Ernst D. Dickmanns, München

Fahrzeuge lernen Sehen

Der 4-D-Ansatz brachte 1987 den Durchbruch

Nach etwa 40 Jahre langer weltweiter Forschung ist es gelungen, auf der Basis der Videotechnik und digitaler Mikroprozessoren ein maschinelles Sehen zu realisieren. Damit ist eine wichtige Voraussetzung für das autonome Fahren geschaffen. Der Beitrag zeichnet die wesentlichen Etappen in der Entwicklung des Rechnersehens nach und widmet sich zum Abschluss der Frage, inwieweit der validierte 4-D-Ansatz zum maschinellen Sehen – er bezieht die Zeit als vierte Dimension von Anbeginn ein – dazu beitragen kann, die Evolution des menschlichen Geistes zu verstehen.

Wenn man sich die Verbreitung des Gesichtssinns bei Lebewesen ansieht und die zahlreichen Fahrzeugunfälle bedenkt, die auf visuelle Fehleinschätzungen oder einfach Unachtsamkeit der Fahrzeuglenker zurückgehen, muss es verwundern, dass man sich nicht schon viel früher damit beschäftigt hat, Fahrzeuge aller Art mit einem optischen Sinn auszustatten.

Unzweifelhaft ist das Ziel höchst anspruchsvoll: Bei Wirbeltieren ist ein großer Teil der Aktivitäten des Gehirns dem Sehen gewidmet [1]. Das menschliche Auge hat etwa 120 Millionen lichtempfindliche Zellen, deren in neuronale Erregungsmuster übersetzte Daten direkt anschließend um zwei Größenordnungen komprimiert werden, bevor sie zur weiteren Verarbeitung zum visuellen Cortex im Hinterhaupt gesendet werden.

Lange Zeit war gar nicht daran zu denken, einen technischen Sinn zur visuellen Wahrnehmung zu entwickeln. Dies wird aus Abbildung 1 ersichtlich, in der die Zahl der grundlegenden Elemente zur Datenverarbeitung – die Neuronenzahl im menschlichen Gehirn und die Zahl der in einem Mikroprozessor befindlichen Transistoren – verglichen wird.

Deren Zahl konnte in gängigen Mikroprozessoren (µP) seit Anfang der 1970er Jahre enorm gesteigert werden, wie die logarithmische Darstellung eindrucksvoll belegt. Wenn die technische Entwicklung in gleichem Maße voranschreitet, so ist zu erwarten, dass die Mikroprozessoren bereits Anfang der 2020er Jahre ähnlich viele Transistoren enthalten wie es Neuronen im menschlichen Gehirn ($\sim 10^{11}$ = 100 Milliarden) gibt (violette Linien).

Natürlich sind Neuronen und Transistoren grundverschieden, was Verarbeitungsgeschwindigkeit und die Zahl der Querverbindungen angeht. Es handelt sich also nur um eine grobe Abschätzung, die es fraglich erscheinen lässt, ob man wirklich im Schnittpunktjahr (etwa 2023) ein menschenähnliches Intel-

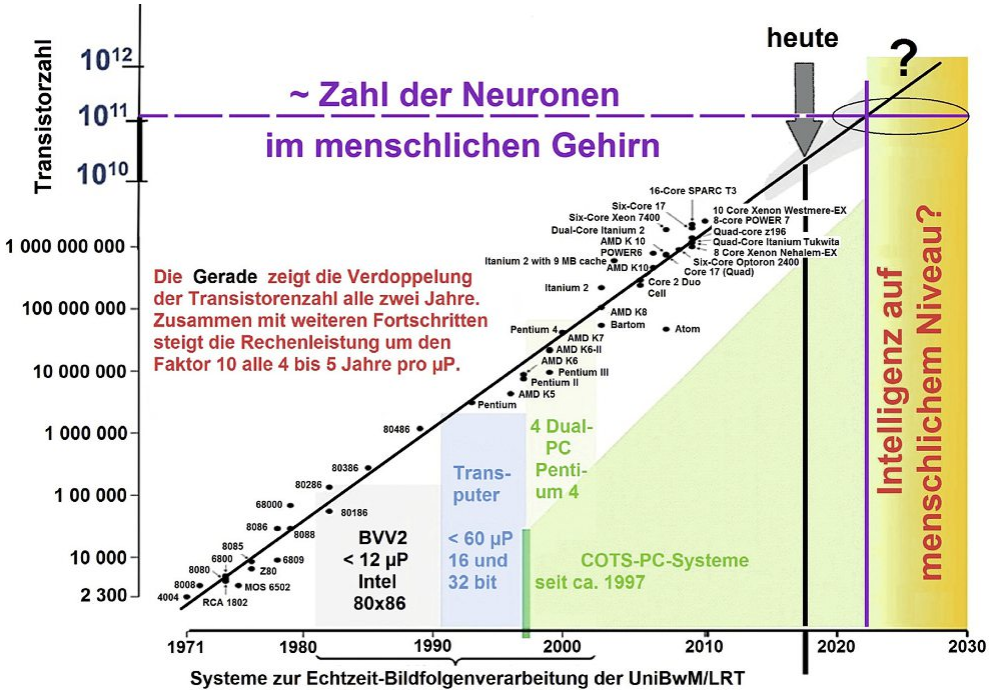


Abb. 1. Entwicklung der seit 1971 auf dem Markt befindlichen digitalen Mikroprozessoren und darauf aufbauender spezieller Systeme an der Universität der Bundeswehr München zur Verarbeitung von Video-Bildfolgen.

Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!

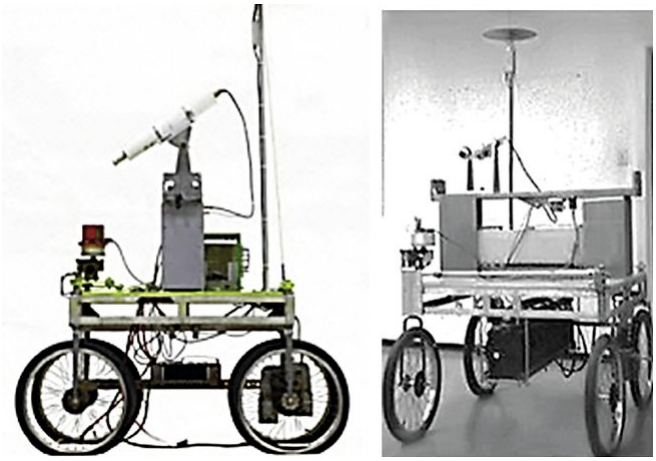


Abb. 2. Stanford Cart, ein erstes mit Sensoren zur visuellen Orientierung ausgestattetes Fahrzeug, das von 1964 bis 1971 am Artificial Intelligence Laboratory (Stanford University) als Versuchsplattform im Einsatz war. Das Gefährt war nur mit Sensoren bestückt, die Datenverarbeitung und Steuerung erfolgte extern von Rechnern im Labor.

ligenzniveau bei Rechnern in Fahrzeugen mit Gesichtssinn erwarten kann. Aber immerhin läge mit dem Gesichtssinn eine wichtige Voraussetzung für Intelligenz vor, denn ohne zeitliche Prozesse in der Umwelt wahrzunehmen und sich selbstbestimmt fortzubewegen, ist Intelligenz kaum denkbar.

Visuelle Wahrnehmung ist nicht nur die Fähigkeit, schnelle Bildfolgen mitlaufend nach Merkmalen auszuwerten, sondern es müssen Objekte und deren Bewegungen in der realen dreidimensionalen (3-D) Welt erkannt und ihre nächste Erscheinung zweckmäßig vorhergesagt werden. Wir sehen also nicht quasistationäre Einzelbilder (2-D), sondern *Bewegungsprozesse* von Objekten, d. h. wir nehmen eine vier-dimensionale (4-D) Welt direkt wahr. Die Übertragung dieses Ansatzes mit regelungstechnischen Methoden auf die Auswertung von Bildfolgen brachte 1987 einen Durchbruch in der Leistungsfähigkeit des maschinellen Sehens.

Im Folgenden wird vereinfachend von „sehenden" Fahrzeugen und ihrem „Gesichtssinn" gesprochen, um die (angestrebte) Analogie zu dem biologischen, speziell dem menschlichen Gesichtssinn zu unterstreichen.

