Selbstrepräsentation, Selbstwahrnehmung und Verhaltenssteuerung von Robotern

Alois Knoll und Thomas Christaller

1 Einführung und Motivation

Noch vor zehn bis fünfzehn Jahren wurde der Begriff des Roboters entweder mit realen *freiprogrammierbaren Handhabungsautomaten*[1] bar jeglicher Intelligenz oder aber mit fiktiven humanoiden Wesen verbunden, gegenüber deren Intelligenz die menschliche nur wie ein Durchgangsstadium der Evolution wirkte. Der Abstand zwischen beiden Welten schien unüberbrückbar. Inzwischen stellt sich die Situation jedoch wesentlich differenzierter dar:

- Die *Mechanik*[2] der Roboter ist robuster, präziser und wesentlich zuverlässiger geworden. Ganz neue Klassen von Apparaten sind entstanden: Mobile Roboter (autonome Fahrzeuge für innen und außen, autonome Flug- und Unterwasserroboter, Spezialsysteme für Serviceaufgaben wie Fassadenputzen und Kanalreinigung), Mikroroboter; darüber hinaus Teilsysteme wie anthropomorphe Arme und Mehrfingerhände – wahre Meisterwerke der Präzisionsmechanik.

- Die *Rechnertechnik* ist um Größenordnungen leistungsfähiger geworden: neben der Verhundertfachung der Rechengeschwindigkeit in den letzten 15 Jahren hat sich die Speicherkapazität vertausendfacht, und der Preis ist auf Zehntelbruchteile gefallen. Vor allem aber hat sich der Energieverbrauch dramatisch vermindert und die Abmessungen sind so geschrumpft, daß die Rechner im Gesamtsystem Roboter mitgeführt werden können und keine wesentlichen konstruktiven Rücksichten mehr erfordern. Diese Entwicklung wird weitergehen – zunächst durch Fortsetzung der Geschwindigkeitserhöhung, danach durch Parallelschalten von Verarbeitungseinheiten.[3]

- Ähnliche Fortschritte wie die Rechentechnik hat die *Methodik zur Programmierung* gemacht: mit dem Durchbruch des Paradigmas der objektorientierten Programmierung und in dessen Folge dem Übergang zur *component ware*, d.h. der systematischen Wiederverwendung getesteter Programmodule, stehen auch für fast alle denkbaren Einsatzfälle in der Robotik die grundlegenden Algorithmen in optimierter Form zur Verfügung. Damit sind Steuerungsprogramme einer Komplexität praktisch handhabbar geworden, die bis vor kurzem unvorstellbar erschien. Es können darüber hinaus nebenläufige kommunizierende Prozesse modelliert und sehr gut auf die erwähnten parallelen Verarbeitungseinheiten abgebildet werden. Schließlich gibt es inzwischen verschiedene Programmierumgebungen, die speziell auf die Anforderungen der Robotik zugeschnitten sind.

---

[1] So wird der Begriff Roboter nach deutscher Industrie-Norm definiert.

[2] Genauer: die Verbindung von Mechanik und Elektronik (Mechatronik).

[3] Nur der Vollständigkeit halber sei bemerkt, daß natürlich der Zeitpunkt absehbar ist, an dem die Summenleistung die „Rechenkapazität" des Menschenhirns überstiegen haben wird. Daraus aber ableiten zu wollen, daß damit die Intelligenzleistung des Menschen zwangsläufig erreicht werde, ist ebenso unsinning wie die Behauptung, Schafe seien intelligenter als Menschen, weil sie ein größeres Hirnvolumen besitzen. Davon abgesehen wird natürliche und künstliche Intelligenz sowieso nie vergleichbar sein, Roboter werden immer *anders* bleiben. Siehe dazu [3].

- Auf der Grundlage der vorstehenden gewaltigen Ingenieurleistungen sind in den Forschungsdisziplinen der Signalverarbeitung, Mustererkennung, *Künstlichen Intelligenz* sowie in jüngster Zeit auch der Neurobiologie und Hirnforschung, Methoden, Verfahren und Systeme entstanden, die die Übertragung perzeptiver, kognitiver und aktorischer Leistungen, wie wir sie bei einfachen Lebewesen beobachten können, auf mechanische Systeme zum Ziel haben.

Insgesamt ist zwischenzeitlich ein Stand erreicht worden, der die Beschäftigung mit Robotik nicht mehr zwangsläufig zu einer Odyssee durch diverse Disziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik, Regelungstechnik, Softwaretechnik und Algorithmik mit unzähligen unfreiwilligen Zwischenstopps macht; es kann vielmehr von einer (Mindest-)Verfügbarkeit und Stabilität der Komponenten *hardware* und *software* ausgegangen werden, und die Systeme können ingenieursgemäß synthetisierend aufgebaut werden.

Damit rückt die Frage in den Mittelpunkt des Interesses, wie die Möglichkeiten zur Implementierung einfacher bis komplexer sensorischer und kognitiver Leistungen so auf die vorhandenen Roboter-Plattformen aufgesetzt werden können, daß ein technisches System entsteht, welches bis zu einem gewissen Grad *autonom* handeln kann. Dabei ist Autonomie durchaus so zu verstehen, daß das System in Abhängigkeit von sich ständig wandelnden Umweltsituationen nicht nur – losgelöst von menschlichen Kommandos – zielgerichtet arbeitet, sondern daß ein externer Beobachter Verhaltensweisen des Systems erkennen kann, die nicht explizit bei der Konstruktion des Systems vorgegeben wurden.[4] Die Themenkreise *Selbstwahrnehmung und Selbstrepräsentation* spielen hier eine wesentliche Rolle. Die Faszination der damit verbundenen Fragestellungen rührt nicht zuletzt daher, daß sie einerseits auf einem sehr abstrakten Niveau bearbeitet werden können, daß aber die Validierung der Antwort auf operationellen Systemen erfolgen kann und daß damit Erkenntnisse der Kognitionswissenschaften direkte Konsequenzen für technische Systeme bekommen können.

Wir werden in den folgenden Abschnitten zunächst die Ausgangslage bei den autonomen Systeme als Momentaufnahme skizzieren, um damit eine Kritik des Stands der Forschungen vornehmen zu können und einige Arbeitshypothesen zu formulieren. Wir stellen dann zwei reale Systeme mobiler Roboter vor, bei denen die Fragen von *Selbstrepräsentation und innerem Zustand* eine grundlegende Rolle spielen und schließen mit einigen Fragestellungen zur weiteren Entwicklungen.

2 Ausgangslage

Um den gegenwärtigen Stand auf dem Gebiet der autonomen Systeme zu skizzieren, stellen wir einige im Labormaßstab implementierte Systeme vor, die zwischenzeitlich sogar schon in kleinen Serien produziert werden.

Noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium der *hardware* befindet sich die in vielerlei Hinsicht anspruchvollste Kategorie von Robotern: die humanoiden. Es wird mit mechatronischen Mitteln versucht, die aktorischen Teilsysteme des menschlichen Körpers in ihrer Funktion nachzubilden, bislang im wesentlichen: Arme, Hände, Hals, Beine, Füße, Augenmuskulatur. Zielsetzungen sind dabei zum einen, die Basisfertigkeiten der Extremitäten nachzubilden (Greifen, Tragen, Laufen) zum anderen aber auch schon die soziale „Teilnahme" am Leben der Menschen um den Roboter herum und die Darstellung des internen Zustands, seiner „Gefühle".[5] Abbildung 1 zeigt einen solchen „Rumpfhumanoiden", den Roboter „Cog" des MIT-AI-Lab. Er nimmt über bewegliche Kameras im Kopf und

[4] Wir vermeiden den schillernden Begriff der *Emergenz* – und führen ihn daher nur in einer Fußnote ein.

