrum abbildender Sensoren,
- Echtzeit-Parallelrechnersysteme, Hardware- und Software-Ansätze,
- Daten- und Signalverarbeitung (in vernetzten Systemen),
- Verfahren der Systemidentifikation und adaptiven Regelungen,
- Systemintegration: Wahrnehmung, Situationserfassung und Verhaltensentscheidung im Missionszusammenhang,
- Infrastruktur zur Missionsdurchführung, Kommunikation, Navigation, Führungssysteme,
- Interface Mensch / (partiell) autonomes System [Mensch/Maschine-Probleme, Anthropotechnik].

### **Erforderliche Professuren**

Neben der Umorientierung eines Teiles vorhandener Professuren sollten zwei Professuren der Fakultät diesem Bereich direkter zugeordnet werden:

1. eine Professur für "Autonome Systeme", bei der die Integrations- und Systemaspekte einschließlich der Daten- und Wissensverarbeitung im Vordergrund stehen, und
2. eine Professur für die "Sensorik autonomer Systeme", die auf die erforderliche Hardware für die meßtechnische Basis aller Wahrnehmungssysteme ausgerichtet ist.

Bei den Praktika lassen sich die bisherigen Versuche der Messtechnik und der Vertiefungsrichtung Systemdynamik so modifizieren, dass den Erfordernissen Rechnung getragen werden kann.

Als Wahlfächer sind auch entsprechende Angebote aus anderen Clustern oder anderer Vertiefungsrichtungen vorgesehen.

(Im Anhang C ist eine Gestaltungsskizze zu finden, die im wesentlichen als Basis für die Realisierung übernommen wurde.)

# Lehrveranstaltungen der Professur für Steuer- und Regelungstechnik

---

## a) für das Hauptstudium:

Steuer- und Regelungstechnik I  
(Pflicht für alle Vertiefungsrichtungen von LRT einschließlich IPT)

Steuer- und Regelungstechnik II  
(Pflicht für die Vertiefungsrichtungen von LRT ausgenommen IPT)

Abtastsysteme

## b) für die Vertiefungsrichtung Systemdynamik:

Flugregelung

Apparatives Praktikum I :  
Gerätepraktikum Steuer- und Regelungstechnik

Rechneranwendungen Systemdynamik

## Kurzbeschreibungen zum Inhalt der Lehrveranstaltungen des Autors:

### Steuer- und Regelungstechnik I:

Geschichtlicher Überblick über die Entwicklung der Regelungstechnik; Bildung physikalischer und mathematischer Modellvorstellungen zur Erfassung relevanter Verhaltensweisen des zu untersuchenden Systems. Hydraulisches Stellglied, Magnetschweberegelung, Antennennachlaufsystem, Flugzeuglage-regelung, elektrische Netzwerke, Linearisierung um stationäre Arbeitspunkte. Die Laplace-Transformation zur Überführung zeitinvarianter linearer Differentialgleichungen in algebraische Gleichungen mit komplexen Variablen; der Begriff der Übertragungsfunktion. Graphische Darstellungsmöglichkeiten der Übertragungsfunktion. Darstellung im Zeitbereich durch Steuerungs- und Beobachtungsnormalform. Eigenschaften der Elementarsysteme 1. und 2. Ordnung; Verhalten von Systemen höherer Ordnung, Blockschaltdalgebra.

Einheitsregelkreis, Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises.

### Steuer- und Regelungstechnik II:

Synthese von Einfachregelsystemen im s-Bereich, Beispiel Motor-Antenne-System. Vereinheitlichte Analyse mit verallgemeinerten Bode-Diagrammen und Wurzelortsmethoden. Leistungskenngrößen für Regelungssysteme: Statische Genauigkeit, Einschwingverhalten, Bandbreite, Störungsunterdrückung, Parameterempfindlichkeit, integrale Kenngrößen. Kompensationen bei klassischer Reglerauslegung: Vorhaltglieder zur Erhöhung der Dämpfung und der Reaktionsgeschwindigkeit, Integrations- (Verzögerungs-)glieder zur Verbesserung der statischen Genauigkeit; P-, PD-, PI-, und PID-Regler. Zustandsregler, moderne Beobachterregler: Beispiel Stab-Wagen-System. Das Syntheseproblem, Auslegungsvarianten. Nichtlinearitäten: Zweipunkt- und Dreipunktregler ohne und mit Hysterese, Methode der Phasenebene für zwei Variable; Beispiel Satelliten-Lageregelung.