Zur Entwicklung des Gesichtssinns für Fahrzeuge

Erste Ansätze für sehende Fahrzeuge gehen auf eine Zeit zurück, als die Rechner zur Datenverarbeitung noch stationär in Laboren stehen mussten und die Fahrzeuge nur die erforderlichen Sensoren trugen. Das „Stanford Cart" am Artificial Intelligence Laboratory der University of Stanford in Kalifornien (Abb. 2) gilt als Pionierfahrzeug für den Gesichtssinn [2]; aber auch an anderen Forschungsstätten wurde im Labor mit kleinen Fahrzeugen an dem Thema gearbeitet [3]. An der Carnegie Mellon University (CMU) Pittsburgh (Pennsylvania) entstand ab 1984 mit dem „Terregator" ein autonomes Testfahrzeug für den Außenbereich, das ebenfalls noch auf Funkkontakt zu Rechnern im Labor angewiesen war.

An dieser Stelle sollen nur die wesentlichen Entwicklungen hin zu sehenden Fahrzeugen erwähnt werden (Interessierte finden einen ausführlichen Überblick über sehende Bodenfahrzeuge mit allen Rechnern zur Datenverarbeitung an Bord in [4]).

Der erste PKW, der mit Geräten zur visuellen Orientierung ausgestattet war, wurde Ende der 1970er Jahre am Mechanical Engineering Laboratory in Japan (heute in Tsukuba) realisiert [5]. Er konnte die seitliche Leitplanke mit zwei vertikal über und unter dem rechten Frontscheinwerfer angebrachten Stereokameras erfassen und verfolgen. Die Verarbeitung der Videosignale während der – langsamen – Fahrt erfolgte zunächst mit analoger Hardware; die resultierenden Daten verwendete ein Digitalrechner zur Ansteuerung der Lenkung auf der Basis tabellarisch gespeicherter Informationen. Mit diesem Fahrzeug wurden kurze Strecken mit relativ geringer Geschwindigkeit gefahren.

In den USA entstand 1983/84 auf Initiative der Defense Advanced Research Project Agency (DARPA) das „Autonomous Land Vehicle" (ALV) mit vier starren Achsen (Abb. 3a), das wie ein Kettenfahrzeug durch einseitiges Bremsen gesteuert werden musste. Ziel war die (überwiegend optische) Erfassung der Umgebung auf tragfähigen allgemeinen Oberflächen und auf Straßen. Die Carnegie Mellon University (CMU) konnte durch Eigeninitiative ein Fahrzeug „NavLab" nur für sich durchsetzen (Abb. 3b), während alle anderen Gruppen sich das ALV-Fahrzeug teilen mussten.

Entwicklung in Deutschland

In Deutschland wurde das Thema sehende Fahrzeuge 1977 von uns an der 1973 gegründeten Universität der Bundeswehr München (UniBwM) auf eine andere Weise aufgegriffen. Statt auf reale Versuche setzten wir zunächst auf Experimente in einer aufwendigen Simulationsanlage [6, 7].

Da Rechner alle Bewegungsprozesse und Landschaftsbilder zur Simulation erzeugen, ergeben sich zwei wesentliche Vorteile gegenüber realen Fahrversuchen:

Abb. 3. Versuchsfahrzeuge zur visuellen Orientierung, die alle nötige Hardware zur autonomen Steuerung auf ebenem Gelände an Bord hatten. **– a.** Das ALV-Fahrzeug mit 4 starren Achsen und 8 t Gewicht, **– b.** das parallel betriebene, konventionell lenkbare „Navlab" der Carnegie Mellon University (CMU). [Photo a: NN, b: (4)]

Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!

Abb. 4. VaMoRs – das Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen, mit dem 1986 nach aufwendigen Simulationsexperimenten die realen Versuche zum autonomen Fahren an der Universität der Bundeswehr München begonnen wurden (vgl. Video 1). [Photo UniBwM]

1. Bei mangelnder Rechenleistung für das Sehen können die Bewegungen entsprechend langsamer, aber trotzdem kontinuierlich mit angepasster Dynamik erzeugt werden.
2. Der visuell zu erfassende Bewegungszustand ist im Simulationsrechner bereits bekannt, so dass eine einfache Qualitätskontrolle des Erkennungsvorgangs möglich ist.

1983 waren auf diese Weise so viele Erfahrungen gesammelt worden, dass ein reales *Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen* (VaMoRs, Abb. 4) in Auftrag gegeben wurde.

Die Gruppen in den USA und Deutschland wussten bis Mitte 1984 nichts voneinander; beide glaubten, allein auf diesem Zukunftsgebiet tätig zu sein. Auf einem „NATO-Advanced-Study-Institute“ (einer internationalen Veranstaltung zum Austausch von Forschungswissen aus verschiedenen Disziplinen) im Juli auf Sizilien mit dem Thema „Vision & Image Understanding“ gab es erste Andeutungen, aber man erfuhr keine genaueren Inhalte. Diese wurden erst im November 1986 ausgetauscht, als die deutsche Gruppe aus Anlass ihrer Veröffentlichung über Computersehen [8] die Gruppen in College Park (University of Maryland) und in Amherst an der University of Massachusetts besuchte.

Zwei grundlegend verschiedene Ansätze

Alle Gruppen in den USA hatten ihren fachlichen Hintergrund in der Forschung zur Künstlichen Intelligenz (KI bzw. Artificial Intelligence, AI), während wir aus dem Bereich Systemdynamik / Regelungstechnik kamen. In letzterem sind *dynamische Prozesse* die Regel; sie werden mittels Differentialgleichungen (im digitalen Bereich – mit Differenzengleichungen, kurz: Dgln) behandelt. In der KI-Forschung wird dagegen primär der *momentane Zustand* quasi-stationär betrachtet, da nur er direkt digital erfasst werden kann.

Dadurch tritt im KI-Ansatz die strenge Unterscheidung zwischen den Begriffen „Zustands-Variablen“ (sie können im Zeitpunkt „jetzt“ nicht verändert werden, sondern entwickeln sich über der Zeit) und „Steuer-Variablen“ in den Hintergrund. Letztere bieten neben den wählbaren konstanten Parametern des Systems die einzige Möglichkeit, den betrachteten Prozess zu beeinflussen. Die Dgln enthalten mit der Verknüpfung von Raum und Zeit „Wissen“ über den behandelten oder beobachteten *Prozess*. Hieraus folgt die in Abbildung 5 dargestellte unterschiedliche Weise der Auswertung von Bildfolgen:

Im Ansatz der KI bzw. Informatik (Abb. 5 oben) wird jedes Bild einzeln analysiert und dann durch Invertierung der perspektivischen Abbildungen als räumliche Szene rekonstruiert. Da bei dieser Transformation die Tiefendimension verloren

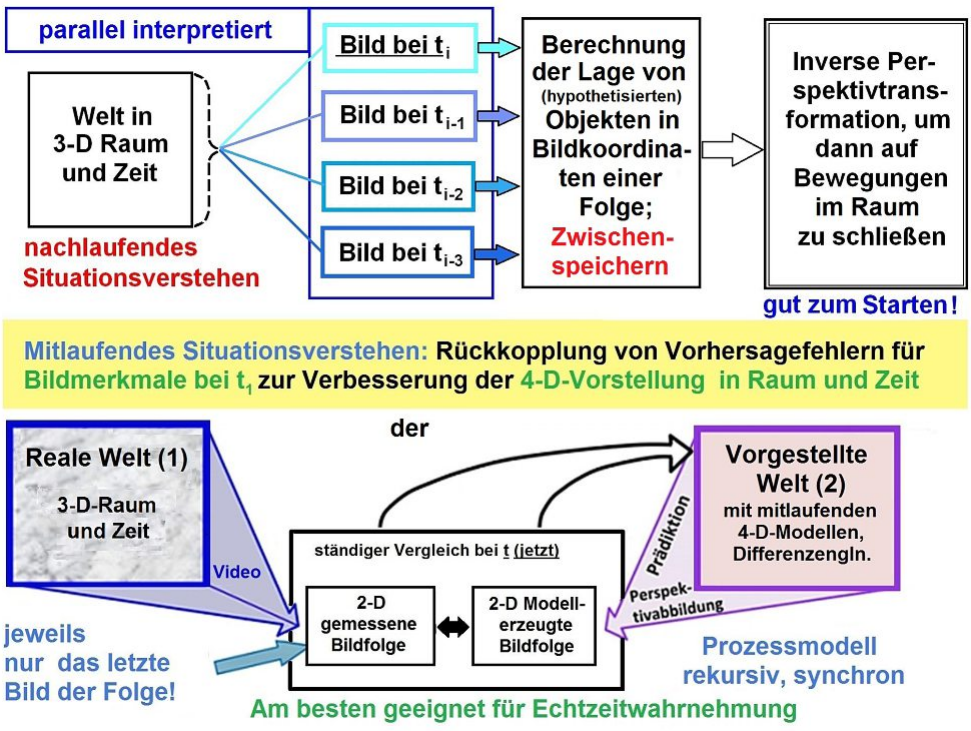


Abb. 5. Die beiden Ansätze, um Fahrzeuge zur Orientierung in einer dreidimensionalen, dynamischen Welt zu befähigen: **Oben:** Entsprechend dem konventionellen Vorgehen der Informatik werden beim *nachlaufenden* Situationsverstehen Folgen von Einzelbildern gespeichert und interpretiert, woraus sich die zeitliche Dimension ergibt. **Unten:** Bei dem aus der Regelungstechnik stammenden 4-D-Ansatz werden die Daten unter Zugrundelegung räumlich-zeitlicher (4-D) Modelle mitlaufend verarbeitet. Die zeitliche Komponente ist in den zugehörigen Dgln von Anbeginn enthalten, was eine Echtzeit-Wahrnehmung ermöglicht.