[5] Mit einigem Recht ließe sich vor dem Hintergrund des unter Punkt 3 im vorigen Abschnitt Gesagten einwenden, daß es gar nicht sicher ist, ob unter den einschränkenden Bedingungen der mechatronischen Implementierung die Leistungen, die Menschen von humanoiden Robotern erwarten (nämlich sich so zu verhalten wie Menschen), von menschenähnlichen Realisierungen erbracht werden können. Andererseits ist die menschliche Erscheinungsform sicher hilfreich, von Menschen

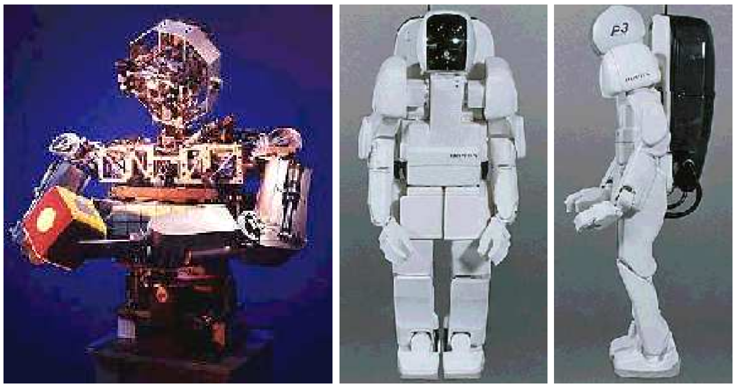

Abbildung 1: Plattformen für humanoide Roboter. *Links:* „COG", ein ab der Hüfte aufwärts im AI-Lab des MIT installierter Torso, der etwa den Abmessungen des menschlichen Körpers entspricht. Er verfügt über Arme, ein aktives Stereokamerasystem, Mikrofone und Lautsprecher. *Mitte und rechts:* Prototyp der Firma Honda. Er besitzt die Fähigkeit zum Laufen und Treppensteigen(!), nur eingeschränkte Sensorik zur Kommunikation und Umweltwahrnehmung.

Ohren mit Richtungssinn die Umwelt auf, und er kann einfache Bewegungen machen. Seine Arme befinden sich im eigenen Sichtfeld, und es findet eine einfache sensomotorische Rückkopplung statt. Ganz andere Zielsetzungen verfolgt der Honda-Roboter: hier ging es darum, eine Plattform zu bauen, die autonom laufen kann, und zwar völlig unabhängig von externer Energieeinspeisung. Die sensorische Ausstattung ist eher spartanisch, besonders bemerkenswert ist die Fähigkeit zum (noch etwas ungelenkigen) Treppensteigen. Eine interessante Ergänzung zu diesen Plattformen stellt der Gesichtsroboter dar: er kann über die Verstellung von „Gesichtsmuskeln" ganz unterschiedlichen Emotionen Ausdruck verleihen; Abbildung 2 zeigt einige Beispiele.[6] Diese Maschinen befinden sich alle in einem sehr frühen Stadium, und der Phantasie sind kaum Grenzen gesetzt, welche Aufgaben mit solchen Robotern zu lösen sein werden. Es sei aber dennoch bemerkt, daß einige der Aufgaben, die mit ihnen eines Tages im industriellen Umfeld bewältigt werden könnten, auch schon heute mit Standardkomponenten zu erledigen wären – wenn nur die notwendigen kognitiven Fähigkeiten bereits vorhanden wären (siehe dazu Abbildung 4; der Nomad-Roboter kann einen Standard-Arm an eine beliebige Stelle fahren und ihn dort Manipulationen ausführen lassen).

Die „Hauptklasse" der Plattformen, die für Forschungen im Rahmen der autonomen Systeme gegenwärtig verwendet werden, sind die mobilen Roboter mit Rädern (siehe Abbildung 3), erhebliches Interesse finden auch die „insektoiden" Laufmaschinen mit mehreren Beinen oder Spezialkonstruktionen (Abbildung 4). Es ist dies die Gruppe von Robotern, bei denen der Ansatz der „verhaltensbasierten" Steuerung zu erheblichen Erfolgen geführt hat: einfachste sensorisch gesteuerte Grundmuster (Reflexe) einzelner Aktoren führen zu bereits recht komplexem Gesamtverhalten, das sich – etwa bei den Insektoiden – verblüffend wenig vom natürlichen Vorbild unterscheidet. Es lassen sich damit Gruppen von Robotern realisieren, die nichttriviales soziales Verhaltensrepertoire aufweisen (Herdentrieb, gemeinsame Futtersuche), es können aber auch Jäger-Beute-Beziehungen nachgestellt werden.

als ihresgleichen, wenigstens „ihresähnlichen", anerkannt und behandelt zu werden. Man kann aber auch argumentieren, daß damit wenigstens die Parameter der *hardware* festliegen und es als Herausforderung zunächst ausreicht, die kognitiven Leistungen innerhalb dieses Rahmens zu optimieren.

[6]Es ist übrigens ganz erstaunlich, wie man sich als Mensch blenden lassen kann, wenn die Roboter mit einer natürlichen Lebewesen nachempfundenen äußeren Hülle überzogen werden, speziell die japanischen Robotiker wissen diesen Effekt geschickt auszunutzen.

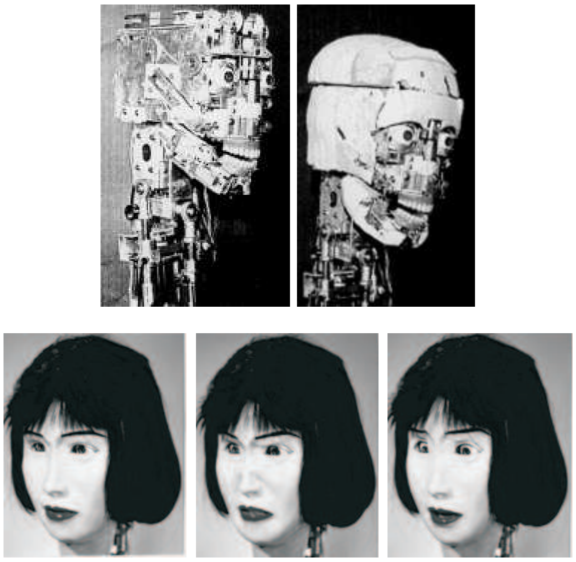

Abbildung 2: „Gesichtsroboter“. *Oben:* Ansichten der komplexen Mechanik, ohne aufgesetzes plastisch verformbares Gesicht. *Unten:* Einige Gesichtsausdrücke, die ausgehend von der Normalstellung links durch koordinierte Betätigung der verschiedenen pneumatischen Aktoren erzeugt werden können.

Derart gesteuerte Roboter unternehmen Labor- und Museumsführungen, sammeln Müll ein, räumen Schreibtische auf. Die in jüngster Zeit zu hoher Popularität gelangte Anwendung für Gruppen „beräderter“ Roboter ist das Fußballspielen, hier treten Mannschaften aus jeweils drei bis vier solcher Roboter gegeneinander an. Entscheidende Voraussetzung ist hier die genaue Kenntnis der Umwelt, der eigenen Position, der eigenen in einer bestimmten Situation zur Verfügung stehenden Mittel und erlaubten Reaktionen, die Einschätzung des nächsten Schritts des Gegners. Insgesamt also wesentlich höhere kognitive Leistungen, als etwa die reaktive Vermeidung von Kollisionen.[7]

Schließlich gibt es noch eine ganz neue Forschungsrichtung: Roboter, die neben ihren Steuerungsparametern durch Lernen auch ihre Form bzw. die Form und Stellung ihrer Sensoren verändern können. Ein Beispiel zeigt Abbildung 5: Eyebot [12]. Der Sensor dieses Roboters besteht aus einer Reihe von Einzeldetektoren. Ihre Stellung wird durch einen Lernvorgang bei der Bewegung des Roboters an einer Lichtquelle vorbei eingestellt; damit wird die Evolution des Facettenauges von Insekten nachvollzogen.

Welche Möglichkeiten haben diese Plattformen nun zu (Selbst-)Wahrnehmnung und Selbstrepräsentation?

- **Selbstwahrnehmung.** Es stehen zwei verschiedene Klassen von Sensoren zur Verfügung, interne und externe. Mit der internen Sensorik (Propriozeptorik) werden die den inneren Roboterzustand betreffenden Parameter gemessen: Ort, Batteriezustand, Energieverbrauch. Daneben gibt es aber auch Sensoren, um Neigungen der Körperachse zu messen (Inklinometer), Orientierung (Kompaß oder Gyroskop), Stellungen von Gelenken (Winkelgeber oder Potentiometer) und Umdrehungszahlen von Achsen (insbesondere bei Radfahrzeugen). Diese Sensoren sind einfache Konstruktionen und sehr zuverlässig. Externe Sensorik (taktil, optisch im sichtbaren und unsichtbaren Bereich, akustisch) erfaßt die den Roboter umgebende Welt. Diese Sensoren

[7] Siehe zu diesem Themenkreis [1, 2, 13].

