



# Serviceroboter der Zukunft

Eine neue technische Revolution kündigt sich im Dienstleistungssektor an: Innovative Konzepte zur Bewegungssteuerung eröffnen sehenden Robotern völlig neue Möglichkeiten, mit ihren „Herren“ zu interagieren. Konsequenz dieser Entwicklung sind menschenähnliche Roboter als gehorsame und gelehrige „Diener“.

VON RAINER BISCHOFF, VOLKER GRAEFE UND RALF GRASSNICK

**W**ie lange wird es noch dauern, bis Roboter als willige Diener des Menschen in unseren Alltag Einzug gefunden haben werden? Wird es jemals Roboter wie R2D2, C3PO oder Data geben, die uns aus Science Fiction Filmen und Serien bekannt sind und sogar teilweise eigenes Bewußtsein entwickeln? Wenn man sich rückblickend die Prognosen ansieht, die in den letzten Jahrzehnten Aussagen über das Aufkommen unserer robotischen „Verwandten“ und Helfer getroffen haben, so muß man eingestehen, daß in dieser Frage Wunsch und Wirklichkeit weit auseinanderliegen. So kündigten bereits 1964 Fachleute für 1984 Haushaltsroboter an, welche die gebräuchlichsten Haushaltstätigkeiten selbständig verrichten können. Auch die vom Robotik-Pionier Joseph F. Engelberger erst 1993 für 1996 prognostizierten zweiarmigen mobilen Helfer werden noch längere Zeit Gegenstand intensiver Forschung sein und nicht einer breiten Masse der Bevölkerung zur Verfügung stehen.

## Intelligente sehende Roboter

Die Erforschung und Realisierung „sehender“ Maschinen und „intelligenter“ Roboter ist seit 1977 ein Arbeitsschwerpunkt des Instituts für Meßtechnik der Universität der Bundeswehr München. Vorrangiges Ziel ist zum einen, ein grundlegendes Verständnis des Sehens, der Autonomie und der Intelligenz von technischen Systemen zu erarbeiten und zum anderen intelligente sehende Roboter zu realisieren. Diese sollen sich in natürlicher Umgebung mit angemessener Geschwindigkeit und hoher Sicherheit fortbewegen und in der stets unvorhersehbaren und veränderlichen Welt bestehen sowie selbständig vielfältige Aufgaben erfüllen.

Ausgehend von der Hypothese, daß sich die Intelligenz von Lebewesen im Laufe der Evolution aus dem Zusammenwirken von Sehens, Bewegungssteuerung und Adaption an die Umwelt entwickelt

hat, erforschen wir die Grundlagen eines solchen Zusammenwirkens bei autonomen Robotern. Fernziel ist die Realisierung von Robotern mit einer praktischen Intelligenz; ähnlich der, die auch Lebewesen zum Überleben in ihrer jeweiligen Umwelt befähigt.

Höher entwickelte intelligente Lebewesen sind zumeist mit einem Gesichtssinn ausgestattet, der es ihnen erlaubt, sich in ihrer Umwelt zu orientieren und sich zweckmäßig und zielorientiert zu bewegen, zum Beispiel um Nahrung zu suchen oder um einer Gefahr auszuweichen. Nur in Bereichen, in denen aufgrund des fehlenden Sonnenlichtes keine visuelle Erfassung der Umgebung möglich ist – etwa in Höhlen oder im Meer – haben sich andere Sensormodalitäten als leistungsfähiger erwiesen, beispielsweise die Verwendung von Ultraschall bei Fledermäusen und Delphinen. Wir sind daher der Auffassung, daß auch für intelligente Roboter das Sehen entscheidend ist, denn es ermöglicht, komplexe und dynamisch veränderliche Situationen in Echtzeit (das heißt, schritthaltend mit den Abläufen in der Umwelt) zu erfassen.

Neben der Fähigkeit, mit Sensoren Situationen in einer dynamischen Umwelt zu erkennen, benötigt ein intelligenter Roboter insbesondere auch die Fähigkeit des Lernens – also die Fähigkeit, durch Interaktion mit der Umwelt Kenntnisse zu erwerben beziehungsweise zu erweitern und Verhaltensweisen zu erlernen beziehungsweise zu verbessern. Mit „Intelligenz“ umschreiben wir hier und im folgenden nicht die Intelligenz, die etwa einen Mathematiker befähigt, Theoreme zu beweisen, oder die einen Schachspieler ein schwieriges Spiel gewinnen läßt. Es geht vielmehr um eine Art von praktischer Intelligenz, um die Fähigkeit, Situationen in der Umwelt zu erfassen, Objekte zu erkennen und sich zielgerichtet zu bewegen. Obwohl dies scheinbar eine sehr einfache Art von Intelligenz ist, die immerhin schon bei kleinen Kindern gut ausgeprägt ist, ist es merkwürdigerweise außerordentlich schwierig, sie mit technischen Mitteln

nachzubilden. Es gibt heute Schachprogramme, die Großmeister schlagen können; es gibt aber keinen Roboter, der in ein Zimmer gehen, dort ein Schachspiel aus dem Regal nehmen und es auf einem Tisch aufbauen kann – eine leichte Aufgabe für ein sechsjähriges Kind. Doch ist zu erwarten, daß auch Roboter einmal eine derartige praktische Intelligenz besitzen und dann in ihrer jeweiligen Umgebung eine ähnliche Adaptionsfähigkeit aufweisen werden wie Lebewesen.

