

akzent

Aron E. Kobrinski

Achtung, Roboter!



Aron E. Kobrinski

Achtung, Roboter!

Urania-Verlag Leipzig Jena Berlin

Originaltitel: Da sind sie, die Roboter!
(БОТ ОНИ – РОБОТЫ)
Verlag »Nauka«, Moskau 1972
Ins Deutsche übertragen von Leo Korniljew
Gekürzte und bearbeitete Fassung
für die Taschenbuchreihe
»akzent«: Ewald Oetzel

Die Illustrationen schuf Gerhard Preuß

1. Auflage 1974

1.-20. Tausend. Alle Rechte vorbehalten

© Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig, 1974

VLN 212-475/64/74 · LSV 3009

Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle

Typografie: Helmut Selle

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: GG Interdruck Leipzig

Best.-Nr.: 653 337 1

EVP 4,50

Inhalt

Wozu brauchen wir Roboter?

Geisterhände?

- Einfädeln ist doch ein Problem 20
- Marionetten 23
- Mit »Gefühl« geht es besser 25
- Steuern aus sicherer Ferne 29

Der Arm mit Zusatzantrieb.

- Die elektrische Welle 32
- Motoren, die Empfindungen erzeugen 34
- Der mechanische Handschuh 36
- Konstruktion nach Augenmaß? 39

Bioströme steuern

- Elektrizität in lebenden Organismen 42
- »Fast« wie eine Maschine 43
- Die »Moskauer Hand« 46
- Der künstliche Arm »fühlt« 48
- Auf die Muskeln kommt es an 52
- Große Hoffnungen 53

Da sind sie, die Roboter!

- Von Čapek zur Kybernetik 57
- Was ist ein Roboter? 62
- Wenn der »lange Arm« nicht ausreicht ... 64
- Der »Kleine Strolch« und die »mechanische Vollkommenheit« 65

Die Schreitenden

Ein historischer Exkurs 74

Lastkraftwagen auf Beinen 81

Der Mensch im »Futtermal« 88

In zwei Ozeanen

Vorstoß in das Unterwasserreich 94

Roboter im Weltraum 100

Drei Generationen

Die erste Generation ist einseitig 108

Die zweite Generation kann schon »fühlen« 110

Die dritte Generation kann auch »sehen« 116

Erde – Mond – Erde 124

Wozu brauchen wir Roboter?

Nachdem sich in den vierziger Jahren die Nutzung der Atomenergie mit Hilfe der gesteuerten Spaltreaktion von Uran- und Plutoniumkernen als möglich erwiesen hatte, wurden Kernforschung und Kerntechnik zu einem Grundpfeiler des technischen Fortschritts. Die Stoffe allerdings, mit denen man es hier zu tun hat, sind meist radioaktiv. Sie bedrohen Gesundheit und Leben des Menschen. Dennoch ist bei Arbeiten mit radioaktiven Stoffen und an Kernreaktoren für die Bedienung von Maschinen und Geräten, die sich in radioaktiven Zonen befinden, in der Regel die Teilnahme des Menschen erforderlich. Sie sind zu vielfältig, als daß man ihre Ausführung allein Automaten übertragen könnte.

Deshalb mußten Geräte entwickelt werden, die als »mechanische Hände« (Manipulatoren) unmittelbar in der Reaktorkammer, in der »heißen« Zone, in einem isolierten Raum, also überall dort eingesetzt werden können, wo dem Menschen der Zutritt verwehrt ist. Für den Menschen bleibt dann die Rolle des Operators: Er steuert die technischen Geräte, denen er bestimmte Funktionen seines Körpers überträgt, und bleibt dabei in sicherem Abstand von der Gefahrenzone. Durch eine dicke Betonwand verläuft ein Stahlrohr, an dessen beiden Enden die künstlichen Arme gelenkig aufgehängt sind. Ein Paar mechanischer Hände hat der Operator vor sich, und ein zweites Paar, das die Bewegungen des ersten Paares wiederholt (kopiert), befindet sich in der Gefahrenzone. Die entsprechenden Glieder dieser Arme sind über Stahlbänder oder -seile zur Bewegungsübertragung paarweise miteinander verknüpft. Ein Spezialfenster, das für radio-

aktive Strahlung undurchlässig ist, erlaubt es dem Operator, die Bewegung der Arbeitshände zu sehen und diese zu steuern.