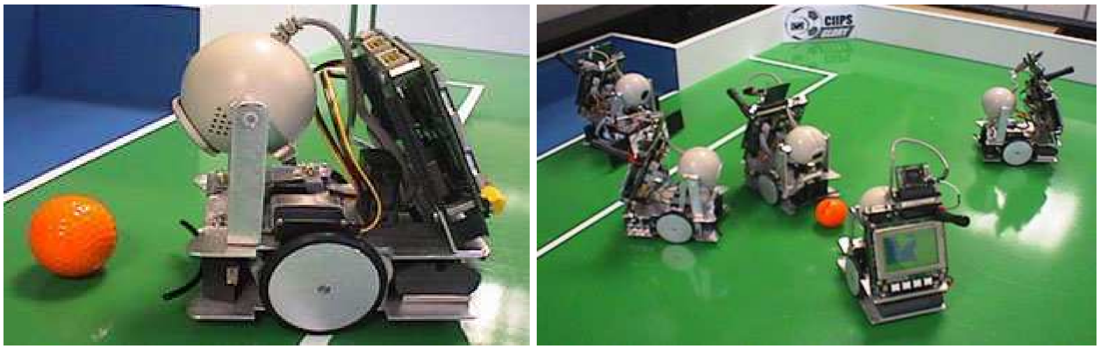

Abbildung 3: Beispiel für einen kommerziell verfügbaren mobilen Roboter zum Einsatz beim Fußballspiel „RoboCup“. *Links:* Ansicht eines Roboters mit Kamera, Steuerungsrechner, Fahrwerk und Ballfänger. *Rechts:* Mehrere dieser Roboter beim kooperativen Fußballspielen vor einem Tor.

arbeiten z.T. basierend auf kognitiven Modellen, sind im Regelfall recht aufwendig und wenig robust.

- **Selbstrepräsentation.** Alle Roboter verfügen über mindestens ein geometrisches Modell ihrer eigenen Gestalt[8] Bei den stationären Roboterarmen sind dies die kinematischen Relationen mit Gelenkwinkelbeschränkungen, den mobilen Robotern ist mindestens ihr eigener Grundriß bekannt. Für Zwecke der Simulation, Probehandeln, Emulation stehen alle rechnergängigen Modellierungen zur Repräsentation dynamischer Systeme zur Verfügung: Systeme von Regeln, Systeme von Differentialgleichungen, Semantische und Bayes-Netze, Künstliche Neuronale Netze, Fuzzy-Neuro-Methoden, . . .)

Offensichtlich bedingen sich Selbstwahrnehmung und Selbstrepräsentation gegenseitig. Ohne Wissen um den eigenen Körper kann weder entschieden werden, welche Objekte in der Umwelt Teile des Roboters sind, noch welche Bewegungen und Umweltveränderungen durch ihn verursacht wurden. Umgekehrt kann eine Selbstrepräsentation nur dann mit dem tatsächlichen Zustand des Roboters abgeglichen werden, wenn eine Selbstwahrnehmnung stattfindet.

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß mindestens im Labormaßstab bereits leistungsfähige und interessante Plattformen für die Durchführung von Experimenten zu kognitiver Steuerung zur Verfügung stehen. In einem zwar noch frühen, durchaus aber einsatzfähigen Entwicklungsstadium befindet sich die Sensorik zur Erfassung der Umwelt und des inneren Roboterzustands. Woran es fehlt, sind leistungsfähige Repräsentationen und Steuerungsverfahren, um diesen Plattformen wirkliche Autonomie gemäß der im vorigen Abschnitt angeführten Punkte zu verleihen. Wir präzisieren unsere Kritik im nächsten Abschnitt und untermauern diese durch einige Arbeitshypothesen für weitere Forschungsarbeiten.

[8]Bei ganz einfachen Insektoiden ist das gelegentlich nicht der Fall, spätenstens bei der Kollision eines Beins mit einem Gegenstand werden jedoch Beschränkungen wahrgenommmen – man kann also auch hier von einem impliziten Selbstmodell sprechen.

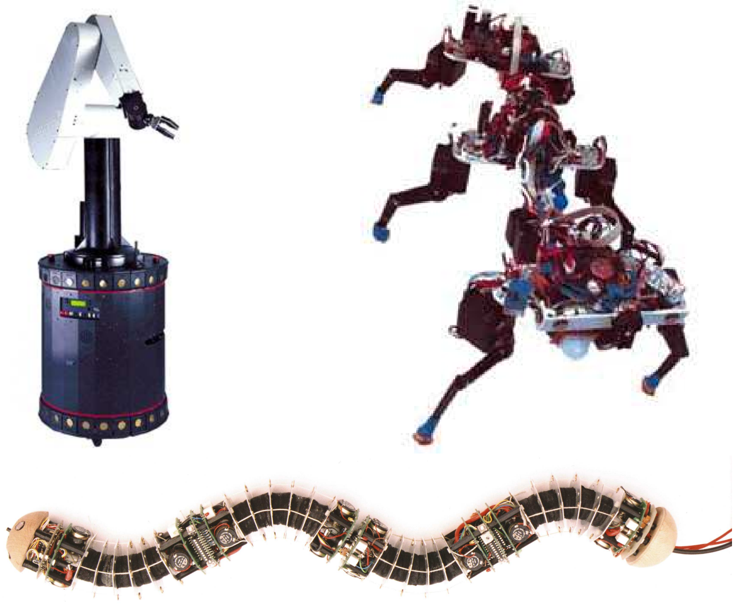

Abbildung 4: Spezialkonstruktionen. *Links oben:* Kommerzielle mobile Plattform der Firma Nomad Technologies mit aufgesetztem Industrieroboter für Monategaufgaben. *Rechts oben:* Sechsbeinige „insektoide“ Laufmaschine. *Unten:* Schlangenförmiger Roboter der GMD zur Bewegung in schwierigen Umgebungen.

3 Kritik und Problembereiche

Nach unserem Eindruck sind die bisherigen Erfolge der „kognitiven Robotik“[9] deshalb eher bescheiden, weil die bereits im vorigen Abschnitt erwähnte Frage nach dem (der Morphologie des Roboters angepaßte) Aufbau eines Erkenntnisapparats bislang keine wesentliche Beachtung geschenkt wurde. Es ist bislang ungeklärt, welche Kategorien vorgegeben werden, wie die Sensorik eingesetzt werden kann, wie sich die kognitiven Leistungen im Einklang mit der Ausprägung der aktorischen Verhaltensmuster entwickeln.[10] Auf der Seite der Aktorik ist noch kaum untersucht, wie einzelne nichttriviale Verhaltensmuster interagieren bzw. zielführend mit Blick auf die Aufgabenstellung so zu koordinieren sind, daß zusätzliche Randbedingungen sicher eingehalten werden (Energieverbrauchsminimierung,

[9]Eine klare Definition für diesen jungen Begriff liegt bislang nicht vor. Während [11] das Gebiet als die Entwicklung solcher Agenten definiert, die in nur teilweise bekannten, dynamisch veränderlichen Umwelten wahrnehmen und handeln können, neigen wir dazu, grundsätzlicher zu fragen, wie Systeme aufgebaut sein müssen, die die kognitiven Leistungen des Menschen erreichen (nicht zwangsläufig in jeder Stufe nachbilden!) und auf lange Sicht auch mit dem Menschen kommunizieren können (s.a. [4].

[10]Diese Fragen sind dem Wesen nach komplementär zu der Frage nach der möglichen Entwicklung von Leben auf anderen Planenten: unterstellt man bei diesen hypothetischen Untersuchungen gemeinhin das Vorhandensein organischer Grundsubstanz und fragt sich, welche höheren Lebensformen diese unter den dortigen Umweltbedingungen hervorbringt, geht es bei uns um die Frage, wie sich die – bislang – anorganische Substanz der Roboter möglichst gut an die Bedingungen der Erde anpassen kann – deren wesentlicher Teil die Anwesenheit des Menschen ist. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind diese Umgebungen meistens stark von menschlicher Hand beeinflußt, man spricht von teilstrukturierten Umgebungen. Darunter werden Umgebungen verstanden, die nur im geringen Umfang oder gar nicht speziell auf Roboter eingestellt bzw. verändert wurden, aber trotzdem über Regularitäten verfügen, die durch menschlichen Einfluss zustandekommen. Eine sehr beliebte Umgebung dieser Art stellen die Räumlichkeiten in Forschungslabors dar, aber es können auch Abwasserkanäle sein oder beliebige Gebäude mit Publikumsverkehr wie z.B. eine Flughafenabfertigungshalle. Noch höhere Ansprüche werden an mobile Roboter in unstrukturierten Umgebungen gestellt wie z.B. unter Wasser oder im Freigelände.