## Abtastsysteme

Periodische Signalabtastung, Halteglieder; Beschreibung im Frequenzbereich durch die z-Übertragungsfunktion. Vergleiche mit dem s-Bereich, Einführung der  $\beta$ (Eszet)-Transformation; Diskussion des Grundstreifens im Bereich  $sT$ , Abbildung in den z- und  $\beta$ -Bereich, Stabilitätsbereiche, Transformation von Signalen, Differenzen- und Integraloperatoren, Diskussion der besonderen Rolle des Trapezintegrators im  $\beta$ -Bereich ( $1/\beta$ ) zum Anschluss an die Beobachtermethoden im s-Bereich. Regelkreisschließungen, Zustandsraum-Methoden.

## Flugregelung

Geschichtlicher Überblick; Ableitung der Bewegungsgleichungen und der Übertragungsfunktionen für Steuer- und Böeneingänge; Sensoren und Steuerorgane. Die wichtigsten Einfachregelkreise der Längsbewegung: Nickdämpfung und Längsneigung, Fahrt bzw. Machzahl, Anstellwinkel, Höhe. Verkoppelte Regelkreise, Umwandlung in sequentielle Kreisschließungen.

Beispiel: Höhenregler mit innerem Längsneigungs- oder Schubregelkreis.

Die Einfachregelkreise der Seitenbewegung: Gierdämpfer, Rolldämpfer, Kursregelung, Umwandlung verkoppelter Regelkreisschließungen mit zwei Steuergrößen (Quer- und Seitenruder) in sequentielle Kreisschließungen. Mehrgrößenregelung, Riccati-Entwurf.

Diskussion der Synthesaufgaben der Flugregelung, Syntheseverfahren. Beispiele ausgeführter Regler: Boeing 737-Regler; Tornado; Entwicklungstendenzen in der Flugregelung.

## Apparatives Praktikum I:

### Gerätepraktikum Steuer- und Regelungstechnik

Mechanische und elektronische Modellregelkreise: ebene Satellitenlageregelung mit linearem Regler bei Begrenzung der Stellgröße sowie mit Zwei- und Dreipunktregler; Stabilisierung und Steuerung einer instabilen Strecke (Stabwagen-System mit Prozeßbrechner);

Flugzeugregelung in der Längsbewegung (Nickdämpfer, Nicklage); Frequenzgangmessung an linearen Modellstrecken; Drehzahlregelung bei einem Motor-Generator-System.

## Rechneranwendungen

### Systemdynamik

(zusammen mit Prof. FF/FM):

Bearbeitung komplexer Aufgaben aus den Gebieten Steuer- und Regelungstechnik sowie Flugmechanik und Flugführung. Einführung in Problemstellung und Rechentech-nik, Erarbeiten von Rechenmethoden und Programmen sowie Dokumentation und Bericht über Ergebnisse und Erfahrungen. Diskussion der Vor- und Nachteile der einzelnen Rechenarten (z.B. Zeitaufwand für Vorbereitung und Rechnen, Rechnen in Echtzeit, Genauigkeit, Nachbildung mehrdimensionaler, nichtlinearer Funktionen).

# Universitäre Selbstverwaltung

---

- ❑ **Prodekan LRT** (univ.): In den Jahren 1977 / 78
- ❑ Vorsitzender des **Studiengangsausschusses** (univ.) **LRT** 1977 /78
- ❑ Mitglied der Fakultät LRT des Senatsunterausschusses für **Studienplanung** (univ.), 1977/78
- ❑ **Dekan LRT**: In den Jahren 1979 / 80