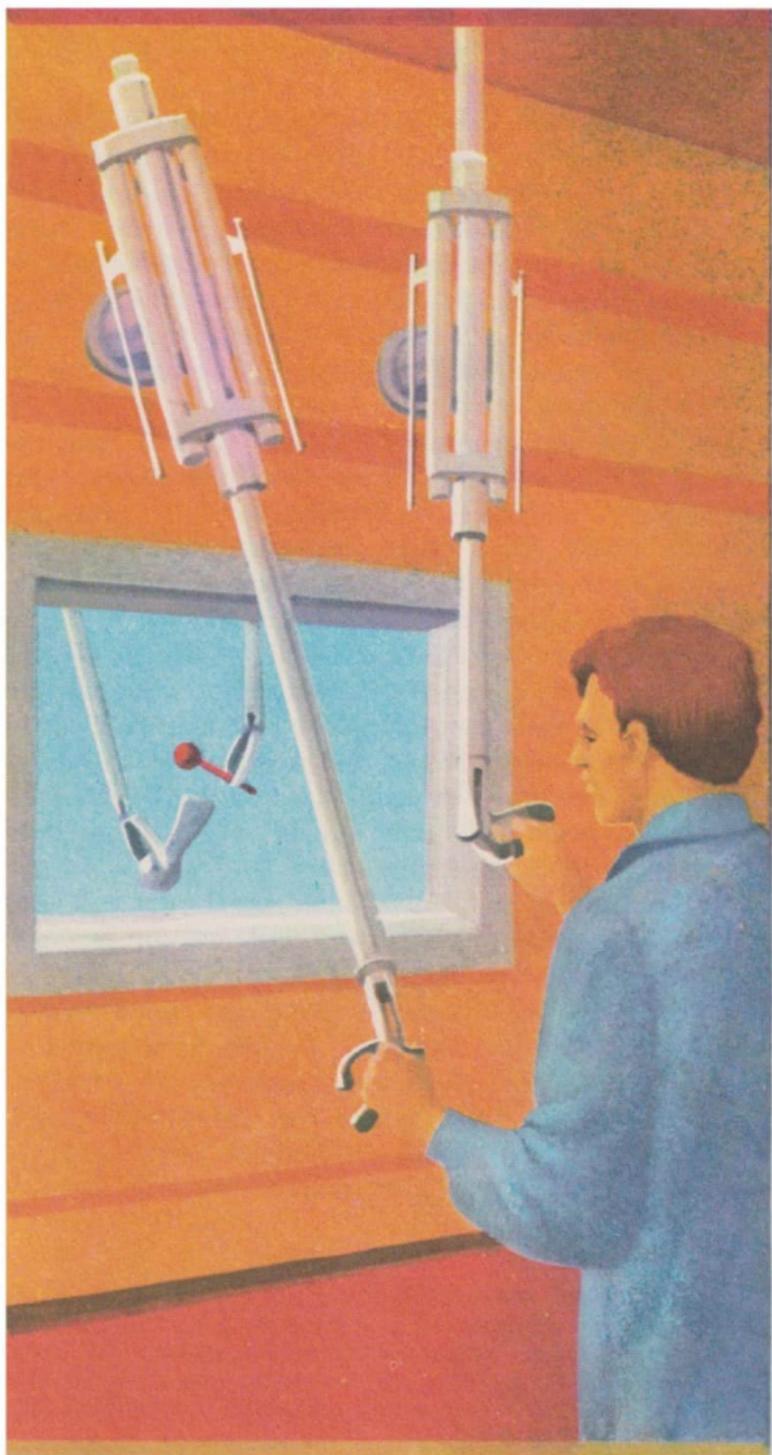
Aber auch in vielen anderen Bereichen begegnen uns automatische Helfer des Menschen. Da an sie immer höhere Anforderungen gestellt werden, ergeben sich auch immer wieder neue Probleme. Selbst im Alltag gibt es für sie viele Beispiele. – Wir stehen vor einem Getränkeautomaten. Lohnt es sich überhaupt, darüber zu sprechen, wie wir uns seiner bedienen? Wir nehmen eine Münze aus der Tasche und stecken sie in den Schlitz. Etwa in der gleichen Art arbeiten zahlreiche andere Verkaufsautomaten. Wissenschaftler und Ingenieure sind heute bemüht, die Bedienung vieler Automaten in allen Bereichen der Technik etwa nach diesem Schema zu gestalten.

Das Problem eines Menschen, der Limonade aus einem Automaten zu trinken wünscht, ließe sich noch weiter vereinfachen. Man könnte den Automaten beispielsweise mit einer mechanischen Hand ausstatten, die aus den Taschen des wartenden Kunden eine geeignete Münze heraussucht und selbst einwirft. Und es wäre dann keine Überraschung mehr, wenn eine andere mechanische Hand uns den gefüllten Becher an den Mund setzte. Wir bräuchten nur noch zu schlucken. Technische Spielereien dieser Art werden wir uns aus verständlichen Gründen auch in Zukunft ersparen. Sie sind sinnlos.

Es gibt allerdings Bereiche, in denen mechanische Hände unumgänglich sind. Die Kosten für ihre Entwicklung und Verbesserung sind sowohl technisch als auch wirtschaftlich gerechtfertigt.

Dreher, Fräser oder Schleifer sind hochqualifizierte Arbeiter. Aber sie müssen auch heute noch oft das Werkstück selbst einspannen und nach der Bearbeitung wieder ausspannen. Viele Werkstücke haben eine beträchtliche Masse: 10, 30 oder 50 kg. Da der Bearbeitungsprozeß meist nur wenige Minuten beansprucht, wird das Ein- und Ausspannen zum Problem.

Stahlhände in der Strahlungshölle, gleichsam »verlängerte« Organe des Menschen



Warum aber sind die Mechanisierung und Automatisierung des Ein- und Ausspannens solcher Werkstücke schwierig?