## Serviceroboter

Roboter, die den Menschen bei einer Vielzahl von Tätigkeiten in seiner natürlichen Umgebung unterstützen und vielfältige Dienstleistungen erbringen, werden als Serviceroboter bezeichnet. Sie stellen eine Weiterentwicklung heutiger Industrieroboter und autonomer Transportfahrzeuge dar und bilden die Grundlage einer künftigen Generation von sogenannten Personal Robots, die in Zukunft ähnlich den heute bekannten Personal Computers nicht mehr aus unserem Alltag wegzudenken sein werden. Erste Generationen von Servicerobotern werden bereits heute zur Rationalisierung und Automatisierung von Transport-, Handhabungs- und Verarbeitungsvorgängen in den verschiedensten Dienstleistungsbereichen eingesetzt, zum Beispiel in der Reinigung, Überwachung und Medizin sowie in der Pflege oder auch im Baugewerbe. Es ist jedoch noch ein weiter Weg, bis sich ein Massenmarkt für solche Dienstleister etablieren wird. Zu vielschichtig sind die Probleme in den Bereichen Modularität, Sicherheit, Kommunikations- und Kooperationsfähigkeit, Verfügbarkeit sowie Lern- und Adaptionsfähigkeit, als daß sie sich in naher Zukunft lösen ließen.

Derzeitige Serviceroboter sind Speziallösungen und daher nur schwer an andere Aufgabenstellungen und Umgebungsbedingungen anzupassen. Bestimmte Teilsysteme werden dennoch vielen unterschiedlichen Servicerobotern

gemein sein, zum Beispiel eine mobile Plattform, ein Manipulationssystem, Steuer- und Antriebstechnik sowie Bedienerchnittstellen und Sensoren. Modularität, Flexibilität und Erweiterbarkeit bei Hard- und Software sind daher von großer Bedeutung, um die einzelnen Teilsysteme je nach Bedarf zu funktionsfähigen und preiswerten Robotern zusammenstellen zu können.

Anders als beim Industrieroboter, bei dem eine vollständige Trennung der Arbeitsbereiche von Mensch und Maschine gegeben ist, findet bei den meisten Servicerobotern eine enge Interaktion zwischen Benutzer und Roboter statt. Sie erfordert ein in sich geschlossenes Sicherheitskonzept, das eine Gefährdung von Personen und die Beschädigung von Inventar ausschließt. Dies erscheint umso wichtiger, da man menschliches Fehlverhalten eher tolerieren würde als das eines Roboters.

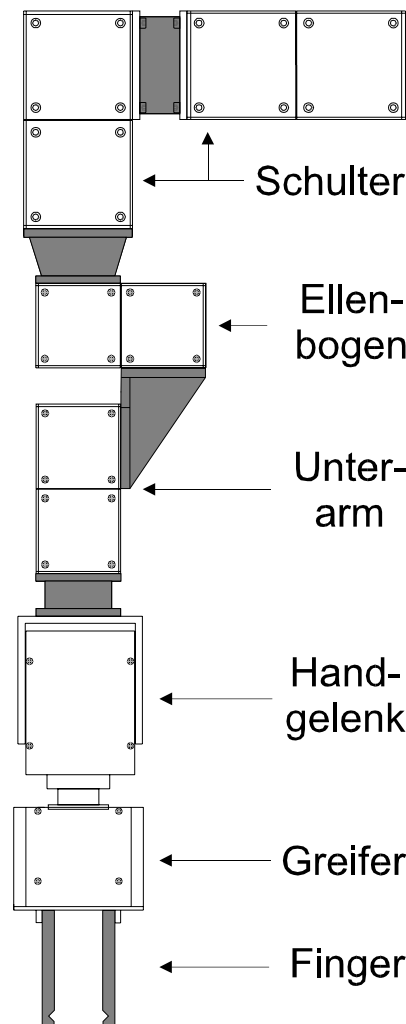
Serviceroboter sollen in erster Linie Menschen dienen, die keine Robotik-Experten sind. Deshalb müssen solche Roboter über hochentwickelte Kommunikationsfähigkeiten verfügen; sie sollen beispielsweise Gesten interpretieren können. Vor allem aber werden sie die menschliche Sprache verstehen müssen. Akustisch übermittelte Befehle erreichen den Roboter auch dann, wenn er nicht in Sicht- oder gar Handreichweite ist. Damit ein Serviceroboter sprachliche Kommandos wie etwa „Bring mir eine Tasse Tee!“ ausführen kann, muß er sie kontextbezogen interpretieren und ein sehr weitgehendes Verständnis seiner Aufgaben, seiner Umgebung und der eigenen Fähigkeiten haben.

Eng verbunden mit den kommunikativen Eigenschaften ist die Kooperationsfähigkeit: Serviceroboter müssen mit Menschen und untereinander zusammenarbeiten können, um anstehende Aufgaben gemeinsam bewältigen zu können. Kommunikations- und Kooperationsvermögen ermöglichen einen konstruktiven Dialog mit dem Benutzer und sind sehr wichtig für die Akzeptanz solcher Roboter. Außerdem können kooperierende Roboter Aufgaben innerhalb ihrer Gruppe verteilen und so auch vorübergehende Ausfälle einzelner Roboter, beispielsweise bedingt durch Wartung oder Batterieladung, kompensieren. Dies entspricht dem menschlichen Wunsch nach einem allgegenwärtigen Helfer, der immer verfügbar und auch leicht zu erreichen ist. Dabei ist nicht wichtig, welcher der Serviceroboter aus der Gruppe letztendlich den Auftrag ausführt, sondern nur, daß er termingerecht erledigt wird.