## Gremienarbeiten:

- **Fachbereichsrat LRT**: 1977 / 78 als Prodekan  
79 / 80 als Dekan (Vorsitzender)  
81 / 82 gewählter Vertreter der Professoren  
83 / 84 gewählter Vertreter der Professoren  
85 / 86 gewählter Vertreter der Professoren  
93 / 94 gewählter Vertreter der Professoren
- **Senat**: In den Jahren 1979 / 80 als Dekan LRT;  
1981 / 82 als gewählter Vertreter der Professoren LRT  
1999 / Februar 2000 als Vizepräsident (univ.).
- **Senatsausschuss für Forschung und Nachwuchs**:  
1989 / 90 Vertreter der Fakultät LRT  
1991 / 92 Vertreter der Fakultät LRT  
1999 bis Febr. 2000: Vorsitzender als Vizepräsident (univ.)
- **Senatsausschuss für Planung und Haushalt**:  
1993 / 94 Vertreter der Fakultät LRT  
1995 / 96 Vertreter der Fakultät LRT

Weiterführung als Haushaltsausschuss (ohne Planungsanteile, für die es einen neuen Senatsausschuss unter Leitung des Präsidenten gab)

1997 bis erste Hälfte 98 Vertreter der Fakultät LRT.

- **Senatsausschuss für Lehre und Studium**:  
1999 bis Febr. 2000: **Vorsitzender** als Vizepräsident (univ.)

---

□ **Vizepräsident** (univ.): Januar 1999 bis Ende Februar 2000

Neben den üblichen Routine- und Vertretungsaufgaben als Vizepräsident standen folgende Themen im Vordergrund:

- + Mitwirkung bei der Erarbeitung der neuen Hochschulverfassung (nach der Novellierung der Hochschulgesetze durch Bund und Länder, die u.a. eine leistungsbezogene Verteilung der Mittel an der Hochschule vorsehen).
- + Evaluation der Forschungsleistungen an der UniBwM:  
Zu diesem Thema wurden die Forschungsberichte 1993 – 98 und 98/99 ausgewertet; die vorläufigen Ergebnisse wurden in einem internen Bericht zusammengestellt und an die Hochschulleitung sowie die Dekane verteilt.
- + Zur zukünftigen elektronischen Erfassung der Forschungsberichte wurde in Abstimmung mit den Fakultäten ein einheitliches Schema entwickelt und auf dem Rechnernetz der UniBwM am Forschungsbericht 98/99 getestet.

Zu einigen der in der Bundesrepublik diskutierten Kriterien in Forschung und Lehre für die leistungsorientierte Mittelverteilung an Universitäten wurde das relevante Datenmaterial für den universitären Zweig für relevante Zeiträume zusammengestellt: Zahl der Studenten, Zahl der Studenten in der Regelstudienzeit, Zahl der Studienabschlüsse in der Regelstudienzeit (jeweils für die letzten n Jahre), Zahl der Veröffentlichungen, Zahl der Promotionen und Habilitationen, Umfang der eingeworbenen Drittmittel, Mitwirkung im Forschungsbetrieb (Organisation von Tagungen, Herausgabe von Publikationen etc.).

# Anhänge

## A. Zur Geschichte des Instituts für Systemdynamik und Flugmechanik

### Übersicht:

Es wird ein zeitlicher Abriss der 25-jährigen Entwicklung der Organisationseinheit gegeben.

Aus der ‘wissenschaftlichen Einrichtung 13a’ des Fachbereichs LRT ohne jeden Mitarbeiter zu Beginn im Jahre 1975 wurde das Institut für Systemdynamik und Flugmechanik der Fakultät LRT mit zeitweise über 30 Personen, davon zwei Professoren. Mit Einführung der neuen Vertiefungsrichtung “Technik Autonomer Systeme“ in der nahen Zukunft werden es drei Professoren sein.

### Die ersten Anfänge

Im Gründungskonzept des Fachbereiches LRT bestand dieser auf dem Papier aus 13 wissenschaftlichen Einrichtungen des universitären Teils und dem separat organisierten Fachhochschulteil Maschinenbau, der schon seit vielen Jahren in Neubiberg ansässig war; der universitäre Teil wurde 1973 aus der Taufe

gehoben und mit den ersten Studenten besetzt.