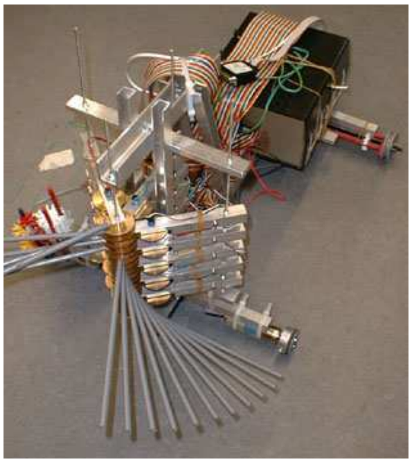

Abbildung 5: „Eyebot“. Die elektromotorisch angetriebenen Stangen enthalten jeweils einen optischen Sensor. Einer der ersten Roboter, die das Prinzip der Ko-Entwicklung von Kognition und Verkörperung nachzuvollziehen versuchen.

Wegeoptimierung, . . .).[11]

Die Lösung dieser Probleme ist keineswegs nur von theoretischem Wert, sondern wird (sollte) unmittelbaren Einfluß auf das praktische Design von Robotern haben. Zunächst betrifft dies die Behandlung von Wissen durch den Roboter bzw. seinen Konstrukteur:

- Welches Wissen wird dem Roboter initial „eingepflanzt“?
- Welches Wissen/welche Verhaltensmuster lernt er aufgrund sensorischen Inputs, vor allem aber – *wie*?
- Was weiß der Roboter über sich (Form, Zustand, Verhalten, Wünsche, Intentionen, Annahmen, Fähigkeiten) und seine Umgebung, was muß (nur) der Designer wissen?
- Welche Strategien hat er zum Erkunden der Umwelt (der eigenen Interaktion mit ihr)?
- Wie kann Wissen durch aktives Handeln konstruiert werden?
- Welche Information ist aus internem Wissen ableitbar, für welche wird (zusätzlicher) sensorischer Input benötigt, und wie wird dieser dann bewertet?

Angesichts dieser grundlegend wichtigen Fragen ist es mehr als erstaunlich, daß eine Systematik zu ihrer Beantwortung in Abhängigkeit von der Konstruktionsaufgabe bislang nicht vorliegt. Es besteht nur ein Schatz von Erfahrungswissen, der aber natürlich nur eine vage Grundlage für den ingenieurmäßigen Entwurf autonomer intelligenter Systeme darstellen kann. Noch weitgehend ungeklärt, weil bislang kaum als Problem oder Forschungsprogramm formuliert, sind die im folgenden angegebenen Punkte, die wir ohne Anspruch auf Vollständigkeit formulieren:

[11] Darüber hinaus ist völlig ungeklärt, wie man von der Konstruktion von Systemen mit einem Verhaltensrepertorie von 10 . . . 20 Grundmustern zu solchen mit einem Repertoire von vielleicht 1000 Mustern kommt.

1. **Technische Effizienz:** Trotz der immensen Rechenleistung, von der inzwischen im Prinzip Gebrauch gemacht werden kann, gilt natürlich speziell hier das Prinzip der Ökonomie. Daher stellt sich die Frage: welches Maß an perzeptiven und kognitiven Fähigkeiten, an *Intelligenz* wird überhaupt benötigt, damit das System seine Rolle mit den gewünschten Eigenschaften (Autonomie, Adaptivität, Flexibilität, Kommunikationsfähigkeit, . . .) einnehmen kann?[12] Und weiter: welche Verfahren bzw. Verfahrensklassen aus dem Werkzeugkasten des Informatikers eignen sich am besten, um diese Eigenschaften mit wiederum minimalem Aufwand zu realisieren?

2. **Kompetenz zur Aufgabenlösung:** *Wie* paßt sich ein autonomes System mit seinen kognitiven Fähigkeiten an eine neue Aufgabenstellung an? Natürlich kann der Roboter nur in dem Maß variable Aufgabenstellungen bearbeiten, wie es seine mechanische Ausstattung erlaubt.[13] Allerdings werden hier, wie eingangs erwähnt, durch immer bessere Mechaniken die Grenzen kontinuierlich erweitert. Vor der Anpassung der Mechanik und ggf. des Kognitionsapparats an die Aufgabe steht natürlich als Frage: Wie erfaßt der Roboter überhaupt die Struktur der Aufgabe und das Ziel? Offensichtlich gehört hier neben die Problematik der Flexibilität auch die der Erfassung des Umweltkontexts, denn die Aufgaben, die ein Roboter zu erledigen hat, haben immer einen Bezug zur Umwelt, in der er handelt.

3. **Aufbau und Nutzung eines Erkenntnisapparats:** Roboter mit ihren Aktoren und Sensoren werden vom Menschen gebaut und programmiert. Dabei wird die menschliche Sichtweise auf den Roboter übertragen – der Konstrukteur kann jederzeit die Vorgänge im Roboterinnern einsehen und verstehen; es erübrigen sich komplizierte Transformationen zwischen innerer „Roboterwelt“ und der Welt im Kopf des Menschen. Beispiele sind die Vorgabe von metrischen Karten zur Navigation, fest vorgegebene Greifsteuerungen und Ablaufvisualisierung, etc. Es zeigt sich jedoch immer deutlicher, daß diese „Anthropomorphisierung des Roboterlebensraums“ dazu führt, daß vom Roboter nur vorgegebene Kategorien durch Lernvorgänge mit Inhalten gefüllt werden können [19, 17]. Die Sensormuster des Roboters und die Kategorien des Menschen passen nicht notwendigerweise zusammen: nur „vorgedachte“ Ereignisse/Situationen werden erkannt und können behandelt werden. Anders ausgedrückt: Selbst Systemen, denen Finden von Regularitäten in Sensormustern erlaubt wird, wird die Ableitung *Sensormuster* $\rightarrow$ *interne Repräsentation* $\rightarrow$ *anzustoßendes Verhaltensmuster* vom Designer vorgegeben. Will man diese Beschränkung überwinden, stellt sich die Frage nach dem nötigen technischen Rahmenwerk, das es dem Roboter erlaubt, nicht nur eigene Kategorien zu bilden, sondern sie auch nach eigenen Regeln zu füllen. Damit verbunden sind die noch völlig offenen Fragen nach der Steuerung des Erkenntnisapparats und seiner eigenständigen Weiterentwicklung; nach dem Einfluß, den

[12] Dazu zwei Beispiele: (a) in der Anfangszeit der sensorbasierten Robotik war man gemeinhin überzeugt, daß zur sicheren Handhabung von Teilen dreidimensional arbeitende Sichtsysteme unabdingbar notwendig seien – inzwischen weiß man, daß sich die meisten Handhabungsaufgaben bei Schaffung geeigneter Randbedingungen auch mit 2D-Sichtsystemen lösen lassen, obwohl der Mensch dieselben Aufgaben nur mit zwei Augen und 3D-Sicht bearbeiten kann. (b) künstliche Laufmaschinen und auch die mobilen Roboter mit Rädern weisen ein verblüffend „natürliches“ Verhalten auf, man ist unmittelbar davon überzeugt, sie seien intelligente, belebte Wesen – dazu genügen aber bereits simple Bauteile, etwa aus Spielzeugkästen, und vor allem: einfachste, z.B. elementare neuronale Algorithmen.