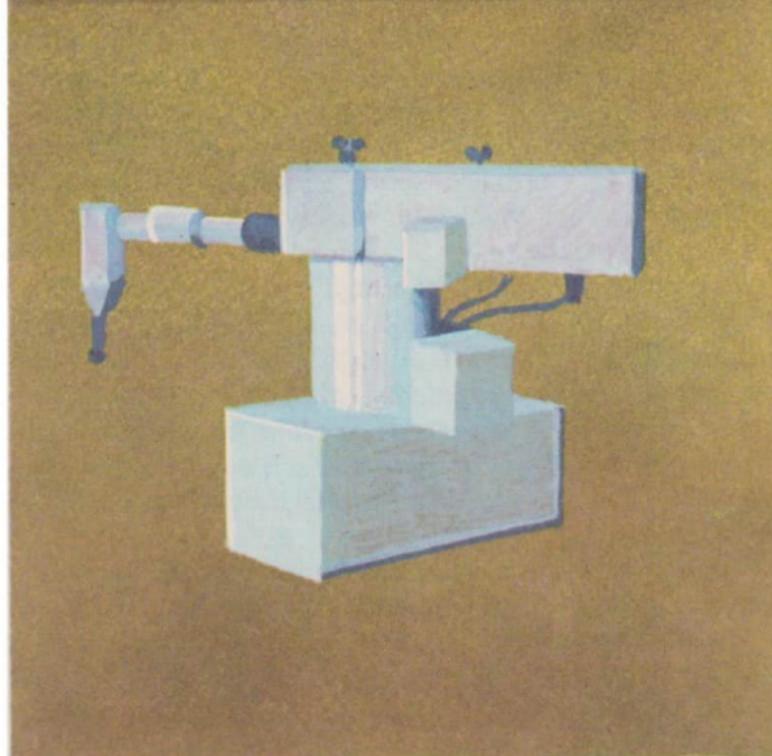
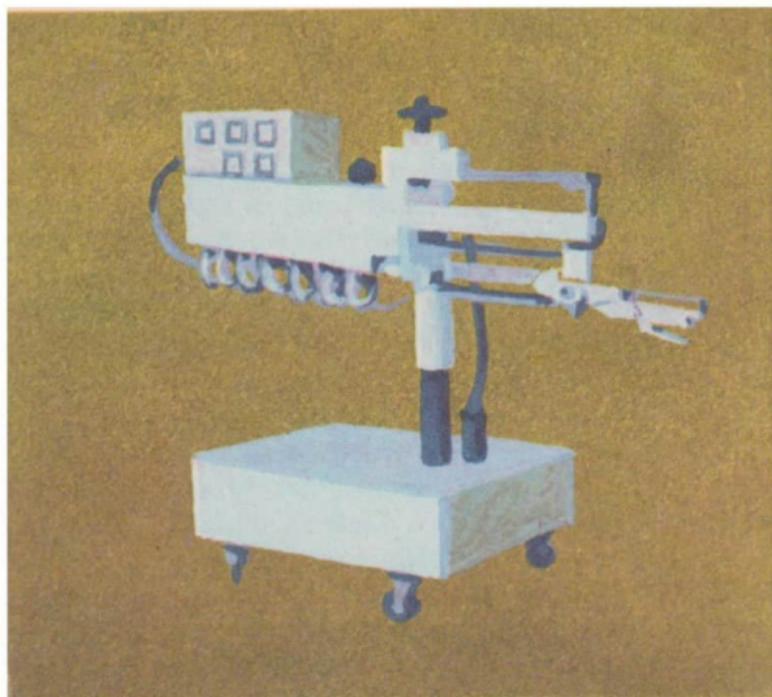
Wenn man genau hinsieht, dann bemerkt man, daß die so einfach anmutenden Ein- und Ausspannoperationen sehr komplizierte Bewegungen erfordern, die von Form und Größe der Erzeugnisse abhängen und sich beim Übergang von einem Erzeugnis zum anderen meist ändern.

Können die geschickten Hände des Menschen, die diese Prozesse bewältigen, überhaupt »ersetzt« werden? Tatsächlich gibt es auch dafür bereits seit längerer Zeit technische Hilfsmittel.

»Mechanischen Händen« hat sich in den verschiedensten Bereichen ein kaum noch überschaubares Einsatzgebiet eröffnet. Sie werden vor allem dort angewandt, wohin der Mensch entweder nur unter Aufbietung aller ihm zur Verfügung stehenden technischen Mittel oder überhaupt nicht gelangen kann.

Wie ungeheuer schwierig ist es, die unermeßlichen Tiefen der Ozeane zu ergründen! Für einen Freitaucher ist schon bei 35 m Tiefe normalerweise eine Grenze gesetzt. (Geübte Sporttaucher haben ohne Atemgerät allerdings sogar eine Tiefe um 70 m erreicht.) Je tiefer der Mensch hinabtaucht, desto mehr wird der Brustkorb zusammengepreßt: Alle 10 m nimmt der Druck um 1 atm zu, so daß schon 10 m unter der Oberfläche der Druck auf das Doppelte angestiegen ist. Dieser Druck auf den Organismus bewirkt, daß sich, abhängig von der Tauchtiefe und der Dauer des Unterwasseraufenthalts, eine große Menge von Stickstoffgas im Blut löst, die bei Rückkehr zum Normaldruck in Bläschenform freigesetzt wird und zu lebensgefährlichen Verschlüssen von Blutgefäßen führt. Mit technischen Hilfsmitteln, besonderen Tauchanzügen, verweilen Taucher aber nicht nur einige Minuten, sondern

Numerisch gesteuerte Industrieroboter der Gegenwart zur Automatisierung von Handhabungsvorgängen (mit Greifern oder anderen Werkzeugen ausrüstbar). Sie übernehmen an Werkzeugmaschinen, Montagebändern, Schweißstraßen, Lackier- und Beschichtungsanlagen monotone, gesundheitsschädliche oder auch gefährliche Arbeiten.



mehrere Stunden unter Wasser, und es kommt auch vor, daß sie in Tiefen über 100 m hinabgelassen werden.

Man kann keinesfalls sagen, daß die Aufenthaltsdauer eines Tauchers unter Wasser effektiv genutzt wird. Beim Ab- und Auftauchen muß ein Druckausgleich zwischen dem Innendruck in den luftführenden Hohlräumen des menschlichen Organismus und dem wechselnden Außen- druck des Wassers erfolgen: Zu diesem Zweck müssen die Ab- und besonders die Auftauchzeit mit zunehmender Wassertiefe verlängert werden. Sie beanspruchen selbst bei verhältnismäßig geringen Tiefen einen wesentlichen Teil des Arbeitstages eines Tauchers.

Dazu kommt, daß der Arbeitsbereich von Tauchern meist nur die ufernahen Zonen des Meeres – das sogenannte Schelf (bis 200 m Tiefe) – umfaßt. Schon seit vielen Jahren wird deshalb eine intensive Arbeit zur Entwicklung von Tauchkugeln, Unterwasserfahrzeugen und Unterwasserlaboratorien betrieben.

Der Mensch läßt sich in eine Stahlkammer einschließen, in der er vor dem lebensgefährlichen Druckanstieg geschützt ist. In dieser Stahlkammer kann er auch in großer Tiefe atmen und sich bewegen. Er kann die Tiefseewelt beobachten und studieren und sich in beliebiger Richtung fortbewegen – gänzlich isoliert von dem Element, das sein Leben bedroht. Darin liegt sein Vorteil – etwa im Vergleich zu einem Taucher. Zugleich aber gerät er in die Rolle des passiven Beobachters.