Der Studienbeginn erfolgte in etwa parallel mit der Planungsphase für die erforderlichen Neubauten in Neubiberg; die Leitung der Universität befand sich zu jener Zeit in der Schwere-Reiter-Kaserne in der Stadt München, wo auch ganze andere Fachbereiche untergebracht waren. Die Studentenwohnungen waren auf mehrere Stellen in München verteilt.

Wegen der zeitlich sehr gedrängten Aufnahme des Studienbetriebs erfolgte die Berufung der Professoren zum letztmöglichen Zeitpunkt. Flugmechanik und Steuer- und Regelungstechnik waren erst zu Beginn des dritten Studienjahres im Lehrplan vorgesehen; aus diesem Grund erfolgte die Einstellung des zuständigen Professors genau zu diesem Zeitpunkt, dem 1.10.1975. Mit einer Reihe anderer Kollegen trat Dr.-Ing. Ernst D. Dickmanns zu

diesem Zeitpunkt seinen Dienst als Professor für Steuer- und Regelungstechnik an der damaligen Hochschule der Bundeswehr an. Das Fach Flugmechanik, das im nächsten Trimester gelesen werden musste, wurde im Lehrauftrag an Herrn Dr. W. Fohrer vom Institut für Flugmechanik und Flugregelung der TU München vergeben.

Das ganze Institut bestand im ersten Quartal seines faktischen Bestehens aus einigen wenigen Räumen im damaligen Gebäude 25 (heute 161) in dessen Nordwestecke im zweiten Stock, und aus einem Anteil an Schreibkapazität in einem zentralen Schreibbüro des Fachbereichs.

Zum 1.1.1976 wurde als erster wissenschaftlicher Mitarbeiter K.-D. Otto eingestellt, ein halbes Jahr später Dr. W. Fohrer. Beide haben dem Institut bis heute die Treue gehalten; 1977 begann mit Herrn J. Hollmayer der Aufbau des Labor- und Werkstattbereichs, der ebenfalls im

---

Gebäude 25 (Parterre) untergebracht war. Gegenüber, wo heute die Werkhalle steht, war zu jener Zeit eine tiefe Baugrube; hier wurde mit dem Neubau des jetzigen Laborbereichs begonnen, der erst Ende 1977 bezugsfertig werden sollte.

Das erste Jahr war angefüllt mit Planungs- und Aufbauarbeiten, nicht nur für die Lehre und Labore des engeren eigenen Bereiches, sondern für die gesamte Organisation des Fachbereiches und des Curriculums. Eine eigene Professur für Flugmechanik und Flugführung für den Fachbereich zu erreichen, hat großen Einsatzes bedurft, war aber letztendlich erfolgreich; damit war die Grundstruktur für das derzeitige Institut gelegt. Es wurde damals vorgezogen, den zweiten Teil der wissenschaftlichen Einrichtung 13, die Meßtechnik WE 13b (Prof. V. Graefe) haushaltstechnisch als getrennte Einrichtung zu führen; sie wurde in den 80-er Jahren dann zum Institut für Meßtechnik (WE 6).

Der Aufbau des Laborbereichs begann (neben kleineren Praktikums-

versuchen) mit der Übernahme des Festsitz-Flugsimulators auf der Basis eines Fouga-Magister Cockpits von der DFVLR Oberpfaffenhofen, der zwischenzeitlich am Institut für Flugmechanik der TUM eingesetzt worden war. Der zugehörige Hybridrechner war freundlicherweise von Prof. H. Zehle in Abstimmung mit dem berufenen, aber noch nicht anwesenden Inhaber der Professur für Steuer- und Regelungstechnik als fachbereichszentraler Prozessrechner des 'Rechner-Zentrallabors RZL' beschafft worden. Mit diesem Rechner wurden anfangs die meisten Praktikumsversuche für das Fach Regelungstechnik sowie Studien- und Diplomarbeiten aus den Gebieten Flugmechanik, Flugführung und Steuer- und Regelungstechnik durchgeführt. Der Aufbau und die Inbetriebnahme dieser Simulationsanlage haben den Werkstattbereich neben der Planung für die Ausstattung des Neubaus weitgehend ausgelastet.