Eine weitere wichtige Eigenschaft eines Serviceroboters ist seine Lern- und

Adaptionsfähigkeit. Diese Fähigkeit erleichtert es einem Benutzer, den Roboter in seine neue Einsatzumgebung einzubringen, und ermöglicht es dem Roboter, auf Veränderungen innerhalb seiner neu erlernten Umgebung flexibel zu reagieren und aus Fehlern zu lernen. Auch kann ein lernfähiger Roboter partielle Sensorausfälle kompensieren und auf Änderungen an seinen Sensoren oder Aktuatoren, wie sie aufgrund von Wartung oder durch Verschleiß entstehen können, angemessen reagieren. Der Durchbruch für Serviceroboter auf dem Markt wird aber erst dann gelingen, wenn sie sich wirklich selbständig an Einsatzumgebungen anpassen können, da die Entsendung von hochqualifizierten Fachkräften bei der Einrichtung und expliziten Programmierung solcher Serviceroboter zu teuer ist.

Soll ein Serviceroboter in Umgebungen arbeiten, in denen sich auch das tägliche Leben von Menschen abspielt – also beispielsweise in Wohnungen, Büros, Hotels, Krankenhäusern oder auf



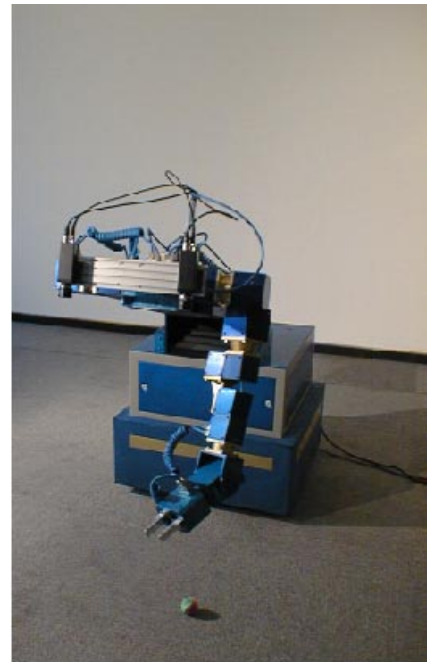
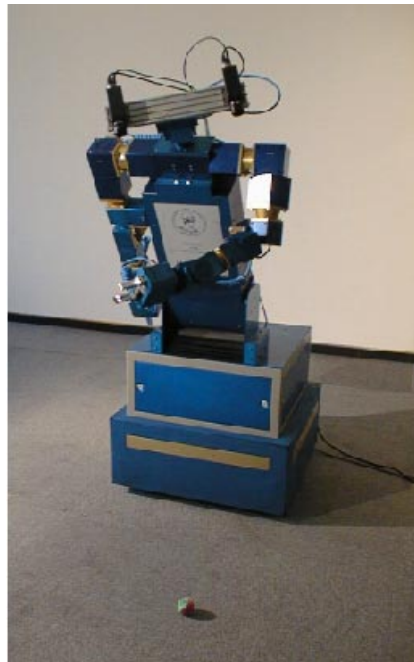
**Bild 1: Konfiguration eines Armes mit sechs Freiheitsgraden und einem Zweifingergreifer. Die Reichweite beträgt 94 Zentimeter, die Nutzlast bei ausgestrecktem Arm zwei Kilogramm.**

Straßen – ist es angebracht, ihn in Größe und Form dem Menschen nachzubilden. Denn diese Einsatzumgebungen sind an die speziellen körperlichen Eigenschaften und Erfordernisse des Menschen angepaßt worden: an seinen Platzbedarf (zum Beispiel die Breite von Korridoren und Türen), an seine Arbeitshöhe (etwa Tische oder Türgriffe), an seine Augenhöhe (Türschilder) und an die Körperkraft, die er zum Manipulieren von Objekten aufbringen will (Öffnen einer Tür). Eine dem Menschen ähnliche Gestalt und vergleichbare sensorische und motorische Fähigkeiten sind daher Grundvoraussetzungen für Serviceroboter, wenn man ihre jeweilige Einsatzumgebung nicht an die Besonderheiten und Bedürfnisse des Roboters anpassen möchte, zum Beispiel durch die nachträgliche Installation automatischer Türen, fernbedienbarer Fahrstühle oder Navigationsbaken.

Ein weiterer wichtiger Grund, die Gestalt des Roboters dem Menschen anzupassen, ist der, daß Serviceroboter mit Menschen auf verschiedenen Ebenen – von Berührungen über Gesten bis hin zur Sprache – interagieren und kommunizieren müssen. Weist der Roboter eine menschenähnliche Form und ein menschenähnliches Verhalten auf, fällt Menschen die Interaktion leichter. Zudem sind die Bewegungen eines menschenähnlichen Roboters für Benutzer, die sich nicht notwendigerweise für Robotertechnik interessieren, leichter vorherzusehen, wodurch Sicherheit und Akzeptanz erhöht werden. Zudem kann wohl gelten: Wenn Roboter eine menschenähnliche Größe und Gestalt besitzen, können sie eine dem Menschen besonders gut zugängliche Art von Wissen als Grundlage für die Kommunikation aufbauen. Je enger der Kontakt mit dem Menschen, desto menschenähnlicher sollte der Roboter sein.

**Situationserkennung und Verhaltensauswahl**

Klassische Ansätze der Bewegungssteuerung von Robotern setzen auf eine exakte Bahnplanung und hindernisvermeidende Bewegungsführung. Sie basieren auf detaillierten Modellen der Umgebung und des Roboters, einschließlich seiner Kinematik und seiner Sensoren. Der Schwachpunkt solcher Ansätze liegt darin, daß in der realen Welt immer wieder Diskrepanzen zwischen Modell und Wirklichkeit entstehen. Schon ein kleiner Fehler in einem einzigen der zahlreichen Parameter des Modells kann genügen, um das Gesamtsystem in einen kritischen



**Bild 2:** HERMES ist ein vielseitig einsetzbarer, modular aufgebauter, mobiler Roboter mit einer dem Menschen vergleichbaren Anordnung seiner „Arme“ und „Augen“. Zwei an einem nach vorne und hinten abknickbaren Oberkörper befestigte Arme führen zu einer erheblichen Erweiterung des Arbeitsraums, der durch das auf einer frei beweglichen Sensorplatte

Zustand zu bringen oder es ganz versagen zu lassen. Ursachen für solche Fehler liegen unter anderem in mangelhafter anfänglicher Kalibrierung, veränderten Umgebungsbedingungen (zum Beispiel Temperatur, Feuchtigkeit oder Beleuchtung), der Alterung von Komponenten und in Wartungsarbeiten (etwa der Austausch von Komponenten). Die Erfahrung zeigt, daß Roboter, die quantitativ richtige Modelle voraussetzen, in der Praxis nur dann zuverlässig funktionieren, wenn sie fortlaufend überwacht und sorgfältig gewartet werden und wenn die Umgebungsbedingungen unter Kontrolle gehalten werden.