[13] Es ist keineswegs sicher, es ist gar ausgesprochen unwahrscheinlich, daß Roboter auf längere Sicht nur aus den „Substraten“ Stahl und Silizium bestehen werden. Erste Forschungsarbeiten, organische Materialien sowohl für logische Verarbeitungseinheiten als auch für „künstliche Organe“ einzusetzen, wurden schon vor längerer Zeit unternommen. Wichtig hierbei ist eigentlich nur die Frage, wie eine sich selbst kontrollierende und beobachtende „semantische Maschine“ ([8], Kap. 5) mit kognitiven Eigenschaften aus solcher Materie entstehen kann, die vorderhand über keine kognitiven Eigenschaften verfügt.

die eigene Körperlichkeit (Morphologie) des Roboters auf die Entwicklung dieses Apparats hat; welche Freiheitsgrade die Sensorik haben muß, um alle möglicherweise interessanten Umweltdetails erkennen zu können; wie Sensorinformationen aus verschiedenen Quellen zu einem sinnvollen Ganzen zu integrieren sind, wie Situationen klassifiziert werden können und darauf Handlungsstrategien aufzubauen sind und schließlich, wie diese Steuerungs- und Lernvorgänge auch in unbekannten Umgebungen robust ablaufen können. Von besonderem Interesse wäre natürlich auch, wie sich der von einem Roboter erworbene Erkenntnisapparat auf die nächste Maschinengeneration übertragen oder *vererben* ließe; bislang fehlt diese „genotypische Komponente" bei Robotern vollständig.

4. **Nutzung des Aktionsapparats, sensomotorische Kopplung:** Im Grunde stellen sich hier ganz ähnliche Probleme wie beim Erkenntnisapparat, allerdings sind die Randbedingungen hier wesentlich strikter, denn der aktorische Apparat läßt sich bei den heutigen Konstruktionen nicht „entwickeln", er ist fest vorgegeben. Frei disponibel sind allerdings die *Verhaltensmuster*. Damit stellen sich die Fragen nach der Kopplung zwischen Sensorik und Aktorik; nach der Erzeugung von optimalen Aktionssequenzen (z.B. mit minimalem Energieaufwand); nach der Einschätzung der eigenen Bewegungsdynamik und derjenigen anderer Subjekte in der Umwelt; nach der Antizipation der Handlung potentieller Partner; nach der Emulation der eigenen Verhaltensweisen für die Bewegungsplanung und Kollisionsvermeidung (Probehandeln – zweckmäßigerweise mit Hilfe derselben *circuitry*, die auch zur tatsächlichen Steuerung der Bewegungsabläufe benutzt wird); nach der selbstständigen Entwicklung *strukturell neuer*, d.h. nicht nur anders parametrisierter Aktionsmuster. Schließlich ist inzwischen auch klar, daß rein behavioristische Ansätze nicht in Einklang zu bringen sind mit „Aufgabenorientierung", d.h. mit der flexiblen Orientierung auf höhere Aufgaben als es die Basisfertigkeiten (wie Kollisionsvermeidung, „Futtersuche") darstellen.

5. **Lernen und Anpassung:** Es ist offensichtlich, daß ein mit noch so leistungsfähigen Inferenz- und Lernmechanismen ausgestatteter Roboter nach seiner Inbetriebnahme nicht einfach „loslernen" kann. Er muß vielmehr mit grundsätzlichen (von einer vorhergehenden Generation ererbten?) Lernzielen und -verhalten ausgerüstet worden sein, mithin also gewisse „Instinkte" eingepflanzt bekommen, er sollte sogar ein gewisses „Lerninteresse" entwickeln. Damit stellen sich, wie bei Lebewesen, die Fragen nach der Plastizität erlernter Muster; der Überschreibbarkeit von Instinkten; der Kompensation von Informationsausfällen durch Lernvorgänge oder durch Rückgriff auf interne Modelle; der Anpassung an lang andauernde Veränderungen der Umwelt (oder des eigenen Körpers) durch Veränderung von Parametern mit großen Zeitkonstanten. Idealerweise ist der Roboter in der Lage, aus der gemeinsamen Erfahrung mit dem ihn instruierenden Menschen zu lernen und damit über immer längere Zeitbereiche autonom zu handeln.

6. **Interaktion mit dem Menschen:** Auch ein Roboter, der über ein Höchstmaß an Autonomie verfügt und sich seine eigenen Erkenntnis- und Handlungsapparate baut, soll letzten Endes dem Menschen dienen. Er muß deshalb mit den ihn umgebenden und ihn instruierenden Menschen kommunizieren können. Diese Kommunikation sollte in Zukunft multimodal erfolgen können (neben der initialen „Programmierung" durch Sprache, Gesten, Vormachen), vor allem aber sollte der Roboter auch seine Vorstellungswelt in die des Mesnchen transformieren können. Dazu muß ein „Gleichklang" der verwendeten *Bedeutungen und Begriffe* erreicht werden, der Roboter muß ein Verständnis für menschliches Handeln und menschliche Verhaltensmuster entwickeln. Es muß ein reibungsloses, intuitiv vom Menschen steuerbares Ineinandergreifen von Anweisungsfolgen, Aktionssequenzen und Umweltwahrnehmung erreicht werden. Dies erfordert auf

Seiten des Roboters ein ausgesprochen komplexes Zusammenspiel sensorischer, kognitiver und manipulativer Fähigkeiten. Der Mensch erwartet zum einen, daß der Roboter die gewünschten Operationen schritthaltend mit den Anweisungen ausführt, daß also der Einsatz von Ressourcen (Sensoren, Aktoren, Prozessoren) mit Blick auf rechtzeitige (Ergebnis-)Verfügbarkeit geplant wird. Zum anderen sollen auch längere Sequenzen, die der Mensch nach seiner eigenen Erfahrung als Einheit empfindet, vollständig autonom ablaufen können (ohne ständige Rückfragen oder die Erwartung weiterer Instruktionen).

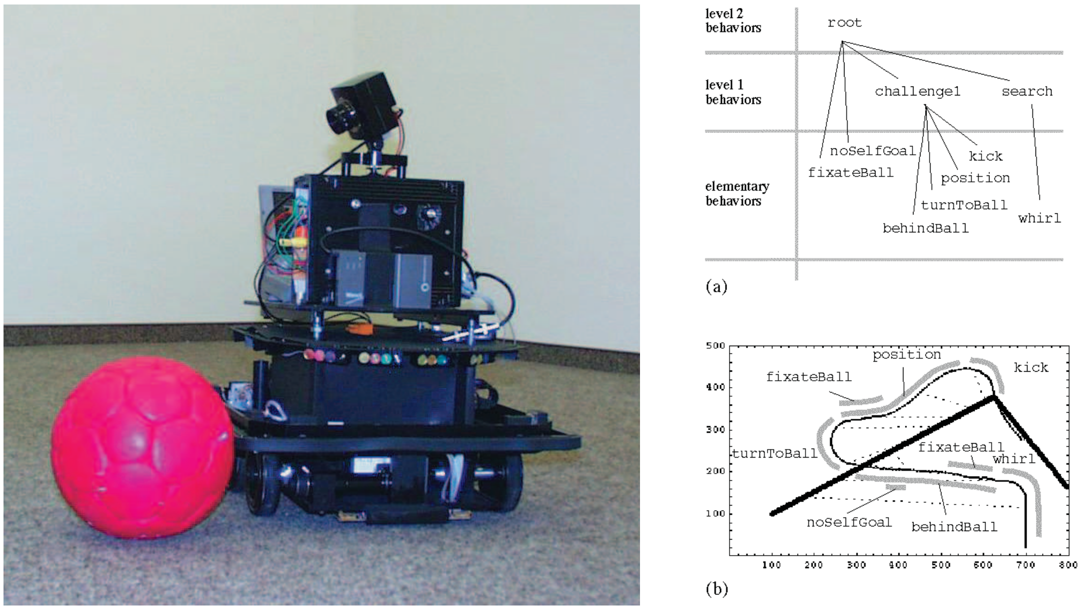

Abbildung 6: *Links:* Der GMD-Roboter zur Teilnahme am Fußball-Wettbewerb RoboCup. *Rechts:* (a) hierarchisches Steuerungsmodell mit Verhaltensmustern auf unterschiedlichen Zeitskalen/Abtraktionsstufen (b) Trajektorie des Roboters auf dem Spielfeld mit annotierten jeweils aktivierten *behaviors*.