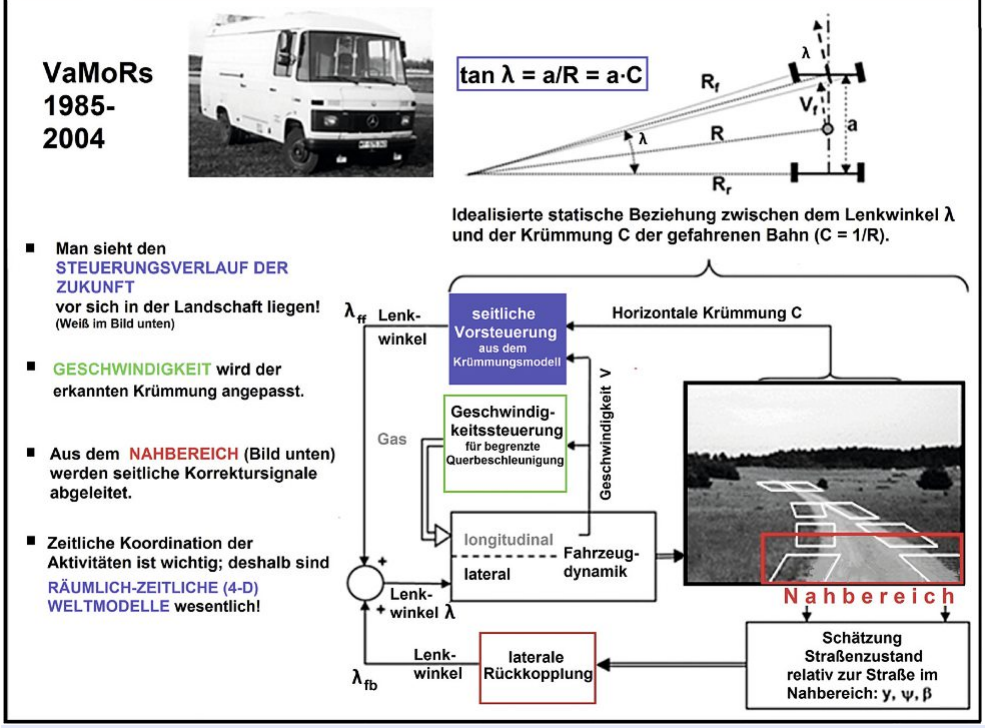
Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!

geht, müssen mehrere Bilder einer Folge gemeinsam räumlich gedeutet werden. Dadurch entsteht (1.) ein großer Bedarf an Speicherplatz und (2.) eine größere Verzugszeit (von *n* Auswertezyklen, bei *n* Bildern).

Im regelungstechnischen Ansatz (Abb. 5 unten) wird nur das letzte Bild der Folge gespeichert. Die Anpassung der Parameter und Zustandsvariablen des rechnerinternen 4-D-Modells für die Wahrnehmung wird durch Rückkopplung von Vorhersagefehlern für markante Merkmale im Bild erreicht. Man beachte, dass alle wahrzunehmenden, im Allgemeinen bewegten Objekte, direkt im 3-D-Raum und der Zeit (in 4-D) im Rechner vorgestellt („imaginiert") werden. Bilddaten sind nur momentan bedeutsame Zwischenwerte, die man nicht zu speichern braucht; alle wesentlichen Wahrnehmungswerte (d.h. die intern für richtig erachteten Werte der *hypothetisierten* Objekte) sind mit dem angewandten Verfahren in den geschätzten Parametern und Zustandsgrößen der *Objektmodelle* erfasst; reale Werte sind und bleiben unbekannt!

Box 1 Steuern und Regeln statt Trajektorien berechnen



Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen (VaMoRs) und das Prinzip der Fahrzeugsteuerung und Objekterkennung.

ABKÜRZUNGEN:

a = Achsabstand des Fahrzeugs
Rr = Kurvenradius der Hinterräder (Zweirad-Ersatzmodell in Fahrzeugmitte)
Rf = Kurvenradius der Vorderräder
R = Kurvenradius des Schwerpunktes, die Abweichungen zwischen diesen drei Radien werden meist vernachlässigt
y = seitliche Ablage des Fahrzeugschwerpunktes von der Sollbahn
Ψ = Gierwinkel des Fahrzeugs
ß = Schiebewinkel („Schwimmwinkel") = seitlicher Driftwinkel (nicht direkt messbar)

Longitudinal bedeutet: In Fahrzeuglängsrichtung – verbunden mit Geschwindigkeit V bzw. Beschleunigung in Fahrtrichtung.
Lateral bedeutet: Seitliche Bewegung normal zur Fahrzeuglängsachse (bzw. Bahnrichtung), verbunden mit Lenkeinschlag λ, Geschwindigkeit V, Schiebewinkel β, die zusammen die Querbeschleunigung ergeben.
Rot: Nahbereichsvermessung unten im Bild liefert zusammen mit den Dgln die Werte λ_{fb} aus der Rückkopplung der seitlichen Ablage von der Straßenmitte (bzw. Spurmitte).
Grün: Geschwindigkeitssteuerung.

Der 4-D-Ansatz brachte 1987 den Durchbruch

Die direkte, unmittelbare Wahrnehmung und Steuerung der räumlich/zeitlichen Prozesse im 4-D-Ansatz bei einer Straßenfahrt wird in Box 1 dargestellt. Durch die Verwendung von Krümmungsmodellen für den Verlauf der Straße [8] wird der erforderliche niederfrequente Vorsteuerungs-Anteil der Lenkung λ_{ff} (oben links im Blockschaltbild und oben rechts in Box 1) direkt im interpretierten Bild sichtbar, da dieser Anteil dem Verlauf C = 1/R der Krümmung entspricht (oben rechts im Bild). Dies erlaubt auch die Vorgabe einer Maximal-Geschwindigkeit, wenn die seitliche Beschleunigung $a_y = V^2/R = V^2 \cdot C$ einen bestimmten Wert nicht übersteigen soll.

Aus der Lage der Fahrbahngrenzen im Nahbereich (rot umrandet) ergeben sich die seitliche Ablage und deren zeitliche Änderung auf der Fahrbahn für das eigene Fahrzeug. Durch eine standardmäßige Zustandsrückkopplung kann der Ablagefehler (mit gewünschter Eigenfrequenz und Dämpfung) reduziert werden (λ_{fb} unten links im Graph) [7]. Eine Berechnung von Verläufen für die zu fahrende Bahn (wie in KI-Ansätzen üblich) kann entfallen. Anfangs wurden nur die weiß gekennzeichneten Bereiche von Video-Halbbildern (320 x 120 Bildpunkte) ausgewertet; deren Lage und Orientierung wurden aber gemäß der erkannten Szene intelligent gesteuert; nur dies erlaubte die hohe Wahrnehmungsfrequenz von etwa 10 Hz (Details sind

Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart
Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!

Abb. 6. Der Kleinlaster VITA-1 (Vision Information Technology Application) der Daimler-Benz AG, der mit dem visuellen Wahrnehmungssystem der 1. Generation der UniBwM ausgestattet war. Mit diesem Fahrzeug wurde 1991 in Turin das automatische Kolonnenfahren demonstriert.

unter [9] herunterladbar). Der Ansatz wurde auch in den ersten sehenden Fahrzeugen der Daimler-Benz AG (DBAG) „Spur Bus“ und „VITA(1)“ verwendet.