Für Serviceroboter ist dieser Ansatz ungeeignet; verhaltensbasierte Systemarchitekturen sind hier die Alternative. Der Grundgedanke einer verhaltensbasierten Bewegungssteuerung ist es, ein Ziel – respektive einen konkreten Bewegungsablauf – dadurch zu erreichen, daß eine geeignete Sequenz von eingebauten („angeborenen“) Grundverhaltensmustern, wie „einen Fahrweg entlangfahren“, „Abbiegen“ oder „auf ein Objekt zufahren“, ausgeführt wird. Das Festlegen der richtigen Sequenz und die Parametrierung einzelner Verhaltensmuster sind zentrale Probleme bei jeder Realisierung eines verhaltensbasierten Konzepts. Bei dem von uns entwickelten Ansatz erfolgt die Parametrierung des aktuell ausgeführten Verhaltensmusters beziehungsweise die Auswahl des jeweils nächsten Verhaltensmusters aufgrund einer kontinuierlich parallel stattfindenden Analyse der aktuellen Situation des Roboters. Dies ermöglicht dem

Roboter letztendlich ein intelligentes Agieren und Reagieren auf bestimmte Situationen. Der Begriff „Situation“ umfaßt hier die wahrnehmbaren Objekte in der Umgebung des Roboters und deren vermutete oder erkennbare Zustände, den Zustand des Roboters (Bewegungszustand, gerade ausgeführtes Verhaltensmuster und ähnliches) und die Gegebenheiten der Umgebung, welche dem Roboter bekannt sind (zum Beispiel Lageplan), auch wenn er diese momentan mit seinen Sensoren nicht erfassen kann. Hinzu kommen die Ziele des Roboters, und zwar sowohl permanente Ziele (wie Überleben, Unfallfreiheit) als auch solche, die sich aus der aktuellen Mission und den Forderungen des Benutzers ergeben (wie Fahrtziel, Fahrwege). Eingeschlossen sind zudem sein Repertoire an Verhaltensmustern sowie die Möglichkeiten, Verhaltensmuster zu koordinieren und zu verketteten, um so bestimmte Änderungen von Situationen herbeizuführen.

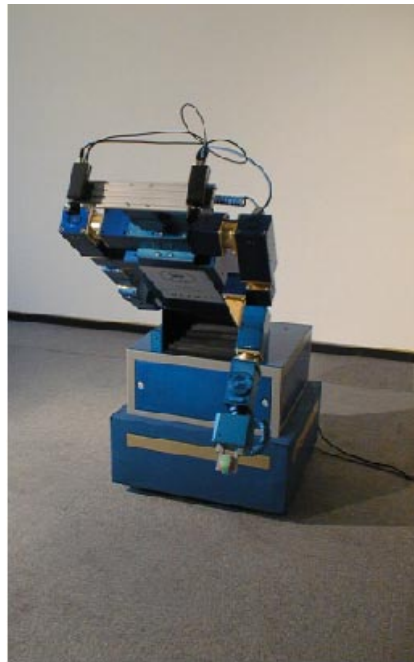
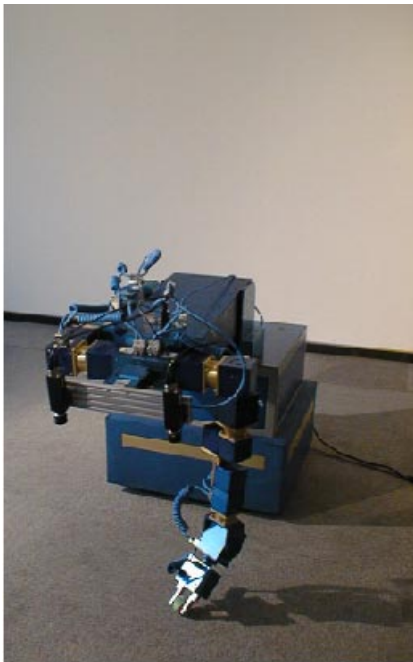
Die vom Roboter wahrgenommene Situation, die er zur Grundlage seiner Entscheidungen macht, ergibt sich somit nicht direkt aus objektiv vorhandenen, externen Gegebenheiten. Sie ist vielmehr das Ergebnis aus der „Verschmelzung“ unvollkommener interner „Bilder“ der externen Gegebenheiten. Diese Bilder entstehen im Roboter aus der Sensordatenverarbeitung in Verbindung mit gespeichertem Wissen und den ebenfalls internen Zielen und Zuständen des Roboters. Der Benutzer spielt dabei insofern eine Rolle, als daß er über die Benutzerschnittstelle Ziele vorgeben oder unmittelbar

in die Verhaltensauswahl eingreifen kann.