### **Der Beginn des normalen Institutsbetriebs**

Mit dem Umzug in den Neubau Ge-

bäude 35 im Herbst 1977 begann sich das bis dahin sehr provisorische Arbeiten zu normalisieren. Die Inbetriebnahme der Labore und der Aufbau der Ausstattung nahmen noch viel Kraft und Zeit in Anspruch. Das Studium erforderte mit der Aufnahme der Vertiefungsrichtung Systemdynamik und den Praktikumsversuchen dazu im neuen Laborbereich nochmals einen kräftigen Aufwand, bevor man sich dann den längerfristigen Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig zuwenden konnte.

### **Entwicklung der Anlagenseite**

Mit der DEC PDP 11/61 erhielt das Institut anfangs einen für die damalige Zeit leistungsfähigen Prozeßrechner, der in Verbindung mit dem neuen 3-D-Graphiksystem 'Picture System 2' von Evans & Sutherland gute Echtzeit-Simulationen einschließlich perspektivischer Strichgraphiken gestattete. Das Rechnerzentrallabor wurde, insbesondere nach Übernahme der Leitung durch Herrn Humbert, eine der Hauptstützen für die Simulationsarbeiten des Instituts. Daneben stand Kapazität

---

aus den Fachbereichs-Zentrallaboren für Anlagen, für Messtechnik und für Werkzeugmaschinen zur Verfügung.

Mit deren Hilfe wurde über mehrere Jahre mit gleichzeitiger Unterstützung durch mehrere Studien- und Diplomarbeiten die Satellitenmodell-Regelstrecke auf der Basis eines Luftkissen-Fahrzeugs (Bild 17) aufgebaut, die bei der Entwicklung des maschinellen Sehens eine wesentliche Rolle gespielt hat.

Neben dem Festsitz-Flugsimulator zur Einbeziehung des Menschen in die Untersuchungen zur Steuerung von dynamischen Systemen war der Dreiachsen-Bewegungs-Simulator (DBS) das zweite Großgerät des Instituts; er dient bis heute als ein zentrales Element zur Entwicklung automatischer Steuerungs- und Regelungssysteme mit Echtbauteilen im Kreis. Sowohl echte Sensoren (Kreisel, Beschleunigungsgeber, Fernsehkameras) als auch Realbauteile der Elektronik zur Daten- und Wissensverarbeitung können mit dieser Simulationsanlage in einem realitätsnahen Wirkungskreis unter-

sucht werden; diese Anlage hat wesentlich zu den erreichten Ergebnissen in der Entwicklung des dynamischen maschinellen Sehens beigetragen. Anfangs wurde sie überwiegend bei den Vorhaben zur autonomen visuellen Führung von Straßenfahrzeugen, später mehr und mehr zur Entwicklung der Methoden zur Erfassung und Steuerung von Bewegungen im 3-D-Raum bei Flugzeugen, ab 1994 auch bei Hubschraubern eingesetzt. Bild 42 auf Seite 74 zeigt die Anlage.

Im Jahr 1985 erfolgte der nächste wesentliche Schritt im Aufbau einer leistungsfähigen Forschungsbasis: Das erste **V**ersuchsfahrzeug für **a**utonome **M**obilität und **R**echnersehen (VaMoRs) konnte beschafft und im Fremdauftrag umgerüstet werden; ab 1986 wurde mit Fahrversuchen begonnen. 1987 gelangen die Aufsehen erregenden autonomen Versuchsfahrten auf der Autobahn bei Dingolfing, die die Einwerbung von Drittmitteln sehr gefördert haben.

Das Versuchsfahrzeug VaMoRs ist nach mehrmaligen Umrüstungen

mit einem neuen Stromgenerator, einer neuen Kühlung, neuen Aufhängungen für Kameraplattformen (vorne und hinten) und neuen Parallelrechnersystemen heute noch in Betrieb; es wird überwiegend eingesetzt, um das Fahren auf Straßen niedriger Ordnung und auf Wegenetzen sowie das Fahren auf unebenem Untergrund weiterzuentwickeln.