Auf dieser Basis konnte im Sommer 1987 die autonom gefahrene Geschwindigkeit auf einem über 20 km langen, noch nicht für den öffentlichen Verkehr freigegebenen Stück Autobahn bei Dingolfing auf 96 km/h, der motorbedingten Höchstgeschwindigkeit von VaMoRs, gesteigert werden (siehe Videoclip 1).

Dieses Ergebnis wurde dann eingesetzt, um in dem damals gerade in der Definition befindlichen EUREKA-Projekt PROMETHEUS (PROgraMme of a European Traffic of Highest Efficieny and Unprecedented Safety) die bis dahin vorgesehene seitliche Führung von Fahrzeugen mittels elektromagnetischer Felder von vergrabenen Kabeln durch *maschinelles Sehen* zu ersetzen. Dies bedeutete eine wesentliche Flexibilisierung mit großem Potential zu weiterer Entwicklung bis hin zu menschlichen Fähigkeiten. An dem „ProArt“ genannten Teilprojekt von PROMETHEUS nahmen fast alle europäischen Autofirmen im Verbund mit etwa fünf Dutzend Forschungseinrichtungen und Universitäten der jeweiligen Länder teil (in Deutschland FU Berlin, Bochum, Braunschweig, Hamburg, Karlsruhe, Koblenz/Landau, Mainz; München: UniBwM, TU und LMU; Stuttgart, Ulm) [10].

Das Forschungsprojekt PROMETHEUS-ProArt

Nach der Definitionsphase 1987 lief dieses europäische Projekt bis Ende 1994 [11]. Bis zur Halbzeitdemo im Herbst 1991 in Turin, an der alle Projektteilnehmer ihre Entwicklungen vorstellten, waren die oberen Führungsebenen der Autoindustrie skeptisch gegenüber dem Gesichtssinn für Fahrzeuge. Als dort das Kolonnenfahren mit beliebigen Geschwindigkeiten bis zu 60 km/h und bis zum Anhalten gezeigt werden konnte, änderte sich die Einstellung auch auf dieser Ebene.

Die Daimler-Benz AG, unser Kooperationspartner von 1986 bis 1996, schlug sogar vor, auf der geplanten Abschlussdemo im Oktober 1994 bei Paris mit modifizierten PKWs und mit Gästen an Bord das autonome Fahren auf der Basis maschinellen Sehens im normalen dreispurigen Autobahnverkehr zu zeigen. Waren bis 1991 noch Kleinlaster (Abb. 6) erforderlich, um den Stromgenerator, die Mess- und Stellglieder sowie die Rechenelemente aufzunehmen, so sollten die neuen Mikroprozessoren (Transputer: Parallelrechner mit vier direkten Verbindungen zu benachbarten Prozessoren) den Energie- und Raumbedarf so weit verringern, dass eine Unterbringung in PKWs möglich wurde. Es musste dann allerdings der größte seiner Klasse sein, um alle Anforderungen befriedigen zu können. Zwei Mercedes SEL-500 erhielten eine zweite Lichtmaschine mit 24 V-Batterie, um den Mehrbedarf an elektrischer Leistung abzudecken (Abb. 7).

In Stuttgart wie in München wurde je ein solches Fahrzeug mit Zulieferungen von Drittfirmen parallel umgerüstet, um zügig voranzukommen. Die DBAG war für die mechanischen Einbauten in die Fahrzeuge verantwortlich, während wir mit einer Mannschaft von bis zu 20 Mitarbeitern für die Realisierung der Wahrnehmungssysteme mit je vier Miniaturkameras und Inertialsensoren sowie für die Software zur Steuerung und Kommunikation in dem neuen Transputersystem mit bis zu 60 Prozessoren zuständig waren [11].

Abbildung 8 zeigt eine typische Autobahnszene in der damaligen Bildqualität („Fingerkameras“, s. Abb. 7 oben, mit ca. 1 cm Kameradurchmesser). Die Entdeckung und Verfolgung von anderen Fahrzeugen erfolgte durch spezielle Software für geneigte Kanten mit anschließenden mittleren Grauwert-Bereichen [12-15]. Die Schatten unter dem Fahrzeug und die vertikalen Kanten der unteren Hälfte der Karosserien erwiesen

Abb. 7. 1994 reichten bereits große Limousinen, um sie mit den nötigen Stromgeneratoren, Mess- und Steuerungselementen zum autonomen Fahren auszustatten. Im Bild VaMP der Universität der Bundeswehr, ein Zwilling von VITA2 der DBAG. Beide Fahrzeuge fuhren bei den Abschluss-Demonstrationsfahrten zum Prometheus-Projekt als einzige basierend allein auf maschineller Wahrnehmung im normalen dreispurigen Verkehr (Autoroute 1 bei Paris) autonom mit. Im oberen Bild zwei der vier hinter der Windschutzscheibe installierten Miniaturkameras.

Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!

sich als die verlässlichsten Indikatoren für ein Fahrzeug (Abb. 8: weiß umrandet), während die oberen Karosserieteile mit spiegelnden Flächen überwiegend zu Irritationen Anlass gaben.

Weitere Details über die Architektur des Transputer-Systems und den technischen Aufbau sind unter [11] direkt herunterladbar (siehe auch Videoclips 2 und 3 zum Spurwechsel und zu den Entwicklungen an der UniBwM bis 1995).

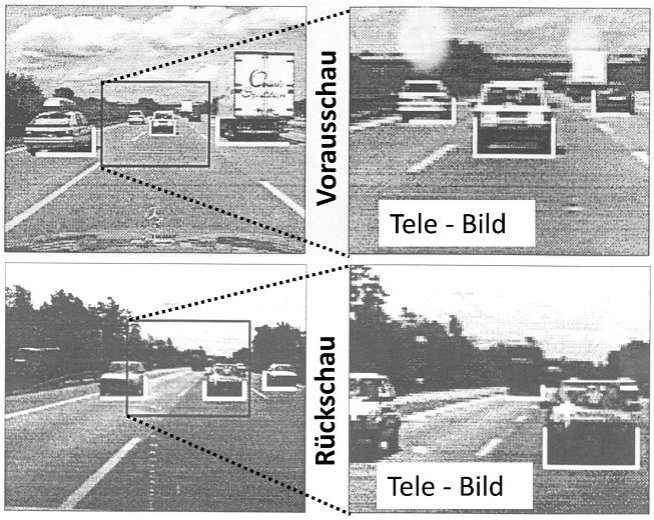


Abb. 8. Verarbeitete Videobilder der vier Kameras 1994 in Testfahrzeugen SEL-500 des Projektes Prometheus ART auf einer dreispurigen Autobahn mit Merkmalen von erkannten und verfolgten Fahrzeugen.

Der entscheidende Schritt bei der Detektion und Wahrnehmung von Fahrzeugen sowie der Fahrzeugumgebung im 4-D-Ansatz ist, dass man durch verlässliche Kriterien schnell den Sprung zur Hypothesenbildung bezüglich der Art des Objektes und des relativen Zustands in der realen 4-D-Welt (3-D-Raum und Zeit) schafft. Mit den rekursiven Schätzverfahren erhält man dann optimale Schätzwerte für die Parameter und Zustandsgrößen in den angesetzten Modellen für Objekte und Bewegungen (kleinste Summe aller Fehlerquadrate in der Merkmal-Voraussage). Ist dieser Wert zu groß, muss diese Hypothese verworfen und durch eine andere ersetzt werden.

Zur Akzeptanz einer Hypothese aus neuen Merkmalen nach einer Initialisierung reichen in der Regel 3 bis 5 Auswertezyklen, d. h. bei 10 Hz Auswertefrequenz eine Verzögerung von bis zu einer halben Sekunde. Dann sind aber nicht nur relative Positionsdaten, sondern auch Geschwindigkeiten und der nicht direkt messbare Schiebe-(Drift-)Winkel (d. h. das durch Massenträgheit und seitliche Nachgiebigkeit der Reifen je nach Lenkereinschlag resultierende Bewegungsverhalten) als Schätzwerte verfügbar. Ist der Schätzprozess durch Parameteranpassung in den Modellen auf kleine Vorhersagefehler eingeschwungen, ergibt sich eine Verzugszeit von nur einem Zyklus, also einem Bruchteil von derjenigen nach dem Verfahren des nachlaufenden Situationsverstehens (Abb. 5 oben).