Ein Roboter, dessen Systemarchitektur Konzepte wie „Situation“ und „Verhalten“ zugrunde liegen und bei dem Situationserkennung sowie Verhaltensauswahl als zentrale Schaltstellen an der Kommunikation mit dem Benutzer beteiligt sind, kann ein Verhalten zeigen, das in gewissen Grenzen dem eines intelligenten Lebewesens ähnelt. So erfolgt die Kommunikation situationsabhängig unter Einschluß objektiver Sachverhalte und Objekte in der Umgebung, ohne daß auf roboterrelevante Gegebenheiten wie etwa Speicheradressen, Variablenamen oder Koordinatensysteme, Rücksicht genommen werden muß.

### Objektorientiertes dynamisches Sichtsystem

Die menschliche Wahrnehmung, die Aufnahme von Informationen mit Hilfe von Sinnesorganen und deren Weiterverarbeitung, ist eine so komplexe Leistung des gesamten Organismus, daß sie sich nach wie vor nicht mit technischen Mitteln nachbilden läßt. Die für Menschen wichtigste Wahrnehmungsart, nämlich das Sehen, ist allerdings auch zur Realisierung intelligenter Roboter von herausragender Bedeutung. Keine andere Sensormodalität ist so gut geeignet, komplexe, dynamisch veränderliche Situationen in Echtzeit zu erkennen. Mit „Echtzeit“ meinen wir eine so „rechtzeitige“ Erfassung der augenblicklichen Situation, daß dem Roboter genügend Zeit für die Aus-



form befindliche Stereosichtsystem zu jeder Zeit effektiv überwacht werden kann. Der 1,70 m hohe und etwa 250 Kilogramm schwere Roboter ist zum Beispiel in der Lage, ein auf dem Bo-

den liegendes Objekt selbständig zu erfassen, sich danach zu bücken und mit seinem Zweifingergreifer aufzuheben. Fünf Batterien erlauben einen mehrstündigen autonomen Betrieb.

wahl eines angemessenen Verhaltens bleibt. Wie schnell eine Situation vom Roboter erfaßt werden muß, hängt davon ab, wie schnell sich für den Roboter eine nennenswerte Änderung der Situation in der jeweiligen Einsatzumgebung ergeben kann und wie schnell der Roboter darauf reagieren muß. Für einen Serviceroboter, der mit Menschen interagiert und der sich in deren Umfeld bewegt, ist eine dem Menschen vergleichbare Reaktionszeit von einigen Zehntelsekunden ein guter Anhaltspunkt.

Um sich ein Bild ihrer Umwelt machen zu können, verwenden die von uns entwickelten Roboter objektorientierte dynamische Sichtsysteme: Sie konzentrieren ihre Wahrnehmungsleistung auf einige wenige relevante Objekte innerhalb ihres Gesichtsfeldes und setzen voraus, daß diese Objekte physikalischen Gesetzmäßigkeiten – insbesondere der Kontinuität der Bewegung – unterworfen sind. Dieser objektorientierte Ansatz unter Einbeziehung der Dynamik der Objekte ermöglicht trotz der großen zu verarbeitenden Datenmengen auch bei geringerer Rechenleistung eine Wahrnehmung, die nicht die Arbeitsgeschwindigkeit des Roboters begrenzt und eine Grundlage für intelligentes Verhalten ist.

Die Entscheidung, welche Objekte für den Roboter als wesentlich zu erachten sind, ist schwierig. Die Erfahrung hat gezeigt, daß erstaunlicherweise nur sehr wenige Objekte gleichzeitig für den Roboter relevant sind. Das sind die Objekte, die momentan zur Auswahl, Durchführung und Koordinierung von Verhaltensmustern benötigt werden, zum Beispiel

Hindernisse, Korridore, Abzweigungen, Andockstationen, Hinweisschilder und zu manipulierende Objekte. Physikalische Gegebenheiten der Umgebung, die für die aktuelle Situation bedeutungslos sind, werden vom Sichtsystem ignoriert. Das Wissen, wo und wie nach welchen Objekten zu suchen ist, steht dem Roboter in Form von deklarativem Wissen in Datenbanken (Objektmerkmale, etwa Kanten, Ecken, Texturen sowie Objektmodelle) und in Form von prozeduralem Wissen (Algorithmen) zur Verfügung.

### Situationsabhängige Navigation

Nehmen wir an, unser Serviceroboter befindet sich in Wartestellung an seiner Batterie-Ladestation. Dort erhält er den Auftrag, zur Poststelle zu fahren, um die eingegangene Post abzuholen und zu verteilen. Durch die Auftragserteilung hat sich seine aktuelle Situation geändert. Anhand einer topologischen Karte seiner Einsatzumgebung plant er in groben Zügen seinen Weg zur Poststelle in Form von Verhaltensmustern, die einen zweckmäßigen Weg dorthin beschreiben – zum Beispiel einen Korridor geradaus fahren und an der ersten Kreuzung links abbiegen. Wenn sich während der Fahrt eine unerwartete Situation ergeben sollte, wenn etwa ein normalerweise frei befahrbarer Weg durch eine Tür verschlossen sein sollte, sucht der Roboter entsprechend seinem Repertoire an aktuell ausführbaren Verhaltensmustern nach Alternativen. In unserem Beispiel könnte er einen neuen Fahrweg planen oder aber

beschließen, die Tür zu öffnen, falls ihm das möglich ist. Durch eine geeignete Verkettung von Verhaltensmustern kann der Roboter so jeden Ort im Wegenetz erreichen.

Ebensowenig wie ein Mensch muß der Roboter seine Position relativ zu einem globalen Koordinatensystem kennen – weder für die Situationserkennung noch für die Ausführung von Verhaltensmustern. Dies hat zwei wichtige Konsequenzen: Zum einen kann auf teure und womöglich störanfällige Ortsbestimmungssysteme verzichtet werden, die zur exakten Kartierung der Einsatzumgebung und späteren Relokalisierung des Roboters notwendig wären. Zum anderen wird die autonome Erkundung der Einsatzumgebung stark vereinfacht, weil topologische Informationen für die situationsabhängige Navigation bereits ausreichend sind.