Um das autonome Fahren mit hohen Geschwindigkeiten auf Schnellstraßen fortzuentwickeln, steht seit 1994 das PKW-basierte Versuchsfahrzeug VaMoRs-P, kurz VaMP, zur Verfügung, das im Rahmen der Abschlußphase des EUREKA-Projektes 'Prometheus' gemeinsam mit einem Zwillingssfahrzeug VITA\_II des Industriepartners Daimler-Benz mit einem neuen, leistungsfähigen Sehsystem auf Transputerbasis ausgerüstet wurde.

Um besonders aufwendige Versuchskampagnen effizient durchzuführen, stand der Einsatz von Fremdversuchsanlagen im Vordergrund. So wurde für die erste experimentelle Erprobung des maschinellen Sehens im Landeanflug das Turboprop-Versuchsflugzeug Do

128 der Universität Braunschweig, Institut für Flugführung, mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft 1991 und 1993 eingesetzt.

Zur Demonstration der Leistungen des „Crew Assistant for Military Aircraft“ (CAMA) in Zusammenarbeit mit Industriefirmen und des DLR wurde der Flugversuchsträger ATTAS der DLR-Braunschweig (ein Versuchsflugzeug auf der Basis des Flugzeugs VFW 614) eingesetzt. Hierbei ist das Ziel, die Fähigkeiten des maschinellen Sehens mit denen der wissenschaftlichen Pilotenunterstützung zu integrieren. Bei allen diesen Aktivitäten spielt die Sichtsimulation eine entscheidende Rolle; deshalb steht für diese Aufgaben eine Palette von 3-D-Graphikrechnern zur Verfügung.

### **Entwicklung der Personalseite**

In der zweiten Hälfte der 70-er Jahre wuchs das Personal planmäßig auf; die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter stieg auf drei. Auf die nachträglich geschaffene Professur für Flugmechanik und Flugführung wurde zum 1.10.1977 Dr.-Ing. G. Sachs berufen. Im La-

borbereich erfolgte bald eine Aufstockung um einen Feinmechaniker und einen Software-Ingenieur.

Bis 1982 erfolgten alle Arbeiten mit dem Stammpersonal des Institutes, das damals neun Mitarbeiter umfaßte. Ab dann nahm die Zahl der Drittmittel-Mitarbeiter ständig zu.

Prof. Sachs folgte 1984 einem Ruf an die TU München auf den Lehrstuhl für Flugmechanik und Flugregelung. Im Herbst 1985 wurde Dr.-Ing. Reiner Onken als sein Nachfolger an die UniBwM berufen.

Seit 1978 wird die Lehrleistung des Instituts im Fachgebiet Flugversuchstechnik durch Herrn Dr.-Ing. Rosenberg von der Wehrtechnischen Dienststelle 61 Manching unterstützt; er wurde 1993 zum Honorarprofessor der UniBwM ernannt.

### **Drittmittelaktivitäten**

Nach Abschluss des Grundaufbaus des Instituts wurden Drittmittel zunächst vom BMFT und von der DFG eingeworben; ab 1986 kamen Drittmittel des Hochschulträgers und über Verbundprojekte auch zunehmend solche aus der Industrie

hinzu. Im Bereich sehender Straßenfahrzeuge ist die Daimler-Benz AG seit 1986 über ein Jahrzehnt der wichtigste industrielle Partner gewesen. Für DASA-Dornier wurde 1991/92 ein Geländewagen GD-300 mit einer eigenentwickelten Zweiaxlenplattform zur Blickrichtungssteuerung für das maschinelle Sehen ausgerüstet. 1997/98 erfolgte eine ähnliche Entwicklung für das Kettenfahrzeug „Wiesel 2“ im Rahmen des Projektes Primus-C.

Im Bereich der Luftfahrtsysteme erfolgte eine Kooperation mit Eurocopter Deutschland (ECD) als Industriepartner und dem DLR-Institut für Flugmechanik, Braunschweig. Im Rahmen des EUREKA-Projektes 'Prometheus' wurden ab 1989 zeitweise bis zu zehn Mitarbeiter des Instituts von diesem europäischen Verbundprojekt getragen. Ende 1994 betrug die Zahl der am Institut tätigen Drittmittel-Mitarbeiter 25 (über 80%).