Aus dieser Situation gibt es nur einen Ausweg: Das ist der Einsatz von immer vollkommeneren Robotern. Die meisten bisher gebauten oder in Bau befindlichen bemannten Unterwasserapparate, die einige Kilometer tief tauchen können, sind mit ein, zwei oder mehreren mechanischen Greifern ausgerüstet. Diese werden von Menschen bedient, die sich im Innern des Tauchapparats befinden.

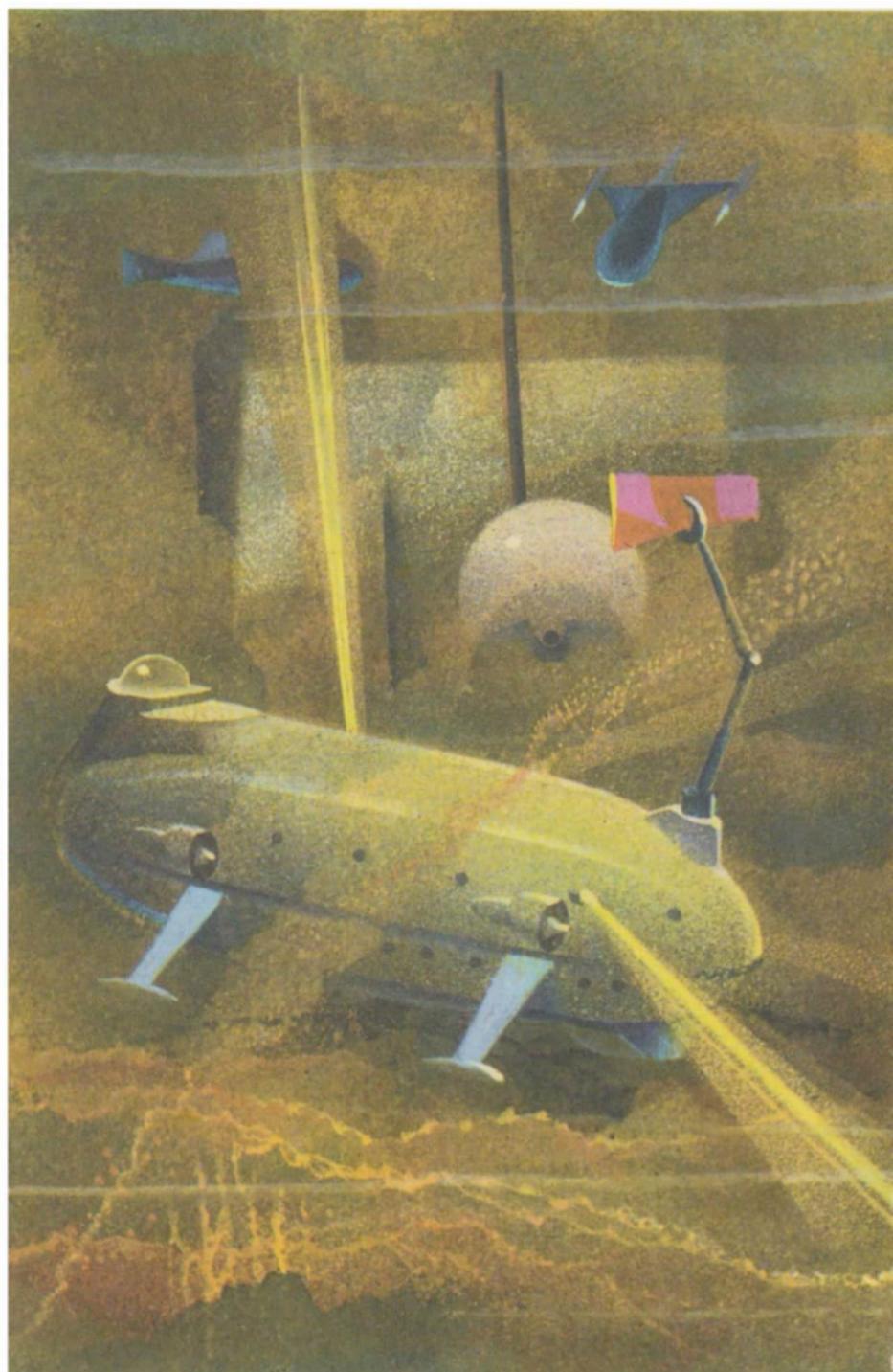
Das Manipulieren in den Tiefen des Ozeans erinnert in vielem an die Tätigkeit von Operatoren in Kernforschungslaboratorien. Ein wesentlicher Unterschied besteht aber darin, daß sich dort der Gegenstand, der ergriffen werden muß, in einer Kammer befindet, in der gleichsam die ganze Gefahr »konzentriert« ist. Der Mensch