Jedes Verhaltensmuster ist zudem an die Erkennung bestimmter Objekte gebunden. Um einem Korridor folgen zu können, orientiert sich der Roboter beispielsweise am Übergang zwischen Wand und Fußboden. Abzweigungen sind typischerweise durch fehlende Wände, Türen meist anhand ihrer Türrahmen oder Türgriffe zu erkennen. So hat jedes dem Roboter bekannte Objekt bestimmte Merkmale, die das Sichtsystem sucht und findet.

Neben den Informationen des Sichtsystems stehen dem Roboter zusätzlich Informationen über die augenblickliche Winkelstellung beziehungsweise die Winkelgeschwindigkeit seiner Räder zur Verfügung. In Verbindung mit einem

Modell der Fahrzeugkinematik ist es möglich, durch Integration der zurückgelegten Wege eine Positions- und Lage-schätzung abzuleiten. Mit diesem als Koppelnavigation bekannten Verfahren lassen sich wegen der unvermeidlichen Meßfehler (Schlupf, Rutschen der Räder über den Untergrund, ungenaues Modell der Kinematik) keine sehr genauen Informationen erhalten. Dies ist aber auch nicht erforderlich, denn die Navigation des Roboters beruht – wie auch beim Menschen – primär auf visuell gewonnenen Informationen.

### Lernvorbild Säugling

Ein Serviceroboter soll nicht nur navigieren, sondern an wechselnden Orten bestimmte Aufgaben erledigen und Objekte manipulieren. Dazu benötigt er Arme und Hände. Klassische Ansätze zur Bewegungssteuerung von Manipulatoren sehen vor, zunächst die Position des zu manipulierenden Objekts in einem ortsfesten Koordinatensystem zu berechnen und anschließend den Endeffektor des Manipulators an diese Position zu bewegen. Die Berechnungen beinhalten inverse perspektivische und kinematische Transformationen. Sie setzen eine genaue Kenntnis der optischen Parameter der Kameras und der Kinematik des Manipulators voraus. Die dafür notwendigen Kalibrierungen sind sehr umständlich, müssen fortwährend überwacht und, etwa nach Wartungsarbeiten, erneut durchgeführt werden.

Um diese Schwierigkeiten zu umgehen und eine für einen Serviceroboter akzeptable Lösung zu finden, haben wir einen neuen Ansatz entwickelt. Das Konzept ist einfach und orientiert sich an den Erfahrungen, die Säuglinge während ihrer ersten Lebensmonate beim Bewegen ihrer Arme, Hände und Finger machen. Sie beobachten sich selbst mit den Augen und lernen so mit der Zeit, wie bestimmte Bewegungen auszuführen und Objekte zu handhaben sind. Ganz ähnlich macht es unser Roboter: Während er seinen Greifer mit beiden Kameras betrachtet, sendet er mehr oder weniger willkürliche Steuerbefehle an die Motoren des Arms. Indem er die aus diesen Befehlen resultierenden Änderungen in den Bildern analysiert, erlernt der Roboter die Beziehungen zwischen den Bildänderungen und den Steuerkommandos. Nach einer geringen Anzahl von Testbewegungen ist die Maschine in der Lage, den Manipulator an jede Stelle im Bild zu fahren, die überhaupt erreichbar ist. Wenn außer dem Greifer auch ein Objekt in beiden Kamerabildern sichtbar ist, kann der

Greifer so angesteuert werden, daß Greifer- und Objektposition in den Bildern, und damit auch in der Realität, zur Übereinstimmung gebracht werden.

Mit einem Knickarmroboter mit fünf Freiheitsgraden, der mit einem Zweifingergreifer und einem Stereosichtsystem versehen ist, wurde dieses Verfahren bereits an unserem Institut realisiert. Bälle sowie flache und längliche zylindrische Objekte können ohne Kenntnis der Kinematik und der Parameter der Kameras lokalisiert und gegriffen werden; sogar willkürliche Eingriffe und Änderungen am optischen System während des Betriebs werden toleriert – ein Beweis für die außergewöhnliche Robustheit des Systems.

Wir haben unsere Arbeiten von Anfang an wesentlich von dem Gedanken leiten lassen, daß alle Forschungsergebnisse zum Nachweis ihrer Gültigkeit in praxisnahen Experimenten in der realen Umwelt überprüft und demonstriert werden müssen. Diese sehr aufwendige Arbeitsweise ist keineswegs selbstverständlich oder gar in der Robotik-Forschung allgemein üblich. Sie hat aber gegenüber kostengünstigeren, reinen Simulationen den gravierenden Vorteil, zu weitaus solideren und in der Praxis belastbareren Ergebnissen zu kommen. Voraussetzung für unsere Arbeiten sind somit reale Roboter und leistungsfähige Echtzeit-Bildverarbeitungssysteme, die wir zum großen Teil selbst entwerfen und bauen, da die Geräte, die unseren speziellen Anforderungen genügen, auf dem Markt oft nicht verfügbar sind. Das neueste von uns entwickelte System *HERMES* (Humanoider Experimenteller Roboter für mobile Manipulations- und Erkundungsaufgaben im Servicebereich): Es ist ein vielseitig einsetzbarer mobiler Roboter mit zwei Armen und einem Stereosichtsystem, den wir zur Erforschung und Lösung der noch offenen Probleme in der Servicerobotik nutzen wollen. Er weist bereits zahlreiche Eigenschaften auf, die von künftigen Servicerobotern erwartet werden und soll für längere Zeit als Versuchsplattform dienen. Deshalb haben wir bei der Konstruktion und Realisierung großen Wert auf Flexibilität, Modularität und Erweiterbarkeit gelegt. Beim Entwurf beflügelte uns der Gedanke, einen intelligenten Gehilfen zu schaffen, der ohne zu murren einfache, aber lästige Tätigkeiten wie etwa Hol- und Bringdienste zu ausführen vermag. So wie bereits in der Antike der Götterbote Hermes diese Tätigkeiten für die übrigen Götter des Olymps übernommen hat, sollen in Zukunft einmal die „Nachfahren“ von *HERMES* uns Menschen dienen.