Wir halten fest, daß bislang eine adäquate Nutzung von Selbstrepräsentationen nicht stattfindet. Ebensowenig werden die Möglichkeiten zur Selbstwahrnehmung ausgenutzt, sei es zur Laufzeit, sei es während vorgeschalteter Lernphasen. Nachdem dies jedoch zwei wesentliche Konstituenten einer kognitiv gründenden Verhaltenssteuerung sind, die auch längere sensormotorisch gesteuerte Handlungssequenzen planen kann, ist es nicht überraschend, daß das Verhalten heutiger Roboter noch weit von wirklicher Intelligenz entfernt ist. *Ebenso dürfte klargeworden sein, daß das* maschinelle Lernen *im bisherigen hauptsächlich verstandenen Sinne, nämlich im Lernen von Parametern innerhalb vorgegebener Strukturen, nicht dazu ausreichen wird, Roboter in die Lage zu versetzen, neue kognitive Funktionen bzw. neue Aktionsmuster selbständig zu bilden*. Es müssen vielmehr Lernprozesse stattfinden, die solche Funktionen erzeugen, dieses Problem ist auch für biologische Systeme bislang nicht untersucht (siehe dazu die Ausführungen in [7] zur Ausbildung einer kognitiven Architektur durch Lernprozesse).

4 Arbeitshypothesen und zwei Beispiele für Lösungsansätze

Wir gehen unabhängig von den z.T. divergierenden Positionen der Erkenntnistheorie bzw. des Konstruktivismus (siehe dazu [18, 14]) davon aus, daß unsere Roboter handelnde Agenten sind, die in

Abbildung 7: *Links:* Ansicht eines Mikroroboters mit omnidirektionalem Sichtsystem basierend auf einem konischen Spiegel; Gesamthöhe etwa $15cm$. *Rechts:* Ein typisches Bild, das von der Kamera geliefert wird. Aufgenommen wurde eine Wand mit mehreren Bildern.

ihrer Welt Wissen über die Außenwelt konstruieren müssen, um zu überleben und dabei Annahmen machen, Wünsche formulieren, Ziele verfolgen. Wenn sie mit den entsprechenden Kommunikationsmöglichkeiten ausgerüstet werden, können sie zudem Erfahrungen austauschen, Wissen übermitteln oder sich gegenseitig bei der Bewältigung einer konkreten Aufgabe unterstützen.[14] Der Aufbau einer Selbstrepräsentation durch Umwelt-, Fremd- und vor allem Selbstwahrnehmung stellt eine der Grundlagen für den Aufbau höherer kognitiver Systeme dar. Wir formulieren dazu folgende Thesen:

1. **Roboter benötigen eine Selbstwahrnehmung.**
   Ein Roboter benötigt Propriozeptorik, d.h. Sensoren, die Auskunft geben über seine Einbettung in die physikalische Welt bzw. über die eigenen Ressourcen an Bord. Die Sensorwerte dienen ferner dazu, selbstzerstörerische Handlungen zu vermeiden. Für einfache Roboter bzw. für die unteren motorischen Schichten komplexerer Roboter reicht es aus, wenn die internen Sensorwerte direkt in Algorithmen eingehen, die das nächste Motorsignal generieren. Im Unterschied zu dem Konzept des sensomotorischen Homunkulus gibt es in diesem Fall kein Selbstmodell, das den Roboter intern repräsentiert und auf das er Zugriff hat. Auf jeden Fall ist ein Roboter ohne Selbstwahrnehmung nicht arbeitsfähig.

2. **Die Umgebung ist für alle dieselbe.**
   Jedes System nimmt nur den Realitätsausschnitt wahr, der über die jeweiligen Sensorsysteme zugänglich ist.[15] In aller Regel überschneiden sich die Merkwelten von Menschen und Robotern nur wenig.[16] Das schafft ein Problem für den Robotiker: dieser muß ja eigentlich mit den Sinnen des Roboters die Welt wahrnehmen, um entscheiden zu können, ob jener das „Richtige“ wahrnimmt. Dies wird in aller Regel dadurch erreicht, daß die Sensorwerte auf *geeignete Weise*

[14] Man vergleiche dazu die frühen Ansätze der *verteilten künstlichen Intelligenz* [10] und ihre seitherige Entwicklung, speziell die Aktivitäten bezüglich der Multi-Agenten-Systeme. Deren Eigenschaften prädestinieren sie nicht nur für die Modellierung sozialer Gemeinschaften und der darin ablaufenden Kommunikationen, sondern interessanterweise auch für die Modellierung der einzelnen kognitiven Module im Innern eines Agenten.

[15] Dies entspricht der *Merkwelt* von Uexküll.

[16] Man könnte menschliches Sehen und maschinelle Bildverarbeitung als dasselbe betrachten, aber bislang „sehen“ Menschen und Roboter verschieden.

visualisiert werden: Sie müssen für uns als Menschen interpretierbar und unter uns kommunizierbar sein, wenn wir verstehen wollen, welche „Gedanken“ sich der Roboter macht – richtig verstanden bedeutet dies allerdings aufwendige Transformationen zwischen der inneren Welt des Roboters und der inneren Welt des Menschen.

3. **Die Einsicht des Robotikers steht der Einsicht des Roboters entgegen.**
   Die Art der (Selbst-)Modelle eines Roboters werden bislang wesentlich dadurch bestimmt, daß wir als Konstrukteure Einsicht in die Funktionsweise des Roboters erhalten wollen. Insofern besteht bislang die bereits mehrfach erwähnte Neigung, seitens des Konstrukteurs Modellvorgaben zu machen, die diese Aufgabe erleichtern und nicht notwendigerweise die – natürlich wichtigere – Aufgabe des Roboters, sich angemessen in seiner Umgebung zurechtzufinden. Beispiel Navigation: die kognitive Karte des Roboters, nach der er navigieren soll, reflektiert unsere gezeichneten Karten (und nicht unsere mentalen Karten). Hier wird ein radikaler Schnitt zugunsten von mehr Eigenständigkeit des Roboters erforderlich sein – was bei geeigneter Transformation gemäß der vorigen Hypothese aber keine Kommunikationsschranken bedeuten muß. Man denke an die reichhaltigen Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Mensch und Hund und bedenke, daß es kein Problem bereitet, den Roboter mit einem Sprachorgan auszurüsten.

4. **Wenn der Roboter so könnte, wie er wollte, dann hat sein Konstrukteur zunächst ein Problem.**
   Würden wir auf die Anforderung des Gedankenlesens bei Robotern verzichten, so könnte es sein, daß sich in ihnen ganz andere Modelle entwickeln – etwa solche, in denen die sensomotorische Korrelation in der Interaktion mit der Umwelt viel „roboterspezifischer“ zum Ausdruck kommt. Die technischen Voraussetzungen in Form der bekannten Ansätzen aus der Theorie der dynamischen Systeme sind durchaus vorhanden. Die wesentliche Konsequenz wäre allerdings, daß Roboter schwieriger analysiert werden können. Als Robotiker stünde man vor demselben Problem wie ein Verhaltensbiologe: Welches Erklärungsmodell können wir formulieren, um die von uns beobachteten bzw. beobachtbaren Korrelationen zwischen sichtbarem Verhalten, Umwelt und Annahmen über den internen Zustand formulieren zu können? Insofern könnte es also durchaus sein, daß der von uns konstruierte Roboter, der eine gewisse Lernphase hinter sich gebracht hätte, selber zum Objekt der Erforschung seines sichtbaren Verhaltens würde.

5. **Eine Selbstrepräsentation ist wichtig, um selbständig lernen zu können.**
   Alle Lernverfahren für Artefakte gehen davon aus, daß der „Antrieb“ und das „Ziel“ des Lernens von außen vorgegeben werden. Doch bei einer Selbstrepräsentation im obigen Sinne könnte man auf überwachtes oder „Reinforcement“-Lernen verzichten bzw. um eine für biologische Systeme wichtige Art des Lernens ergänzen: Lernen durch Entdeckungslust. Einsicht in sich selbst kann zur Selbstmotivation und Selbstüberwachung von Lernen führen und damit den Lernerfolg wesentlich vergrößern bzw. das Lerntempo beschleunigen.