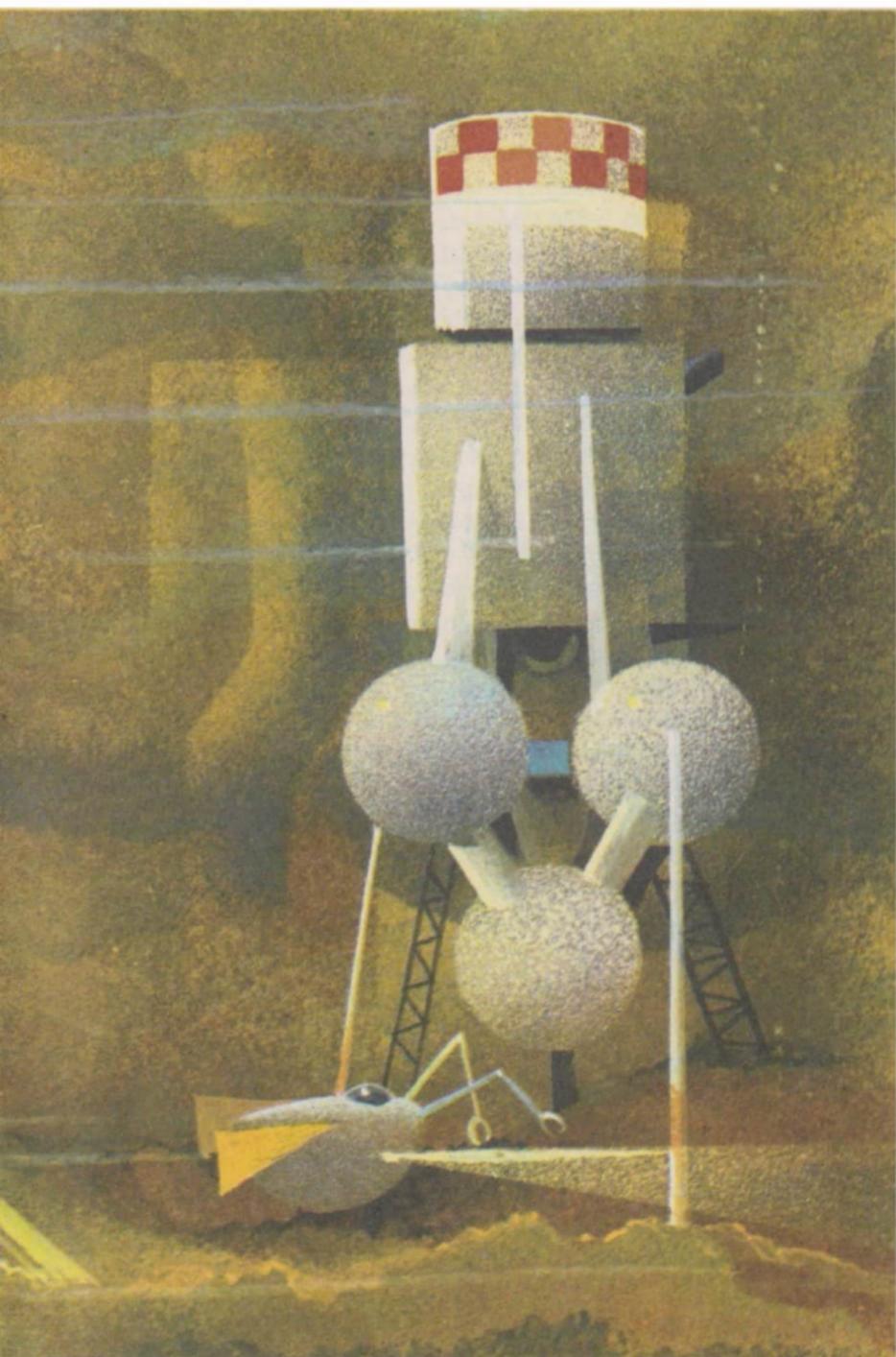
in den Tiefen des Ozeans hingegen befindet sich selbst in einer Kammer, die ihn vor einer feindlichen Umwelt schützt. Das gleiche gilt für den Aufstieg in den Weltraum.

Die Raumfahrttechnik hat aber auch schon auf der Erde ein umfangreiches »Betätigungsfeld« für den Einsatz mechanischer Hände eröffnet. So müssen bei Untersuchungen in Vakuumkammern, in denen die Verhältnisse der Hochatmosphäre oder weltraumähnliche Bedingungen modelliert werden, mechanische Greifer eingesetzt werden. Oft ist es notwendig, in der Kammer eine Umrüstung vorzunehmen, also etwas zu tun, was das Eingreifen des Menschen erforderlich macht. Befindet sich in der Kammer ein ferngesteuerter Manipulator, dann lassen sich alle Operationen sofort ausführen. Beispielsweise werden Manipulatoren in Kammern eingesetzt, in denen ideal sterile Verhältnisse herrschen, wie sie zur Untersuchung von Mondgestein notwendig sind oder auch von Bodenproben, die eines Tages von anderen Planeten zur Erde geholt werden.

Auch auf dem Mond werden Manipulatoren der unterschiedlichsten Typen Verwendung finden. Bei der Errichtung und Wartung von größeren Raumstationen werden relativ kleine, spezialisierte, bemannte oder auch ferngesteuerte Raumkapseln, die mit Manipulatoren ausgerüstet sind, bestimmte technische Arbeiten ausführen. Sie werden auch bei Reparaturen sowie zum Austausch von Bauteilen und -gruppen zum Einsatz gelangen.

Schon die ersten Erkundungen der Mondoberfläche haben gezeigt, daß »mechanische Hände« oder auch selbsttätige Roboter in dieser lebensfeindlichen Umwelt eine große Rolle spielen können. Die Handlungsfähigkeit eines von einem Raumanzug umschlossenen Menschen ist stets eingeschränkt. Ein Raumanzug für einen Mondaufenthalt z. B. ist zudem ein außerordentlich kompliziertes Gerät, im Grunde genommen eine ganze Fabrik, die dem einzigen Zweck dient, dem Kosmonauten volle Selbständigkeit zu gewährleisten. Dieses autonome Lebenserhaltungssystem ist unvergleichlich komplizierter als