Mit seinen „Vorfahren“, den mobilen

Robotern *ATHENE I* und *II* sowie dem kalibrationsfreien Knickarmroboter, wurden Navigations- und Handhabungskonzepte entwickelt, die jetzt in *HERMES* integriert sind und von uns zur Zeit verbessert werden. Hauptsensormodalität ist das Sehen, da es für derartige Anwendungen – wie auch bei Lebewesen – besonders leistungsfähig ist. Auf exakte Weltmodelle wird ebenso verzichtet wie auf genaue Kenntnis der optischen, kinematischen und dynamischen Kenngrößen. Damit soll eine Robustheit erreicht werden, die es ermöglicht, Serviceroboter in häuslichen, öffentlichen und industriellen Bereichen zur selbständigen Verrichtung verschiedenster Dienstleistungen einzusetzen.

Mobilität und manipulative Fertigkeiten sind wesentliche Grundfunktionen der meisten Serviceroboter. Deshalb soll unser menschenähnlicher Roboter in die Lage versetzt werden, unbekannte Umgebungen zu erkunden, um in diesen dann auftragsbezogen navigieren und verschiedene Objekte manipulieren zu können. Insbesondere soll die vorhandene Infrastruktur nicht auf seine Bedürfnisse zugeschnitten werden müssen. *HERMES* muß sich den Gegebenheiten anpassen und dabei auf Informationsquellen zurückgreifen, die auch von Menschen genutzt werden, wie zum Beispiel Tür- und sonstige Informationsschilder oder auch Datenbanken, in denen Personen- und Adressenverzeichnisse abgelegt sind.

### Modularer Aufbau

Besonders wichtig war uns der streng modulare Aufbau des Roboters, bei dem alle Module über genormte, also einheitliche mechanische und elektrische Schnittstellen verfügen. In dem hier beschriebenen System lassen sich die Module nahezu beliebig konfigurieren, so daß der Roboter an neue Aufgaben einfach angepaßt werden kann. Ein solches Modulkonzept haben wir sowohl bei der Konstruktion des „Roboterkörpers“ verfolgt als auch beim Aufbau des Informationsverarbeitungssystems aus mehreren vernetzten Rechnern. Dadurch soll es ermöglicht werden, auf der einen Seite durch Hinzufügen von Standardbausteinen die Anzahl der Freiheitsgrade des Systems zu erhöhen und auf der anderen Seite durch Hinzunahme weiterer Rechenknoten die Rechenleistung entsprechend anzupassen. Durch die Verwendung von bewährten Standardkomponenten der Industrie entsteht so ein in sich homogenes, flexibles System, das leicht zu warten ist und insbesondere in allen

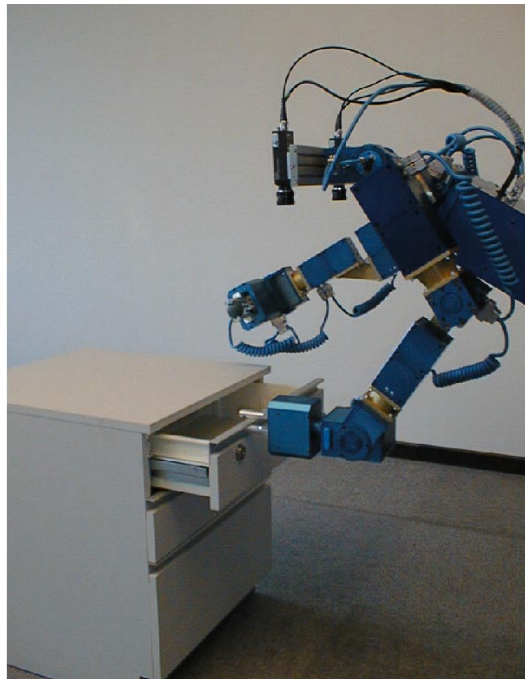
Freiheitsgraden einheitlich angesteuert werden kann.

Zentrales Grundelement des Roboters sind kompakte Antriebsmodule, die bei minimalem Platzbedarf in Doppelwürfeln leistungsfähige Motor-Getriebe-Kombinationen, die zugehörige Leistungselektronik, verschiedene Sensoren (Winkelgeber, Stromwandler, Temperaturfühler), einen Mikrocontroller zur Bewegungssteuerung und Zustandüberwachung sowie eine Kommunikationsschnittstelle enthalten. Mit diesen Modulen und verschiedenen mechanischen Verbindungs- und Adapterelementen können vielfältige kinematische Strukturen aufgebaut werden. Die Kommunikation mit allen Modulen wird durch den insbesondere in der Automobilindustrie bewährten und standardisierten CAN-Bus (Controller Area Network, CAN) realisiert. Zu den Eigenschaften dieses Bussystems gehören eine relativ hohe Übertragungsgeschwindigkeit (bis zu 1 Megabit pro Sekunde), eine hohe Störuneempfindlichkeit, die Erkennung und Behebung auftretender Übertragungsfehler, Multi-Master-Fähigkeit und eine leicht zu verändernde Bustopologie.