Eine Zusammenstellung der Drittmittelaufträge findet sich am Ende des Abschnitts Forschung auf den Seiten 117/118.

## B. Verzeichnis aller Mitarbeiter des Autors

E.D. Dickmanns	seit	01.10.75		V. v.Holt		01.09.90	–	31.03.99
K.-D. Otto	seit	01.01.76		I. Schramm*		01.10.90	–	31.08.91
W. Fohrer*	seit	01.08.76		B. Jurditsch		01.09.90	–	30.06.95
J. Hollmayer*	seit	15.05.77		S. Werner		01.07.91	–	31.03.97
H.G. Meissner		01.08.77	–	31.07.82		E. Schoel*		01.09.92
B. Wittmann		01.12.77	–	23.10.85		M. Bold*	seit	01.03.93
M. Gabler*	seit	01.10.78		S. Baten		15.06.93	–	31.03.99
G. Haas*		01.11.78	–	31.03.80		H. Zajonz		01.07.93
E. Oestereicher*	seit	01.10.80		M. Maurer		01.07.93	–	30.11.99
A. Zapp		01.04.82	–	30.09.88		S. Fürst		01.09.93
G. Eberl		12.07.82	–	11.07.87		M. Weißenberger		01.12.93
J. Wünsche		15.08.82	–	14.08.87		A. Buchwieser		01.01.94
B. Mysliwetz		01.07.85	–	31.07.90		S. Hötzl		01.01.94
R. Stömmer*		09.09.85	–	31.05.01		T. Hildebrandt		01.01.94
T. Christians		01.07.86	–	30.08.90		R. Gregor		01.07.94
M. Bork		01.10.86	–	30.11.89		A. Faber		01.08.94
R. Schell		01.04.87	–	31.03.92		D. Zorn*		10.10.94
H. Berthold*		01.07.87	–	31.08.92		M. Lützeler		01.01.95
J. Schick		01.07.88	–	30.06.92		A. Rieder		01.02.95
C. Brüdigam		01.70.88	–	30.06.93		A. Schubert		01.07.95
M. Schmid		01.09.88	–	30.11.93		T. Baumgarth		01.06.96
Ch. Hock		01.04.89	–	30.04.94		K.H. Siedersberger	seit	01.01.97
Ch. Fagerer		01.04.89	–	30.04.94		H. Lex*	seit	01.10.97
W. Kinzel		01.07.89	–	30.09.94		M. Pellkofer	seit	01.11.97
J. Schiehlen		01.01.90	–	31.03.95		U. Hofmann	seit	01.08.98
N. Müller		01.07.90	–	31.03.96		K. Spelsberg-Stöckl		01.05.00
F. Thomanek		01.08.90	–	31.12.95				–
R. Behringer		01.09.90	–	31.03.96				–

\*zeit- oder teilweise

# Anhang C

---

**Ernst D. Dickmanns**, Prof. Dr.-Ing.  
UniBwM, LRT, Institut für Systemdynamik u. Flugmechanik  
W. Heisenberg Weg 39, D-85577 Neubiberg

Datum: 25.7.1996

**Gestaltungsskizze 5**  
zur neuen Vertiefungsrichtung

## Technik Autonomer Systeme

### Grundstruktur LRT nach Vordiplom:

<input type="checkbox"/> Grundlagen (für alle)	31 TWS
<input type="checkbox"/> Grundlagen II (Wahl von 1 großen und 1 kleinen aus 4 Clustern LRT; große Cluster inkl. 3 TWS Praktikum und zugehöriger Mathematik; kleines Cluster mit 1 TWS Praktikum); je Cluster 9 bis 10 TWS Lehrveranstaltung; zusätzlich eine Grundlagenvorlesung zum Systembegriff aus der Thermofluiddynamik* (3 TWS) > hier soll ein Cluster zusätzlich aus ET gewählt werden können.	21 bis 22 TWS + 3 P
<input type="checkbox"/> Vertiefungsrichtung: Vorlesung/Übung	20 TWS
Praktika	3 TWS
Wahlfächer	(6*) bzw. 9 TWS