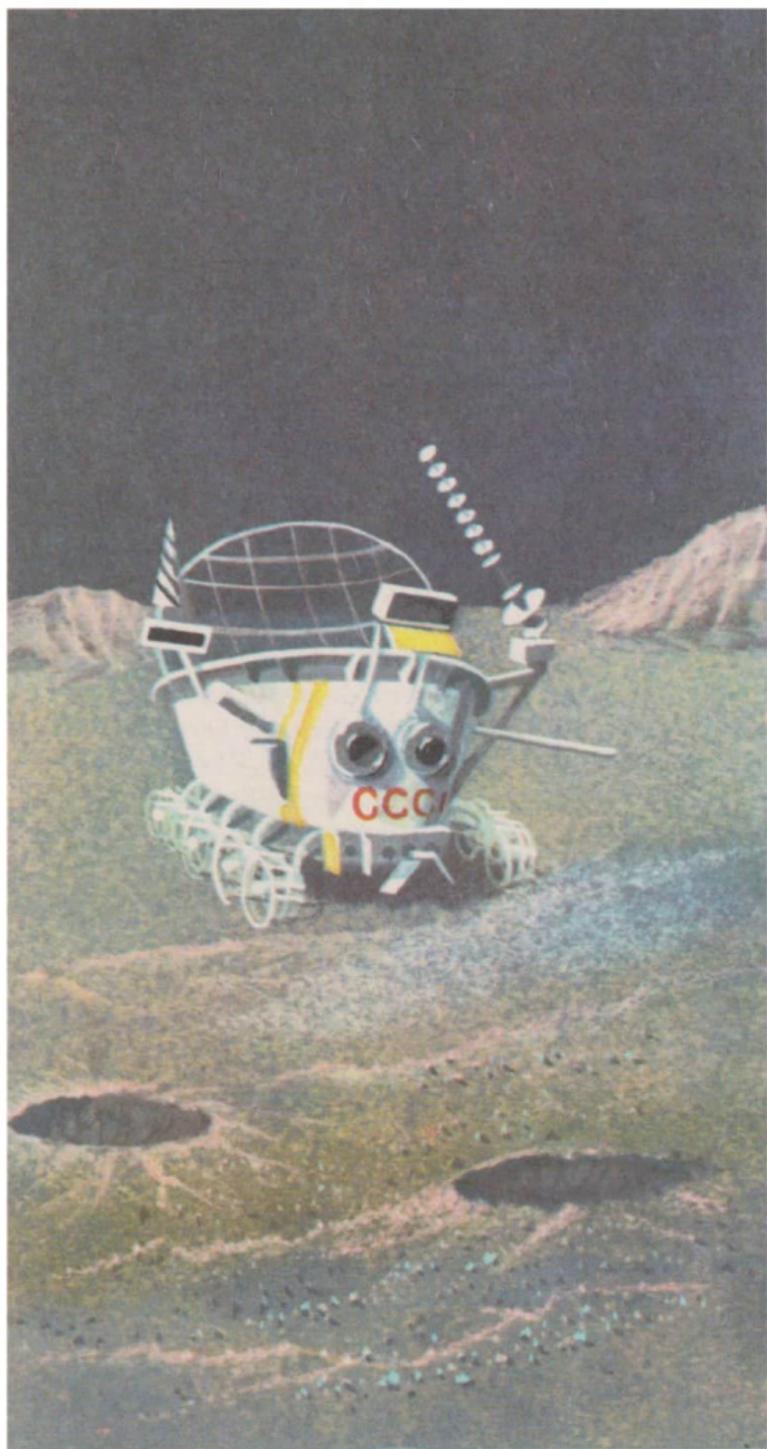
ein Tauchanzug, und es behindert den Menschen bei seinen Bewegungen weitaus mehr. Für Expeditionen zu den Planeten des Sonnensystems reichen derartige Schutzanzüge ohnehin nicht aus. Auf den Planetenoberflächen werden besondere Beförderungsmittel erforderlich sein. Sie sind vom Grundgedanken her den bereits heute für Unterwasserarbeiten verwendeten Mitteln ähnlich, weichen aber in Aufbau und Konstruktion gänzlich von diesen ab. Die Besatzung wird in diesen Geräten leben und arbeiten, während sie mit der Außenwelt über Manipulatoren in Verbindung tritt. Höchstwahrscheinlich wird man jedoch bei den ersten derartigen Reisen auf die unmittelbare Mitwirkung des Menschen verzichten müssen. Die Kundschafter der Erde werden Roboter sein.

Die erste derartige Einrichtung war der ferngesteuerte, halbautomatische Apparat »Lunochod 1«, der am 17. November 1970 von der Landstufe des Raumflugkörpers »Luna 17« auf der Mondoberfläche abgesetzt wurde und sein Forschungsprogramm aufnahm. Seine irdische »Besatzung« lebte und arbeitete unter gewohnten Bedingungen auf dem Territorium der Sowjetunion. Sie »fuhr« dabei Woche für Woche, Monat für Monat die vorgesehenen Abschnitte der Mondoberfläche ab oder verharrte längere Zeit an einer Stelle.

Und in Zukunft? Technische Mittel werden vervollkommnet, wobei ihr Wirkungsbereich, ihre Zuverlässigkeit, ihre Wirtschaftlichkeit – ganz allgemein: ihre Möglichkeiten – ständig verbessert bzw. erweitert werden. In ihrer Wirkungsweise werden sie sich immer weniger von der unmittelbaren Tätigkeit eines Menschen unterscheiden. Für ferngesteuerte, halbautomatische bzw. auch autonom tätige automatische Apparate sind mechanische Hände ein wichtiges, wenn nicht überhaupt das einzige Mittel, aktiv in die Umgebung einzugreifen.

Aber es gibt nicht nur Apparate, die den Menschen bei der Ausführung schwerer und gefährlicher Arbeit ersetzen und in Bereichen und Zonen tätig sind, zu denen der Mensch keinen Zutritt hat. Es gibt auch solche, die nur in

»Lunochod 2« operierte Anfang 1973 am Ostrand des »Meers der Heiterkeit«



direkter Verbindung mit dem Menschen ihre volle Wirkung entfalten. In der Medizin z. B. haben Untersuchungen im Zusammenhang mit der Entwicklung von Prothesen und orthopädischen Apparaten eine intensive Entwicklung erfahren.

Eine Prothese kann eine verlorene Extremität ersetzen. Sie hilft dem Menschen unter anderem dabei, Bewegungen auszuführen, die er wegen teilweiser oder vollständiger Amputation gar nicht oder nur schwer ausführen kann. Beispielsweise wurden Handprothesen entwickelt, die man als »mechanische Hände« bezeichnen kann.