Gemäß den Voraussagen mit den zeitlichen Modellen können die Suchbereiche für spezifische Merkmale im 4-D-Ansatz physikalisch sinnvoll eingeschränkt werden. Dies alles erlaubte es uns mit unserem Kooperationspartner als einzige Gruppe zum Abschluss des Projekts 1994 eine autonome Fahrt allein basierend auf visueller Wahrnehmung im normalen Verkehr auf der Autoroute 1 am Flughafen Charles-De-Gaulles bei Paris mit Gästen an Bord durchzuführen (s. Videoclip 2).

Viele der anderen Projektpartner befassten sich zusätzlich mit aktiven Sensoren wie Radar und Laser-Range-Finder (Lidar) zur Hindernisentdeckung. Die verschiedensten Lidar-Verfahren wurden untersucht und getestet. Ein Überblick über den weltweiten Stand der Entwicklungen zu autonomen Fahrzeugen wird in den *Proceedings* des unmittelbar nach der Abschlussdemo ebenfalls in Paris abgehaltenen internationalen Symposiums gegeben [16]. Der Tagungsband dokumentiert, dass Europa mit Gruppen in Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Schweden und Spanien auf diesem Feld die Führung übernommen hatte.

Entwicklungen nach dem Prometheus-Projekt

Angeregt durch die europäischen Erfolge wurden in den USA, in Japan und in einigen asiatischen Staaten die Aktivitäten auf dem Gebiet des Fahrzeugsehens und des autonomen Fahrens intensiviert. Einen Eindruck hiervon kann man aus den Tagungsbänden des ab 1992 jährlich stattfindenden Symposiums [16] erhalten, das in dreijährigem Rhythmus reihum in den USA, Asien und Europa stattfindet. Man konzentrierte sich überall auf *Assistenzsysteme*, die mit relativ geringem Aufwand das Autofahren insgesamt sicherer und effizienter machen sollten. Warnungen beim Verlassen der Fahrspur und bei zu dichtem Auffahren auf das Fahrzeug voraus waren die Hauptthemen. Die Spur wird meist visuell mit fest am Fahrzeug montierten Kameras vor dem Rückblickspiegel erkannt, während zur Abstandshaltung aktive Systeme wie Radar und Lidar am unteren Fahrzeugkörper bevorzugt werden.

Auf allen Kontinenten wurden punktuell auch Systeme auf der Basis künstlicher neuronaler Netze zur Erkennung der Fahrbahn untersucht. Nach anfänglicher Begeisterung wurde man aber mit der Zeit wegen immer wieder auftretender Ungereimtheiten zurückhaltender. In den USA hat die Gruppe von Dean Pomerleau an der CMU seit Ende der 1980er Jahre [17] diesen Ansatz untersucht. Mit Verbesserungen [18] gelang es dort im Juli 1995 eine (in mehreren Etappen durchgeführte) Demonstrationsfahrt von der Atlantik- zur Pazifikküste zu absolvieren. Bei dieser Fahrt *Hands-off through America* erfolgte die Lenkung visuell autonom, die Längssteuerung mit Gas und Bremse wurde jedoch vom Sicherheitsfahrer getätigt. Beachtliche 98% der Strecke konnten autonom gelenkt bewältigt werden. Bei dieser Mission gab es einen Zwischenstopp in Denver, Colorado, wo die Demo-C des amerikanischen UGV-Projektes „Unmanned Ground Vehicles“ [19] bei Martin Marietta stattfand. Der Autor dieses Artikels war auch dort anwesend und konnte das Medienspektakel um die Fahrt miterleben.

Nachdem eine *autonom gelenkte* Demonstrationsfahrt eine derart große öffentliche Aufmerksamkeit erfahren hatte, war unsere Mannschaft der Meinung, man sollte die für November geplante Fahrt zu einem Projekttreffen nach Odense bei Kopenhagen doch dazu nutzen, um mit dem inzwischen von Transputern auf moderne Hochleistungsprozessoren (Motoro-

Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!

la Power-PC mit etwa 10facher Rechenleistung) umgerüsteten Fahrzeug *VaMP* die Fähigkeit zum *vollautonomen* Fahren über lange Strecken zu demonstrieren.

So wurde die Reise von München nach Dänemark zu einer Testfahrt. Die autonomen Fahrstrecken über insgesamt mehr als 1600 km erfolgten bei teilweise schlechten Wetterbedingungen. 95% der geplanten Strecke konnte voll autonom mit Längs- und Quersteuerung ausschließlich durch maschinelles Sehen durchgeführt werden. Insbesondere bei Baustellen mit gelben Fahrbahnmarkierungen zusätzlich zu den normalen weißen war das nur mit Schwarz/weiß-Signalen arbeitende Videosystem natürlich überfordert [15 (Sektion 9.4.2.5), 20]. Wenn es zum Verlust der laufenden Fahrbahnerkennung kam, versuchte das System durch erneutes Initialisieren, diese wieder herzustellen, was häufig erfolgreich war.

Da mit den neuen Prozessoren die nach hinten schauenden Kameras nicht mehr verfügbar waren, hat der Sicherheitsfahrer durch Setzen des Blinkers einen sofortigen Spurwechsel angefordert, den das System dann voll autonom durchführte; insgesamt wurden über 400 derartige Spurwechsel erfolgreich absolviert. Auf wenig befahrenen Autobahnabschnitten in der Lüneburger Heide wurden autonom gefahrene Geschwindigkeiten bis 175 km/h erreicht. Bezüglich der Entwicklungen in den USA und in Japan sei auf [4] verwiesen. Es wurden keine weiteren Durchbrüche erzielt.

Box 2 **Auf dem Weg zum autonomen Fahren abseits von Wegenetzen**
Das Projekt "AutoNav" (1997 - 2003): Ziele, Ergebnisse und die Projektpartner

Anwendungen im Bereich der Aufklärung

USA: US-Army Research Laboratory (ARL), National Institute of Standards & Technology (NIST), Sarnoff Research Laboratory, Princeton (NJ), General Dynamics Robotics Institute

Autonomes Fahren auf und abseits von Wegenetzen:

- **Straßen jeder Art: Autobahnen, normale Straßen, befestige und unbefestigte Wege**
- **Überqueren von** und **Abbiegen auf Querstraßen**, deren **genaue Schnittwinkel & Fahrbahnbreite** nicht bekannt sind
- **Verlassen der Straße** zum **Querfeldein-Fahren** mit **unebenem Übergang am Straßenrand**
- sowohl
  ▲ **positiven** (aus Fahrebene herausragenden) als auch
  ▽ **negativen Hindernissen (Gräben)** ist auszuweichen
- **Übergang** vom **Querfeldein-Fahren** auf einen Weg oder eine **Straße mit leichter Böschung**

Deutscher Industriepartner **Dornier System GmbH**

Bezüglich Details siehe [34] Videoclips (4-7)

Verzweigung der Entwicklungslinien

Da die Firma Daimler wie auch die übrigen Autofirmen weltweit sich zukünftig auf relativ einfache Assistenzsysteme mit aktiver Abstandsmessung (Radar, Lidar) konzentrieren wollten, hat sich die UniBwM-Gruppe Ende 1996 von ihrem Partner getrennt und ist auf ein Angebot des US-Army Research Laboratory (ARL) mit der US-amerikanischen Bundesbehörde NIST (National Institute of Standards and Technology) eingegangen. Im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes „AutoNav" zwischen deutschen und amerikanischen Partnern sollte ein anspruchsvolles Sehsystem der nächsten Generation für das Fahren auf Wegenetzen aller Art sowie auch auf tragfähigem Untergrund (Rasen, Halbwüste) entwickeln werden. Neben Hindernissen oberhalb der Fahrfläche sollten auch solche unterhalb (Gräben, große Löcher, sogenannte „negative Hindernisse") entdeckt und umfahren werden. In dem Vorhaben sollten drei sich ergänzende und positiv getestete Ansätze zusammengeführt werden:

- das Realtime Control System (RCS) von J. Albus (NIST), das den gesamten Aufgabenkreis von der Extraktion von Bildmerkmalen, deren Verknüpfung mit Wissen in Hintergrund-Datenbanken über Objekte und deren Einsatz bis hin zur Definition und Ausführung von Missionen in einem Aufgabenzusammenhang in einem integralen Ansatz umfasste [21];
- das erste Echtzeit-Stereosystem des SRI Princeton, NJ, das mit dem von Peter J. Burt entwickelten Pyramidenansatz zur Bildverarbeitung, bei dem ein detailreiches Originalbild durch wiederholte Reduzierung auf höhere Pyramidenebenen mit jeweils um den Faktor 4 verkleinerter Bildpunktzahl besonders effektiv war [22] und
- der 4-D Ansatz der UniBwM [15, 23], s. Box 2.