---

Summe Hauptstudium 88 bis 89 TWS

### Cluster Grundlagen II aus Elektrotechnik:

<input type="checkbox"/> Einführung in Mikrocomputertechnik	4 TWS
<input type="checkbox"/> Daten- und Signalverarbeitung (DSV)	4 TWS
<input type="checkbox"/> Modulations- und Hochfrequenzübertragungstechnik	3 TWS

---

Summe V + SÜ 11 TWS

# Vertiefungsblock der Studienrichtung

---

## Technik Autonomer Systeme

- |  |              |
|--|--------------|
| <b>1. Sensortechnik für autonome Systeme</b>   | <b>3 TWS</b> |
| Erfassung des Eigenzustandes relativ zur Umwelt mit ihren aufgabenrelevanten Objekten: konventionelle Sensoren; bildgebende (fernmessende) Sensoren im gesamten elektro-magnetischen Spektrum, passiv und aktiv. |              |
| <b>2. Systemidentifikation / Adaptive Regelungen</b>   | <b>3 TWS</b> |
| Autonome Ermittlung der Systemparameter mit digitalen Identifizierungsverfahren; selbstanpassende Regelungen zur Erzielung gewünschter Systemeigenschaften.  |              |
| <b>3. Informationsverarbeitung in verteilten Systemen</b>  | <b>3 TWS</b> |
| Wissensrepräsentation; Methoden der Wissens- und Datenverarbeitung in verteilten Systemen; Kommunikation.  |              |
| <b>4. Systemvorlesung 'Autonome Systeme'</b>   | <b>4 TWS</b> |
| Grundlagen kognitiver technischer Prozesse und 'intelligenter' Systeme: räumlich / zeitliche Modellierungen; Merkräume, Wirkräume; Systemansatz. Autonome Fähigkeiten im Aufgabenzusammenhang.                   |              |
| <b>5. LRT-Infrastruktur zur Missionsdurchführung</b>   | <b>3 TWS</b> |
| Mittel zur Fernerkundung, Systemeigenschaften; Navigations- und Kommunikationssysteme.   |              |
| <b>6. Interface Mensch / Autonome Systeme</b>  | <b>4 TWS</b> |
| 6.1 Flugführung / Wissensbasierte Assistenzsysteme   | <b>oder</b>  |
| 6.2 Mensch / Maschine Interface (aus psychologischer Sicht)  |              |

---

**Summe** **20 TWS**

### Praktika

- |   |              |
|---|--------------|
| <input type="checkbox"/> Autonome Systeme | <b>3 TWS</b> |
| oder                                      |              |
| <input type="checkbox"/> Flugführung      | <b>3 TWS</b> |

# Wahlfächerkatalog

---

## Technik Autonomer Systeme

### Elektrotechnische Fächer

<input type="checkbox"/> Kommunikationsnetze	3 TWS
<input type="checkbox"/> Optoelektronik	2 TWS
<input type="checkbox"/> Rechnerarchitekturen zur Bildfolgenverarbeitung	3 TWS
<input type="checkbox"/> Signalverarbeitung, Mustererkennung	3 TWS

### LRT-Wahlfächer

<input type="checkbox"/> Rekursive Schätzverfahren / Filtertechniken	3 TWS
<input type="checkbox"/> Navigationsverfahren inklusive GPS*	3 TWS
<input type="checkbox"/> Flexible aktive (geregelte) Strukturen	3 TWS
<input type="checkbox"/> (Teil-) Autonome Überwachungssysteme	3 TWS
<input type="checkbox"/> Stellglieder für autonome Systeme	3 TWS
<input type="checkbox"/> Mikro-Systemtechnik	3 TWS
<input type="checkbox"/> Mehrkörperdynamik	3 TWS
<input type="checkbox"/> Werkstoffe (speziell für mech./elektron. Systeme)	3 TWS
<input type="checkbox"/> Simulationstechnik	3 TWS

### Weitere Wahlfächer

<input type="checkbox"/> Fernerkundung	3 TWS
<input type="checkbox"/> Methoden der Wissensrepräsentation	3 TWS

\*kann ggf. auch von BauV übernommen werden



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

Werner-Heisenberg-Weg 39 • 85579 Neubiberg  
Telefon (089) 6004-3583