Von den bereits erwähnten Manipulatoren unterscheiden sich die Prothesen jedoch durch eine wesentliche Besonderheit.

Bei Manipulatoren wird die Frage nach den Energiequellen und den Steuerungssignalen, die zur Ausführung der Bewegungen erforderlich sind, auf traditionellem Wege gelöst: Die Steuerung erfolgt durch die Hand des Operators oder mit Hilfe einer automatischen Vorrichtung. Die Energie wird durch äußere Energiequellen geliefert. Bei einer Amputation verliert der Mensch jedoch gleichzeitig mit einem Teil des Skelett- und Muskelapparats auch den in der betreffenden Extremität liegenden Teil seines Nervensystems. Unter Benutzung der technischen Terminologie könnte man sagen, daß er sowohl die Ausführungsmechanismen des Systems als auch ihre Antriebe und den Steuerungsblock für diese Antriebe verliert.

Die Hand ist das Hauptwerkzeug des Menschen für seine aktive Einwirkung auf die Umgebung. Sie ist ungewöhnlich flink und beweglich. Naturgemäß kann diese Bewegungsfunktion durch eine Prothese nur in einem sehr bescheidenen Umfang wiederhergestellt werden, wie er für die Selbstversorgung des Amputierten oder für bestimmte Verrichtungen in Haushalt und Produktion notwendig ist. Aber selbst mit dieser Einschränkung ist die Entwicklung einer aktiven Handprothese ein sehr kompliziertes biotechnisches Problem, und es wird auch durch die hohen Anforderungen erschwert, die an Gewicht, Abmessungen, Zuverlässigkeit sowie auch an die kosmetischen Eigenschaften gestellt werden. Prothesen sollen ja Bewegungen

ausführen, die den Bewegungen der natürlichen Extremitäten des Menschen ähneln. Bei der Entwicklung solcher Konstruktionen werden deshalb bestimmte Lösungen der Natur entlehnt.

Alle Lebewesen haben sich durch die Ausbildung eines geeigneten Stütz- und Bewegungsapparats ihrer Umgebung angepaßt. Sie vermögen dadurch die meisten Hindernisse zu überwinden, die ihnen unter natürlichen Bedingungen begegnen können. Felsen, Schluchten, Sandwüsten, umgestürzte Bäume, die schlammigen Ufer von Flüssen und Seen, eine Schneedecke oder Eisberge können ein auf Füßen gehendes Wesen zwar behindern, aber nicht aufhalten. Muß es nicht Erstaunen erregen, daß der Mensch bei der Entwicklung der unterschiedlichsten Transportmittel einen Weg eingeschlagen hat, der dem von der Natur gewählten Weg geradezu entgegengesetzt ist? Anstatt die Natur zu kopieren und den Stütz- und Bewegungsapparat seiner Fahrzeuge an die Bewegung über das natürliche Relief anzupassen, erfand er als universelles Fortbewegungsmittel das Rad, und er begann, seine natürliche Umgebung dem Rad anzupassen, indem er Straßen, Schienentrassen und Autobahnen baute. Wir sind daran gewöhnt und haben meist keinen Anlaß, darüber zu reden, daß ein Graben von nur 1 m Breite auch für das moderne Kraftfahrzeug ein unüberwindliches Hindernis ist. So wären wir in unseren Tagen möglicherweise gar nicht darauf gekommen, besonders intensiv über die Frage nachzudenken, wie man die Geländegängigkeit unserer Transportmittel entscheidend verbessern könnte. Obwohl auf der Erde noch genügend Gelände vorhanden ist, über das kein Rad rollen kann, war das Problem der Entwicklung »schreitender Maschinen« nicht aktuell. Da jedoch die Fortbewegung auf der Mondoberfläche – und in Zukunft auch auf der Oberfläche anderer Planeten – zu einer realen Notwendigkeit geworden ist, wandten sich die Wissenschaftler und Ingenieure diesem Problem mit großer Aufmerksamkeit zu. In den letzten Jahren entstand eine Reihe von geländegängigen Apparaten, die neben verschiedenen Varianten von radbestückten Fahrgestellen (»Lunochod 1« und »Lunochod 2«) auch Schreitmechanismen benutzen.

Geisterhände?

Einfädeln ist doch ein Problem

Um einen Knopf anzunähen, muß man zunächst eine Nadel einfädeln. Jeder weiß, daß dies ohne Übung nicht so einfach ist, wie es auf den ersten Blick erscheint.

Die dazu notwendigen Manipulationen gliedern sich in zwei Gruppen: das Einstellen von Nadel und Faden in einen günstigen Arbeitsbereich und die eigentliche Prozedur des Einfädelns.

Diese Handlungen lassen sich so beschreiben, als würden sie nicht von lebenden Händen ausgeführt, sondern von Mechanismen, die aus mehreren beweglich miteinander verbundenen Gliedern aufgebaut sind.

Jeder Teil des Armes – Oberarm, Unterarm und Hand – muß zu diesem Zweck als ein mechanisches Glied gleicher Länge wie der lebende Prototyp hergestellt werden. Danach sind diese Glieder so zu verbinden, daß sie gegeneinander ebenso bewegt werden können wie die Glieder des lebendigen Armes.

Jeder kann sich selbst davon überzeugen, daß sich der Oberarm bei unbeweglichem Rumpf in drei senkrecht zueinanderstehenden Achsen bewegen läßt. Mit anderen Worten: Das Schultergelenk besitzt drei Freiheitsgrade. Das Ellbogengelenk hat nur einen Freiheitsgrad; Oberarm und Unterarm liegen stets in einer Ebene und können relativ zueinander nur um eine Achse geschwenkt werden, die senkrecht zu dieser Ebene verläuft. Die Hand dagegen kann in Beziehung zum Unterarm wiederum in drei Richtungen bewegt werden; beide sind gewissermaßen durch ein Kugelgelenk miteinander verbunden, eine Kopplung,

die drei Freiheitsgrade besitzt. Wir verstehen also unter Freiheitsgrad die durch die unterschiedliche Konstruktion der Gelenke gegebenen Bewegungsmöglichkeiten der Elemente eines starren Körpers.