Neu war die konsequente Realisierung des *Fähigkeiten-Konzepts*, das eine problemlose Bestückung mit anderen bzw. weiteren Sensoren, Stellgliedern und Softwaremodulen erleichtern sollte [15, 24-26]. Eine entsprechende Definition und Kapselung der erforderlichen Schnittstellen sollte für die Zukunft eine flexible Handhabung erlauben.

Gemäß den wesentlichen Eigenschaften erhielt das neue System in Deutschland den Namen *Erwartungsbasiertes, Multifokales, Sakkadisches Sehen* (EMS-Vision); der englische Name ist *Expectation-based, Multi-focal, Saccadic Vision* mit derselben Kurzform; (Näheres in [27] mit 6 Beiträgen zu EMS-Vision).

„Erwartungsbasiert" steht für den 4-D-Ansatz; der zweite Term macht deutlich, dass das System zwei oder mehr Brennweiten bei den Videokameras parallel benutzt. Mit „sakkadisch" wird auf die raschen Augenbewegungen (Blicksprünge, Sakkaden) angespielt, mit denen Objekte in den hohen Auflösungsbereich der Netzhaut gebracht und fixiert werden. Eine Blickrichtungsänderung von einigen –zig Grad kann im Bruchteil einer Sekunde durchgeführt werden [15, 28].

Die Kombination der sehr effizienten Ansätze zur Objekterkennung erlaubt die Wahrnehmung in großen Sichtbereichen, inklusive Objektverfolgung und guter Auflösung bei geringer Unschärfe [13, 20, 24-26, 28-33].

Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!

Abbildung 9 zeigt die Mission, die 2001 zur Abschluss-Demonstration mit dem VaMoRs in Neubiberg bei München durchgeführt wurde. Damals erforderte das Stereosehen noch einen eigenen Rechner von etwa 30 Liter Volumen. 2003 konnte dann die gleiche Aufgabe mit einer Einschubkarte in einen der vier PC für EMS-Vision durchgeführt werden [34].

Die amerikanischen Partner gaben ihrer Version den Namen *4-D/RCS*, um die Kontinuität der Ansätze anzudeuten [21]. Der beschränkte Platz erlaubt nicht, auf die Etappen der Entwicklung näher einzugehen.

Der interessierte Leser findet direkt abrufbare Informationen in [15, 34, 35] sowie in den Videos (4-7); die Website www.dyna-vision.de enthält darüber hinaus Kurzfassungen aller Dissertationen am Institut zum Thema sowie viele direkte Links zu Veröffentlichungen und Videos in mehreren Anwendungsbereichen.

Die Demonstrationen unserer amerikanischen Partner zusammen mit den Entwicklungen am Global Positioning System (GPS) und bei den rotierenden Lidaren (bei ihnen kommen rotierende Spiegel oder Laserquellen zum Einsatz, um die Umgebung rundum zu erfassen) führten 2001 zu der Forderung des amerikanischen Kongresses, dass bis 2015 Bodenfahrzeuge der US-Army in der Lage sein sollten, Teile von Missionen autonom durchzuführen. Daraufhin schrieb die DARPA für US-Firmen und Institute die *Grand Challenge 2004* mit einem Preisgeld von 1 Million Dollar für den Sieger aus, bei der Bodenfahrzeuge die autonome Durchführung einer Mission über eine Distanz von mehr als 200 km zur Versorgung in bekanntem Gebiet demonstrieren sollten.

Erst beim zweiten Wettbewerb 2005 konnten die Anforderungen von einem kleinen Teil der vielen Bewerber erfüllt werden; für das Jahr 2007 wurde dann die *Urban Challenge* ausgeschrieben, bei der autonome Fahrzeuge eine ähnliche Mission in einem dafür speziell präparierten (über GPS-Daten bekannten) Stadtgebiet durchführen mussten. Auch hierbei waren die zu fahrenden Routen durch GPS-Daten festgelegt; die autonomen Fahrzeuge mussten nun aber auch im normalen Verkehr mit anderen Teilnehmern zurechtkommen. Dieses Mal waren unter amerikanischer Teamleitung auch internationale Bewerber, die sich zuvor qualifiziert hatten, zur Teilnahme zugelassen.

Das autonome Fahren in einer vorab geklärten Umgebung bekam durch den Wettbewerb neue Impulse. Sie führten – zunächst in den USA, später auch in anderen Ländern – zu einer anderen Linie der Entwicklung. In Box 3 ist sie dem von der Universität der Bundeswehr München entwickelten Pfadfinder-Sehen (ohne große Vorkenntnisse über die geplante Umgebung) gegenübergestellt. Dieses wird am Institut für Technik Autonomer Systeme (TAS) der UniBwM weiter verfolgt [36]. Schwerpunkt ist die Entwicklung autonomer mobiler Roboter-Plattformen, die in der Lage sind, selbständig in unbekannter, unstrukturierter Umgebung zu navigieren und explorative Aufgaben zu bewältigen.

Die Millionen Jahre lange Evolution bei Tieren hat ein solches Pfadfinder-Sehen perfektioniert. Auch wenn dies heute von den meisten technischen Anwendern noch nicht gewürdigt wird, so dürfte mit zunehmender Erfahrung dieser Ansatz langfristig auch in robotischen Systemen der effizienteste sein.

Die Linie „Bestätigungs-Sehen“ wurde wegen der einfacheren benötigten Software von der Industrie weltweit für Assistenzsysteme übernommen. Auch die „Bertha-Benz-Fahrt“ (Mannheim – Pforzheim) 2013 von Daimler mit einem S-Klasse-Fahrzeug zum 125. Jubiläum der Pionierfahrt von 1888 erfolgte nach diesem Prinzip. Neuerdings erfahren „neuronale Netze“ mit dem *deep learning*-Ansatz wieder mehr Aufmerksamkeit. Wenn es gelingt, diese geschickt auf der Basis des Pfadfinder-Sehens aufzusetzen, kann das zu einer neuen Leistungsexplosion führen.

Ausblick

In der allgemeinen Wahrnehmung werden Maschinen (inklusive Robotern aller Art), die zu eigenen Entscheidungen fähig sind, häufig lediglich als Objekte angesehen. Hier sei dafür plädiert, sie als Subjekte aufzufassen, wenn sie über folgende Fähigkeiten verfügen:

a) die Umwelt über Sinne wahrzunehmen,
b) die eigenen Sensordaten mit gespeicherten Informationen zu kombinieren und so die allgemeinen Objekttypen zu klassifizieren,
c) die Absichten von *anderen Subjekten* zu vermuten und dann

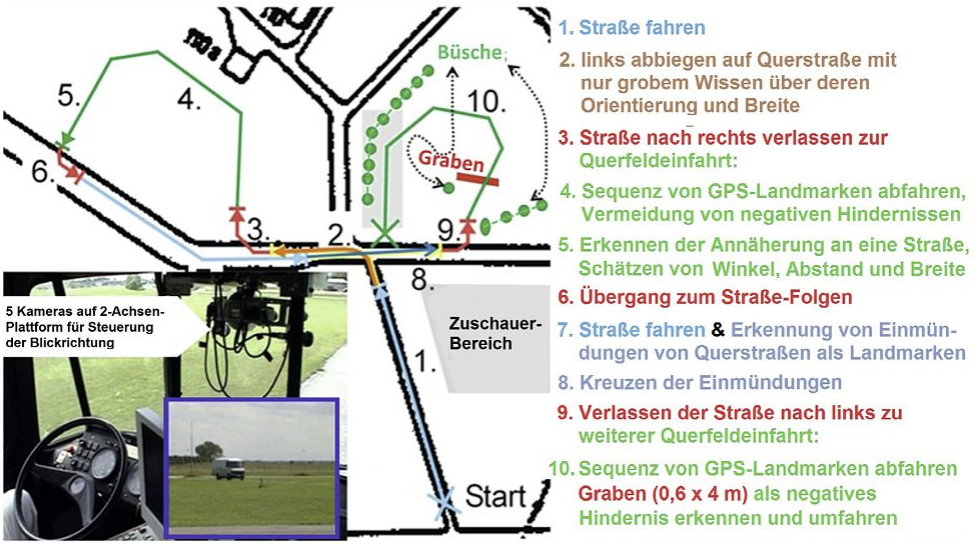


Abb. 9. Im Rahmen des amerikanisch-deutschen Gemeinschaftsprojekts AutoNav (1997 bis 2003) wurde 2001 und 2003 auf Demonstrationen gezeigt, wie VaMoRs autonom auf einem Netzwerk von Straßen niederer Ordnung einschließlich querfeldein-Fahrten mit Graben als zu umgehendem Hindernis (roter Balken) manövriert (vgl. Video 7).

Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!

Box 3 Aufspaltung der Entwicklungslinien im autonomen Fahren um die Jahrhundertwende

Pfadfinder-Sehen (Scout-type) z.B. **EMS-Vision**	Bestätigungs-Sehen (Confirmation-type), in Industrie heute üblich
• **Großer Satz von Bildmerkmalen** (hohe Auflösung, Farbe, Texturen)	• **Reduzierter Satz an Bildauflösungen und Merkmalen kann reichen**
• **Große spezifische Wissensbasen:** a) **zur Erzeugung und zum Test von Objekthypothesen aus Bildmerkmalen (4-D-Ansatz)** b) **über klassenspezifische Fähigkeiten zur Manöverdurchführung** c) **über domänenspezifische Situationen, zu deren aktueller Erfassung und zur Entscheidungsfindung**	• **Bescheidenere Wissensbasen erlauben:** **Fahren in vorgeklärter Umgebung mit GPS und genauen und aktuellen Landkarten** **Hinderniserfassung, meist über Radar und Lidar (häufig 360°), mäßige Auflösung, körperfeste Montage**
• **Multifokal mit aktiver Steuerung und Stabilisierung der Blickrichtung**	• **Einfache körperfeste Kameras reichen meist aus**
• **Gute Lernfähigkeit und großes Wachstumspotential**	• **Hohe laufende Kosten wegen der erforderlichen Aktualisierung der Umweltdaten**

d) die Verhaltensentscheidung darauf zu basieren, sowie
e) die entsprechenden eigenen Fähigkeiten zu deren Realisierung zu aktivieren.

Wenn immer ein System solche Fähigkeiten hat – ob auf biologischer oder auf technischer Basis –, ist es als ein *Subjekt* anzusehen, das zu autonomen Handlungen fähig und dafür dann auch verantwortlich ist.

War das 20. Jahrhundert gekennzeichnet durch die Entwicklung leistungsfähiger Fahrzeuge aller Art, mit denen man auf dem Boden, auf und in dem Wasser, im Luft- wie im Weltraum navigieren kann, so wird das 21. Jahrhundert eine Entwicklung *sehender kognitiver Fahrzeuge* mit angepassten Verhaltensweisen und den verschiedensten intelligenten Fähigkeiten bringen, einschließlich der, eigenständig aus Erfahrung zu lernen.

Nahm man früher keine blinden Tiere als Zugtiere, so werden in fernerer Zukunft keine blinden mit sehfähigen Fahrzeugen konkurrieren können. Wenn die entsprechenden Software-Systeme einmal da sind, ergeben sich für die zusätzlich benötigten Sensoren und Rechner nur geringfügig höhere Kosten. Eine Skizze, wie solche Fahrzeuge mit Augen aussehen könnten, wurde in [37] gegeben.

Die jahrzehntelange Beschäftigung mit dem 4-D-Ansatz für maschinelles Sehen [9, 11, 15, 23, 34] hat zu Gedanken geführt, ob auf diese Weise nicht auch alle menschlichen Kulturen als Ergebnis Generationen übergreifender Evolutionen verstanden werden können (siehe auch [38-40]).

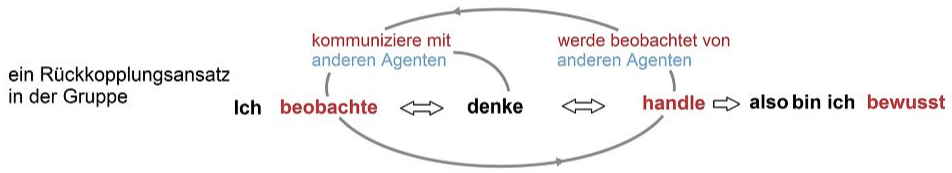
Box 4 soll zum Abschluss den Grundgedanken kurz skizzieren; er ist nicht grundlegend neu. Karl Popper hat in seiner „Drei-Welten-Lehre“ den Schopenhauer'schen Grundgedanken der Welt als System von Prozessen und Vorstellungen weiter ausgebaut [41]. Mit unserem Ansatz kommen wir mit bildhafter digitaler Umwelterfassung von der technischen Realisierungsseite her zu prinzipiell ähnlichen Strukturen. In der Box wird Bezug genommen auf Überlegungen des Neurowissenschaftlers und Philosophen Julian Kiverstein [39]. Nach seinen Überlegungen spielen individuelle Subjekte (in dem oben skizzierten Sinne) und die Zeit (da alle Objekte der realen Welt darin eingebunden sind) eine wesentliche Rolle in der Kognition, was in Übereinstimmung mit dem technisch erfolgreichen 4-D-Ansatz ist.

Kiverstein kommt zu dem Ergebnis, dass der oft behauptete Graben zwischen Natur- und Geisteswissenschaft nicht zu entstehen braucht, wenn man in der Philosophie die hier skizzierten Prinzipien der Kognition durch individuelle Subjekte berücksichtigen würde.

Box 4 Der 4-D-Ansatz als allgemeines kognitives Prinzip

- Aufgrund aktueller Messdaten und gespeichertem Erfahrungswissen über **Prozesse in Raum und Zeit (4-D)** werden im Wahrnehmungsprozess **früh Hypothesen über Objekte/Subjekte** und **Handlungabläufe in Situationen der beobachteten Szene** aufgestellt.
- Die Anpassung der hypothetisierten Vorstellung an weitere noch folgende Messdaten erfolgt mitlaufend durch **Rückkopplung von Vorhersagefehlern** für Bildmerkmale (allein oder in Gruppen von Subjekten).

Statt Descartes' "Ich denke, also bin ich"



Kann man möglicherweise die Vielzahl menschlicher Kulturen auf ähnliche Weise erklären?

- In allen menschlichen Gesellschaften gibt es eine **inhärente Tendenz zu gewagten Systemen von Hypothesen** mit angenommenen **Subjekten und Handlungen.**
- Zur **Wahrung von Kontinuität** und zur **Erhöhung des Sicherheitsgefühls für Subjekte** der eigenen Kultur ***werden Hypothesen zunächst einmal mit Nachdruck verteidigt***
  - über Tage und Wochen,
  - über Jahre und Jahrzehnte, ja sogar über Jahrhunderte und Jahrtausende.

Anpassungen des Systems von Hypothesen erfordern **SOLIDE BEOBACHTUNGEN** über längere Zeit und **GESELLSCHAFTLICHE AUSEINANDERSETZUNGEN,** oft auch gewalttätige.

Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!

Danksagung

Die erreichten Ergebnisse konnten neben der guten Grundfinanzierung durch die UniBwM nur durch die Unterstützung von verschiedenen Partnern und Drittmittel-Geldgebern erzielt werden. Zum ersten Echtzeitsystem 1981 für die Bildfolgenverarbeitung geht der Dank an das UniBwM-Institut für Messtechnik unter Prof. V. Graefe. Bei der Umrüstung des VaMoRs 1985 hat die Firma Zinkl im Münchner Raum den größten Teil der Arbeiten erledigt. Für die Hardware-Um- und Einbauten von VaMP danken wir der Fa. Daimler.

Drittmittelfinanzierungen erfolgten durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), die Deutsche Forschungs-Gemeinschaft (DFG), die Europäische Union (EU), und das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB).