6. **Wenn der Robotiker Einsicht nehmen kann – dann auch der Roboter in sich selbst.**
   Bei verschiedenen Ansätzen aus der Theorie der dynamischen Systeme werden Visualisierungen verwendet, um Regularitäten entdecken zu können. Über geeignete Benutzerschnittstellen können dann Parameter gezielt und kontrolliert verändert werden, um verschiedene Dynamiken zu erzeugen. Dies entspricht der Analyse eines Phasenraumes eines dynamischen Systems. Geeignete Schnitte enthalten Regularitäten, die mit dem von außen sichtbaren Verhalten und Regularitäten in der Umwelt korrespondieren. Die Suche nach Regularitäten ließe sich sehr wohl algorithmisieren und es stellt sich dann folgende Frage: Was wäre, wenn wir dem Roboter

diese Analysekomponente des Phasenraumes der Dynamik seines Kontrollprogrammes selbst zugänglich machen würden? Zum einen könnten wir zuerst auf die Visualisierung des Phasenraumes verzichten, da der Roboter diese Selbstbeobachtung sicherlich nicht vermöge seiner Kamera leisten sollte. Doch alles andere könnte identisch verlaufen. Es könnte dann zu einer qualitativen Selbsteinschätzung der Berechnungen des Kontrollprogrammes kommen, ohne auf die konkreten Berechnungszustände eingehen zu müssen. Vor allem aber: der Roboter könnte beginnen, zur Maximierung des Nutzens dieser Regularitäten eigene kognitive Funktionen zu konstruieren, die Sensormuster auf innere Zustände abbilden. Schließlich könnte er beginnen, über Repräsentationen dieser inneren Zustände zu räsonieren – ein erster Schritt zu einem Bewußtsein, wie es H. Flohr in seinem Beitrag in diesem Band definiert?

Es seien nunmehr noch in aller Kürze zwei Beispiele für funktionsfähige Robotersysteme betrachtet, die von den Autoren entwickelt wurden: der GMD-Fußballroboter (Abbildung 6) und der „Puppenstuben-Navigator“ nach Abbildung 7. Der erstgenannte implementiert ein neuartiges Schichtenmodell zur Beschreibung von sensorbasiertem Verhalten auf unterschiedlichen Zeit- und Abstraktionsstufen, der zweite benutzt zur Navigation in einem kleinen Puppenstuben-Zimmer einen spezifischen Sichtsensor, mit dem der Mensch aus seiner Erfahrung nicht vertraut ist, weil es ihn in dieser Form in der Natur nicht gibt.

Der GMD-Fußballroboter. Die Aufgabe dieses mobilen Roboters besteht wie die seines menschlichen „Vorbilds“ darin, den Ball gegen den Widerstand gegnerischer Roboter in das Tor zu schießen. Der Roboter verfügt über eine Vielzahl von Sensoren zur Selbstwahrnehmung (Radsensoren, Ladezustand, Kollisionskontakte) und zur Umweltwahrnehmung (eine bewegliche Kamera, Infrarotsensoren). Seine Motoren verleihen ihm eine hohe Beschleunigung und Endgeschwindigkeit (maximal $2,5m/s$).
Wie beim menschlichen Fußballspiel sind auch für maschinelle Spieler neben den „Basisfertigkeiten“ (Schießen, Ball vor sich herspielen, ...), die noch sehr nahe an der „reflexhaften Muskelebene“ ablaufen, abstraktere Fertigkeiten erforderlich, die den gesamten „Überblick“ über das Spielfeld, die Aufstellung des Gegners und der eigenen Mannschaft, etc. notwendig machen. Die Steuerungsarchitektur muß also eine große Anzahl von Basis-Verhaltensweisen, verschiedene Repräsentationen von Sensormeßwerten (Umweltzuständen) und unterschiedlich parametrisierter Regler für die einzelnen Aktoren so kombinieren, daß ein flüssiges, zielgerichtetes Summenverhalten erzielt wird. Darüber hinaus sollte für das Spiel im Team die entsprechenden Informationen der anderen Team-Mitglieder zur Entscheidung über das Eigenverhaltens einbezogen werden können. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, wurde eine Architektur entwickelt, die aus Schichten von Verhaltensmustern (*behaviours*) besteht (siehe Abbildung 6 rechts oben). Die unterste Schicht enthält geeignet parametrisierte elementare Verhalten (Ball anfahren, schießen, Hindernisse vermeiden, ...), die direkt in die motorische Steuerung münden. Die Verhalten in den darüberliegenden Schichten stellen komplexere Abläufe dar (Paß spielen,), die durch das kontrollierte Mischen bzw. sequentielle Ausführen der Verhalten auf den unteren Stufen und durch gezielte Beeinflussung von deren Parameter erzeugt werden. In Abbildung 6 (rechts unten) wird gezeigt, wie ein rollender Ball durch Aktivierung geeigneter Verhaltensweisen vom Roboter so abgelenkt wird, daß er ins Tor geschossen werden kann. Neben dem Abstraktionsgrad unterscheiden sich die Schichten in der zeitlichen Granularität: in der untersten Schicht werden (Reaktions-)zeiten in der Gößenordnung von einigen Millisekunden gefordert, bereits in der nächsthöheren Schicht hat man es mit Bruchteilen einer Sekunde zu tun. Längerfristige Planungen können durchaus mehrere Sekunden Bestand haben und sind dementsprechend auf einem noch höheren Niveau angesiedelt. Neben der eigentlichen Steuerungsdynamik eines Verhaltens

in Schicht n gibt es also eine zweite Dynamik in der jeweils darüberliegenden Schicht $n + 1$ (die *Aktivierungsdynamik* für n), die für die Kontrolle der Steuerungsdynamik von n verantwortlich ist und deren Zeitkonstanten wesentlich größer sind.
Was erhoffen wir von diesem Ansatz?

- *Organisation.* Um auf die unterschiedlichsten Situationen mit einem reichhaltigen Satz von Verhaltensweisen reagieren zu können, müssen die Grundverhalten effizient miteinander gekoppelt werden. Wir halten es ferner für entscheidend wichtig, die Verhaltensmuster gezielt so beeinflussen und mischen zu können, daß sie variablen Zwecken im Sinne von übergeordneten Zielen dienen können – das ist ein entscheidender Fortschritt gegenüber bisherigen Ansätzen, Robotersteuerung *behaviour-based* zu implementieren. Dazu existiert auch bereits eine umfangreiche Test- und Entwicklungsumgebung [16].

- *Repräsentationen.* Der Roboter verfügt über eine Vielzahl von Sensoren, die jeweils einen eigenen Ausschnitt zur Weltsicht beitragen (können) und damit die Grundlage für situationsbezogenes Verhalten schaffen. Ihre Beiträge sind verrauscht und unvollständig, es müssen deshalb operationalisierbare Repräsentationen für die Darstellung der Außenwelt konstruiert werden, die es ermöglichen, die von jedem Sensor gelieferte Teilinformation in der Gesamtsicht zu bewerten zu integrieren.

Der Puppenstuben-Navigator. Die Aufgabe dieses Miniroboters ist die zielgerichtete Navigation innerhalb des Habitats Puppenstube (ein „Zimmer" mit einer Tür und verschiedenen Bilder an einer ansonsten unstrukturierten Wand, die Abmessungen sind ca. $40 \times 40 \times 30cm^3$). Als Orientierungspunkte stehen ihm lediglich die Bilder an der Wand zur Verfügung. Entwicklungsziel ist, daß der Sensor so eingesetzt werden kann, daß der Roboter mit minimalem Rechenaufwand unmittelbar, nachdem er an einen beliebigen Punkt in dem Raum gestellt wurde, einerseits seine Position (Raumkoordinaten und Orientierung) bestimmen kann und andererseits „weiß", in welcher „Situation" er sich befindet, um spezifische Verhaltensmuster für diese Situation aktivieren zu können (Türdurchfahrt, Kollisionsvermeidung mit der Wand, Fahrt in Richtung eines Bildes, . . .). Der Sichtsensor ist ein völlig „an-anthropomorpher": ein konischer Spiegel erfaßt mit erheblicher Verzerrung ein Rundumfeld, das von einer unter der Spiegelspitze liegenden und in Richtung des Spiegels blickenden Kamera aufgenommen wird. Das Prinzip gleicht dem der an der Raumdecke angebrachten Halbkugeln in Warenhäusern, die es dem Verkaufspersonal ermöglichen, von einer Stelle des Raumes aus sämtliche Personen zu sehen, die sich im Raum aufhalten.
Die Steuerungsarchitektur des Systems besteht gegenwärtig aus einem Merkmalsextraktor (noch) fester Struktur, der die vergleichsweise riesigen Kamerabilder so komprimiert, daß ein lernfähiges System mit einer geringen Zahl von Eingangsgrößen trainiert werden kann. Dieses System besteht nun seinerseits aus einem Situationsklassifikator, der verschiedene Steuerungsalgorithmen aktiviert, die in einer bestimmten Situation die Kontrolle übernehmen können. Der Lernprozeß läuft so ab, daß zunächst verschiedene Pfade in der Puppenstube kontrolliert abgefahren werden und dabei eine Situationseinteilung durch den Menschen vorgenommen werden kann. Nach dem Training weiß der Roboter, welches Bild ungefähr mit welchem Ort korreliert ist und kann durch eine geschickte Interpolation zwischen den beim Training genau erfaßten Bildern die exakte Position an jedem Punkt im Raum bestimmen. Die interessanten (und noch weitgehend ungelösten Probleme) bestehen neben der möglichst genauen Interpolation zur Stellungbestimmung darin, kompakte interne Repräsentationen für die einzelnen Situationen *automatisch* zu erzeugen.
Was erhoffen wir von diesem Ansatz?