*HERMES* wird von insgesamt 21 dieser Module angetrieben, von denen vier in der mobilen Plattform, 15 im Manipulationssystem und zwei in der Sensorplattform arbeiten. Die Gesamtmasse beträgt etwa 250 Kilogramm. Sein Fahrwerk besteht aus vier Rädern, die an den Seitenmitten der mobilen Plattform angebracht sind. Das vordere und das hintere Rad sind aktiv angetrieben und gelenkt, die zwei seitlichen passiven Stützräder geben dem Fahrwerk Stabilität. Das Fahrwerk erlaubt es dem Roboter, sich auf der Stelle zu drehen und aus dem Stand in jede beliebige Richtung wegzufahren. Die beiden Antriebsmotoren von je 500 Watt ermöglichen dem Roboter eine Beschleunigung von 1 Meter pro Sekunde zum Quadrat und eine Höchstgeschwindigkeit von 2 Meter pro Sekunde. Zwischen den vier Radmodulen sind in die mobile Plattform fünf Batterien integriert, die einen mehrstündigen autonomen Betrieb erlauben und durch ihr hohes Gewicht (etwa 100 Kilogramm) eine tiefe Schwerpunktlage und hohe Kippstabilität des Roboters garantieren.

Oberhalb des Fahrwerks und einer Zwischenebene, welche die gesamte Rechner-Hardware aufnimmt, befindet sich ein nach vorne und hinten abknickbarer Oberkörper, an dem zwei Arme mit je sechs Freiheitsgraden befestigt sind. Dadurch ergibt sich ein Arbeitsbereich

von bis zu 120 Zentimeter vor dem Roboter. Jeder Arm ist vorerst mit einem einfachen Zweifingergreifer ausgestattet, was für grundlegende Manipulationsexperimente ausreichend ist (Bild 1). Um genauso beweglich zu sein wie das menschliche Pendant, fehlt dem Roboterarm ein weiterer Freiheitsgrad in der „Schulter“. Jeder Arm wiegt etwa 14 Kilogramm (inklusive Steuerelektronik); er kann ausgestreckt bis zu 2 Kilogramm bewegen. Dieses Verhältnis von Eigen-gewicht zu Nutzlast (von 7 zu 1) wird zur Zeit nur von wenigen Roboterarmen im Forschungsstadium übertroffen; menschliche Arme sind in dieser Hinsicht weit-aus leistungsfähiger. Während der Mensch jedoch nur eingeschränkte Möglichkeiten besitzt, hinter seinem Rücken zu manipulieren, besteht bei unserem Robo-



**Bild 4: HERMES öffnet eine Schublade.**

ter aufgrund der andersartigen Hüft-, Schulter- und Ellenbogengelenke sowie der Beweglichkeit seines „Halses“ diese Einschränkung nicht. So kann *HERMES* seinen „Kopf“ nach hinten drehen und auf der hinteren Nutzfläche sichtgesteuert Transportgüter zwischenlagern.

Zahlreiche Sensoren dienen der Erfassung der inneren und äußeren Zustände des Robotersystems und der Steuerung seiner Wechselwirkung mit der Umwelt. Wie beim Menschen kann eine Unterteilung der Sensorik des Roboters in Exterozeptoren und Propriozeptoren erfolgen. Exterozeptoren nehmen die Reize wahr, die von außen einwirken (zum Beispiel über Augen und Ohren), während Propriozeptoren die Wahrnehmungen aus dem eigenen Körper vermitteln (etwa aus Sehnen, Muskeln und Gelenken).

Der Roboter erfährt seine Umgebung hauptsächlich über zwei Videokameras, die auf einer Schwenk-Neigeplattform oberhalb des Oberkörpers befestigt sind. Die Blickrichtung läßt sich damit aktiv in gewünschte Richtungen steuern. Der Einbau weiterer Exterozeptoren wie zum Beispiel Sensoren zur Lokalisierung von Kollisionsstellen (Tastsinn) oder Mikrophone zur Aufmerksamkeitssteuerung (Hören) ist vorgesehen. Die zum Betrieb des Roboters notwendigen Propriozeptoren sind in die Antriebsmodule integriert: Drehwinkelgeber, Stromwandler und Temperaturfühler. Zusätzliche Sensoren, wie etwa eine Ladezustandsüberwachung der Batterien, sind über eine Vielzahl vorhandener Schnittstellen angeschlossen beziehungsweise anschließbar.

Zur Informationsverarbeitung und Robotersteuerung wird ein hierarchisch aufgebautes Mehrprozessorsystem aus Mikrocontrollern, digitalen Signalprozessoren und einem Pentium-Prozessor verwendet. Die Bewegungssteuerung und Zustandsüberwachung der einzelnen Antriebsmodule erfolgt über die in den Modulen integrierten Mikrocontroller und Sensoren. Die Hauptlast der Informationsverarbeitung aber wird von einem Netzwerk aus digitalen Signalprozessoren (DSP) übernommen das über einen CAN-Controller mit den angeschlossenen Antriebsmodulen kommuniziert und die analogen Videosignale in Echtzeit digitalisiert. Ein Industrie-PC dient als Hostrechner zur Aufnahme der DSP-Einsteckkarten und zur Realisierung der multimodalen Bediener-Schnittstelle unter Windows NT 4.0. Der Roboter kann zudem über eine Funk-Ethernet-Verbindung den Kontakt zu einem Kommunikationsserver aufnehmen und mit dem Benutzer über das Internet kommunizieren. Befehle lassen sich so über eine spezielle Internet-Seite im World Wide Web eingeben oder direkt per E-Mail an *HERMES* versenden.

**Dipl.-Ing. Rainer Bischoff und Dipl.-Ing. Ralf Graßnick** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Meßtechnik der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München.

**Prof. Dr. Volker Graefe** leitet das Institut.

Weitere Informationen über intelligente sehende Roboter sind im Internet unter <http://www.unibw-muenchen.de/campus/LRT6/welcome.html> verfügbar.