Literaturverzeichnis und elektronische Dokumente

[1] W. Spillmann: Visual Perception. The Neurophysiological Foundations. Academic Press. New York 1990. – [2] H. Moravec: Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover. Ph. D. thesis. Computer Science Department, Stanford University, March 1980. – [3] I. J. Cox, G. T. Wilfong (Hrsg.): Autonomous Robot Vehicles. Springer. New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, Hong Kong 1990. – [4] E. D. Dickmanns: Vision for Ground Vehicles - History and prospects. Int. J. of Vehicle Autonomous Systems (IJVAS); Keynote Paper of inaugural issue (2003). – [5] S. Tsugawa, T. Hirose, T. Yabate: An Automobile with Artificial Intelligence. Proc. 6th IJCAI, Tokyo, Japan, 893 (1979).– [6] H. G. Meissner: Steuerung dynamischer Systeme aufgrund bildhafter Informationen. Dissertation 1982. – UniBwM/LRT (ISF) Kurzfassung: www.dyna-vision.de unter: Home/Survey Website / Review2016, dort unter „References". – [7] A. Zapp: Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen. Dissertation 1988. Siehe [6]. – [8] E. D. Dickmanns, A. Zapp A. 1986: A curvature-based scheme for improving road vehicle guidance by computer vision. Mobile Robots, Proceedings of SPIE **727**, 161 (1986). – [9] Part I: Basic Approach to Real-time Computer Vision with Spatiotemporal Models (1977-89), pdf. www.dyna-vision.de unter: Home / Survey Website / Review 2016/References: [88a]. – [10] F. Panik: The PROMETHEUS Vision. 17.VDA Technischer Kongress 19./20. März, Filderstadt, S. 9-24 (2015). – [11] Part II: PROMETHEUS and the 2nd-generation System for Dynamic Vision (1987 - 1996), pdf. www.dyna-vision.de unter: Home/Survey Website/Review 2016/References: [88b]. – [12] B. Mysliwetz: Parallelrechnerbasierte Bildfolgeninterpretation zur autonomen Fahrzeugführung. Dissertation 1990. Siehe [6]. – [13] F. Thomanek: Visuelle Erkennung und Zustandsschätzung von mehreren Straßenfahrzeugen zur autonomen Fahrzeugführung. Dissertation 1996. Siehe [6]. – [14] Dirk Dickmanns: Rahmensystem für visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer. Dissertation UniBwM INF. 1997. Shaker Verlag. Aachen 1998. – [15] E. D. Dickmanns: Dynamic Vision for Perception and Control of Motion. Springer-Verlag. London 2007. – [16] Proceedings of the Intelligent Vehicles'94 Symposium, Paris, Okt. 1994. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York. 1994. – [17] D. A. Pomerleau: Neural Network Perception for Mobile Robot Guidance, Ph.D. thesis. Carnegy Mellon University. Pittsburgh 1992. – [18] D. Pomerleau, T. M. Jochem: Rapidly adapting machine vision for automated vehicle steering, IEEE Expert **11** (2) 1996. – [19] D. W. Gage Douglas: UGV History 101: A Brief History of Unmanned Ground Vehicle (UGV) Development Efforts. In: Unmanned Systems, Special Issue on Unmanned Ground Vehicles 13 (3 Summer), 2 (1995). – [20] R. Behringer: Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehn für ein autonomes Straßenfahrzeug. Dissertation 1996. Siehe [6]. – [21] J. S. Albus: 4-D/RCS reference model architecture for unmanned ground vehicles. Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, April 24-27 2000. – [22] S. Baten, M. Lützeler, E. D. Dickmanns, R. Mandelbaum, P. Burt: Techniques for Autonomous, Off-Road Navigation. IEEE Intelligent Systems 13 (6), 57 (1998). – [23] E. D. Dickmanns, V. Graefe: (a) Dynamic monocular machine vision und Machine Vision, (b) Applications of dynamic monocular machine vision. Machine Visions and Applications 1, (a): 223, (b): 241(1988). – [24] R. Gregor: Fähigkeiten zur Missionsdurchführung und Landmarkennavigation. Dissertation 2002. Siehe [6]. – [25] M. Pellkofer: Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung. Dissertation 2003. Siehe [6]. – [26] K. H. Siedersberger: Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-) autonomen Fahrzeugen. Dissertation 2004. Siehe [6]. – [27] IV'00: Proc. Int. Symp. on Intelligent Vehicles (IV'2000), Dearborn, (MI), Oct. 4-5, 2000, mit 6 Beiträgen zu EMS-Vision. – [28] J. Schiehlen: Kameraplattformen für aktiv sehende Fahrzeuge. Dissertation 1995. Siehe [6]. – [29] N. Müller: Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Fahrzeug Dissertation 1996. Siehe [6]. – [30] A. Rieder: Fahrzeuge sehen – Multisensorielle Fahrzeugerkennung in einem verteilten Rechnersystem für autonome Fahrzeuge. Dissertation 2000. Siehe [6]. – [31] M. Lützeler: Fahrbahnerkennung zum Manövrieren auf Wegenetzen mit aktivem Sehen. Dissertation 2002. Siehe [6]. – [32] V. von Holt: Integrale Multisensorielle Fahrumgebungserfassung nach dem 4-D Ansatz. Dissertation 2004. Siehe [6]. – [33] U. Hofmann: Zur visuellen Umfeldwahrnehmung autonomer Fahrzeuge. Dissertation 2004. Siehe [6]. – [34] Part III: Expectation-based, Multi-focal, Saccadic (EMS-) Vision (1997-2004) pdf, www.dyna-vision.de unter: Home/Survey Website/Review 2016/References: [88c]. – [35] E. D. Dickmanns: Contributions to Visual Autonomous Driving. A Review 2015. www.dyna-vision.de unter: Home/Survey Website/Review 2016/References: [88]. – [36] Homepage Institut für Technik Autonomer Systeme: (https://www.unibw.de/tas). – [37] E. D. Dickmanns: Developing the Sense of Vision for Autonomous Road Vehicles at the UniBwM. IEEE-Computer 50 (12), Special Issue Self-driving cars, 24 (2017). – [38] E. Ruhnau: The Now – The missing link between matter and mind. In M. Bitbol, E. Ruhnau (Hrsg.): The Now, Time and Quantum Mechanics. Editions Frontières. Gif-sur-Yvette 1994. – [39] J. Kiverstein: The Conflict between Naturalism and Phenomenology. Ph. D. thesis. University of Edinburgh 2005. – [40] J. R. Searle: Wie wir die soziale Welt machen. Die Struktur der menschlichen Zivilisation. Suhrkamp. Berlin 2012. – [41] K. Popper: Logik der Forschung. Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft. Springer-Verlag. Wien 1935.

Prof. Dr.-Ing. **Ernst D. Dickmanns** (geb. 1936) studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der RWTH Aachen (1956-1961) und forschte anschließend bis 1975 bei der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL, heute: Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, DLR) in Oberpfaffenhofen auf dem Gebiet der Flugdynamik und Flugbahnoptimierung. In dieser Zeit qualifizierte er sich weiter durch jeweils einjährige Aufenthalte an der Princeton University (1964/65) und am NASA-Marshall Space Flight Center in Huntsville. 1975 wurde er auf die Ordentliche Professur für Regelungstechnik an der Universität der Bundeswehr München berufen, wo er mit dem Aufbau eines Simulators für Rechnersehen in Echtzeit die Grundlagen für die hier vorgestellten Arbeiten schuf. Für seine Pionierarbeiten auf dem Gebiet des autonomen Fahrens und die Entwicklung des maschinelles Sehen wurde er u.a. 2016 mit dem Lifetime Achievement Award des Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE-ITSS) und 2017 mit dem Technologie-Preis der Eduard-Rhein-Stiftung ausgezeichnet.

Universität der Bundeswehr München, Institut für Technik Autonomer Systeme (LRT8), Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

VIDEOS ZUM THEMA AUTONOMES FAHREN

Die Website www.dyna-vision.de informiert über Methoden, technische Details und Forschungsprojekte zum Thema Dynamisches Sehen und bietet Videoclips über Testfahrten mit Versuchsfahrzeugen, die im Text genannt sind. Sie finden sich unter: Home/Survey Website in einer Tabelle.

(1) X.1 VaMoRs: *Video 04 VaMoRsAutobahn Dingolfing 1987*
(2) X.2 VaMP: *Video 18 TwofoldAutonLaneChange Paris 1994*
(3) X.2 VaMP: *Video 19 GroundVehiclesLearnToSee UBM1986-95*
(4) X.1 VaMoRs: *Video 26 DetectDitch StopVaMoRs 2000*
(5) X.1 VaMoRs: *Video 29 2TurnoffsEMS-visionGazeContrNbb 2001*
(6) X.1 VaMoRs: *Video 30 TurnLeftSacc DirtRoad 2001*
(7) X.1 VaMoRs: *Video 33 VaMoRs/EMS On-Off-RoadMission-Perform 2003*

Nur zum persönlichen Gebrauch © Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

Kein Nachdruck, keine Veröffentlichung im Internet oder einem Intranet ohne Zustimmung des Verlags!