- *Situationstrennung*. Neben dem Auffinden kompakter Repräsentationen sollen beim Lernvorgang Situationen automatisch so getrennt werden, daß zur Laufzeit in Abhängigkeit vopn diesen Situationen von einem Verhalten zum anderen umgeschaltet werden kann. Die bekannten unüberwachten Clusterungsverfahren aus der statistischen Lerntheorie können hier einen Weg aufzeigen, allerdings ohne das Problem vollständig zu lösen.

- *Strukturlernen*. Der Steuerung stehen bereits jetzt alternative Methoden zur Merkmalsextraktion, zur Bildkompression, zur Bewertung der Messungen von Radsensoren und Bildsensor, zur Bewertung der Wichtigkeit einzelner Sensormuster zur Auswahl. Ungeklärt ist, wie diese beim Lernvorgang automatisch so strukturiert werden können, daß daraus eine leistungsfähige Architektur entsteht.

5 Ausblick

Wir haben einige Problembereiche der Robotik aufgezeigt, die sich ergeben, wenn man die Entwicklung von autonomen Systemen verfolgt, die sich wie Organismen aus gut aufeinander abgestimmten Komponenten und nicht wie ungelenke Maschinen verhalten.

Wir schließen, indem wir einige ungeordnete Fragestellungen anführen, deren Beantwortung wesentliche Bausteine zum Aufbau einer Systematik zur Synthese von solchen autonomen intelligenten Systemen liefern können, die nicht mehr den bislang beobachteten kognitiven Beschränkungen unterliegen:

- *Repräsentationen.* Wie können Repräsentationen aufgebaut sein, die zur Darstellung des internen Wissens um die Außenwelt und um die eigene Kompetenz geeignet sind?[17] Wie können diese Repräsentationen genutzt werden, um die eigene Verhaltensplanung durch Probehandeln (Emulation) und durch antizipatorischen Einbezug von Sensormustern (Verhalten anderer Systeme) zu unterstützen [5, 6, 9]? Besteht am Ende die Möglichkeit, daß Operationen über diesen Repräsentationen ein eigenes „Roboterbewußtsein“ schaffen?

- *Informationsfusion.* Wie können die verrauschten und widersprüchlichen Informationen der internen und externen Sensoren zu einem sinnvollen Abbild der Umwelt verschmolzen werden? Wie sind die Funktionen zur Bewertung dieser Informationen prinzipiell zu gestalten, wie zu parametrisieren? Wie kann der (dauernde, temporäre, teilweise) Ausfall eines Sensors durch einen anderen kompensiert werden [8]?

- *Verkörperung.* Inwieweit ist die physische Gestalt des Roboters verantwortlich für den Ablauf seiner Erkenntnisprozesse bzw. zu deren Entwicklung? Kann aus der Evolution der natürlichen Vorbilder für Sensoren und deren hervorragende Anpassung an (Aufgaben-)Nischen gelernt werden? Wie können die erwähnten Repräsentationen an die Robotergestalt optimal (evolutionär, konstruktiv) angepaßt werden?

- *Kommunikation mit dem Menschen.* Wie lernt der Roboter Konzepte der menschlichen Vorstellungswelt, und wie lernt er Begriffe? Kann er aus dem menschlichen Umgang mit den Begriffen eigenständig Schlüsse für deren Verwendung bzw. für sein eigenes Verhalten ziehen? Welche Kanäle der Kommunikation (Sprache, Mimik, Gestik) können und sollten genutzt werden?

- *Meta-Architektur.* Wie kann ein generischer Bauplan eines autonomen Systems aussehen, das seine Repräsentationen und kognitiven Fähigkeiten selbst entwickelt und eine (nur ihm

[17] Eine Einführung mit umfangreicher Bibliographie ist [15].

verständliche) Wissensbasis aufbaut? Welche festen Vorgaben müssen gemacht werden, welche (Lern-)Parameter müssen im Sinne einer schnellen Anpassung (in welchen Bereichsgrenzen) vorgegeben werden, was kann allein der Entwicklung im *sozialen Kontext* überlassen werden? Welches sind die Bausteine *maschineller Erkenntnis* (im Gegensatz zum reinen Lernen)?

Literatur

[1] R. Arkin. *Behavior-based robotics*. MIT-Press, Cambridge, 1998.

[2] R. Brooks. *Embodied intelligence*. MIT-Press, Cambridge, 1999.

[3] T. Christaller. Von Artificial Intelligence zu Artificial Life und zurück. *Künstliche Intelligenz*, (4), 1996.

[4] T. Christaller. Cognitive robotics: a new approach to artificial intelligence. *Artificial Life and Robotics*, (im Druck), 1999.

[5] A. Clark and R. Grush. Towards a cognitive robotics. Technical report, Department of Philosophy, Washington University, 1997.

[6] A. Clark and R. Grush. Towards a cognitive robotics. *Adaptive Behavior*, 7(1), 1999.

[7] H. Flohr. Denken und Bewußtsein. In J. Fedrowitz, D. Majetovski, and G. Kaiser, editors, *Neuroworlds, Gehirn – Geist – Kultur*, Frankfurt/New York, 1994. Campus Verlag.

[8] H. Flohr, A. Burt, U. Will, and R. Ammelburg. Vestibular compensation: A paradigm for lesion-induced neural plasticity. *Fortschritte der Zoologie*, 37, 1989.

[9] J. Hoffmann. *Vorhersage und Erkenntnis – Die Funktion von Antizipationen in der menschlichen Verhaltenssteuerung und Wahrnehmung*. Hogrefe - Verlag, 1993.

[10] IEEE Systems, Man and Cybernetics Society. Special issue on distributed artificial intelligence. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-11, 1981.

[11] H. Levesque and R. Reiter. High-level robotic control: beyond planning. A position paper. In *AAAI 1998 Spring Symposium: Integrating Robotics Research: Taking the Next Big Leap*, Stanford University, 1999. AAAI-Press.

[12] R. Pfeifer. Dynamics, morphology, and materials in the emergence of cognition. In W. Burgard, T. Christaller, and A. Cremers, editors, *KI-99: Advances in Artificial Intelligence*, volume 1701 of *LNCS*. Springer-Verlag, Berlin, 1999.

[13] R. Pfeifer and C. Scheier. *Understanding Intelligence*. MIT-Press, Cambridge, 1999.

[14] G. Roth. *Das Gehirn und seine Wirklichkeit*. Suhrkamp, Frankfurt am Main, 1996.

[15] K. Sterelny. *The representational theory of mind: in introduction*. Basil Blackwell, Cambridge, MA, 1990.

[16] S. Strippgen. *INSIGHT: Ein virtuelles Labor für Entwurf, Test und Analyse von autonomen Agenten*. PhD thesis, Technische Fakultät, Universität Bielefeld, Dez. 1996.

[17] H. v. Foerster. Bemerkungen zu einer Epistemologie des Lebendigen. In *Wissen und Gewissen: Versuch einer Brücke*, pages 116 – 132. Suhrkamp, Frankfurt am Main, 1993.

[18] G. Vollmer. *Evolutionäre Erkenntnistheorie: angeborene Erkenntnisstrukturen im Kontext von Biologie, Psychologie, Linguistik, Philosophie und Wissenschaftstheorie*. S. Hirzel, Stuttgart, 1994.

[19] J. Wellner. Einige erkenntnistheoretische Überlegungen zur kognitiven Robotik. Workshopbeitrag, KI-Konferenz Bremen, 1998.