Die drei großen Armgelenke verleihen der Hand demnach sieben Freiheitsgrade.

Beachten Sie bitte, daß wir bisher noch nichts über die Beweglichkeit der einzelnen Finger gesagt haben, in der Annahme, daß Sie die Nadel beim Einfädeln wie ein Anfänger krampfhaft zwischen dem Daumen und den übrigen vier Fingern halten.

In unserem Beispiel wird die lebendige Hand damit nur als ein einfacher Greifer nach der Art einer Flach- oder

Jeder Gegenstand kann in drei zueinander senkrechten Richtungen, d.h. längs dreier Achsen bewegt und außerdem relativ zu diesen Achsen geschwenkt werden.



Kneifzange dargestellt. Der Greifer selbst fügt diesem Mechanismus nur einen einzigen Freiheitsgrad hinzu, den achten, der dann eingeschaltet wird, wenn das Manipulierungsobjekt – in unserem Beispiel die Nadel – ergriffen oder losgelassen werden soll.

Doch wie ist es bei der lebendigen Hand? Jeder Finger, ausgenommen der Daumen, besteht wiederum aus drei Gliedern, die relativ zueinander gebeugt werden können. Außerdem läßt sich jeder Finger in der Ebene der Handfläche von seinem Nachbarn hinweg- und wieder zu ihm hinbewegen. Der Daumen besteht nur aus zwei Gliedern, verfügt dafür jedoch – in bezug auf die Handfläche – zum Unterschied von den übrigen Fingern nicht nur über einen, sondern über zwei Freiheitsgrade. Zu den bereits erwähnten sieben Freiheitsgraden kommen also weitere zwanzig hinzu.

Das ist eine ungefähre Abschätzung der natürlichen Beweglichkeit, die allen Bewegungen unseres Armes Gleichmäßigkeit und Flexibilität verleiht. Die Hand ist ein universeller Mechanismus, der eine Nadel oder einen Bleistift, eine Handvoll Sand oder eine Prise Salz, einen Kieselstein oder ein Eisenblech, einen Bohrer oder eine Feile zu ergreifen vermag. Doch die Hand kann diese Gegenstände nicht nur schlechthin packen, sondern außerdem auch komplizierte Verrichtungen mit hoher Exaktheit ausführen. Und wenn es notwendig ist, wird auch die zweite Hand in die Arbeit einbezogen – ein weiterer lebendiger Mechanismus, der gleichfalls über 27 Freiheitsgrade verfügt.

Diese außerordentlich große Beweglichkeit der Hand, die sich im Laufe von Jahrhunderttausenden durch die Arbeit ausgebildet hat, erlaubt es dem Menschen, die unterschiedlichsten Tätigkeiten auszuüben.

Bei der Entwicklung von Manipulatoren – von »mechanischen Händen« – stellt man sich jedoch nicht die Aufgabe, die Konstruktion des Armes genau zu kopieren. Es wird auch nicht die Forderung erhoben, daß jene »unendliche« Vielfalt von komplizierten Bewegungen, die der lebendige Arm zu realisieren vermag, von diesem einen technischen Gerät reproduziert werden muß. Unter einem Manipulator verstehen wir deshalb ein technisches Gerät,

das nur einige bestimmte Bewegungsfunktionen der oberen Extremitäten (Arme) des Menschen reproduzieren soll.

Wir werden sehen, daß diese Einschränkungen in der Funktionsfähigkeit des »mechanischen Armes« gerade die »Hand« betreffen, die in der Regel in Form eines einfachen Greifers ausgeführt wird. Was dagegen die Beweglichkeit der »großen Gelenke« des Manipulators betrifft, so kann sie gewöhnlich mit der Beweglichkeit der natürlichen Extremität verglichen werden.

Marionetten

Jeder kennt die Spielpuppen, an deren beweglichen Gelenken (an den Schultern, der Hüfte, an den Knien, am Hals, an den Ellbogen, den Handgelenken und den Füßen) Fäden befestigt sind, die am anderen Ende an einem Steuerungsmechanismus hängen; dieser stellt bei älteren Spielpuppen eine Art hölzernes Kreuz dar, das aus einem vertikal angeordneten Handgriff und ein bis zwei beweglichen Querstäben besteht, die – relativ zum »Handgriff« – Pendel- und Drehbewegungen ausführen können.

Der Handgriff dieses »Mechanismus«, dieses »Führungskreuzes«, spielt die Rolle einer Basis; an ihm werden der Kopf oder der Rumpf der Puppe befestigt. An den Querhölzern bindet man jene Fäden an, die zu den beweglichen Gelenken führen.

Der Puppenspieler versetzt die Querstäbe in Pendel- und Drehbewegungen und veranlaßt die Marionette, die er gewissermaßen am Zügel hält, Bewegungen mit den Armen und Beinen auszuführen. Indem er die Querhölzer rasch neigt oder wieder aufrichtet, werden die einen oder anderen Fäden einmal emporgezogen und ein anderes Mal wieder heruntergelassen. Entsprechend diesem rasch ablaufenden »Programm« tanzt die Puppe oder wischt sich die Tränen aus den Augen. Ihre Arme und Beine »wiederholen« also die Fingerbewegungen des Puppenspielers; seine Sache ist es, mit diesen Bewegungen menschliche Handlungen und Empfindungen zum Ausdruck zu bringen.

Warum haben wir an dieser Stelle die Marionetten erwähnt? Etwa die gleiche Steuerungs-idee wird bei vielen

Konstruktionen sogenannter kopierender Manipulatoren angewendet. Der Operator, der an einem derartigen Gerät arbeitet, setzt wie der Puppenspieler mit der Hand einen Steuerungsmechanismus in Bewegung, dessen Glieder mit den Gliedern des Ausführungsmechanismus ungefähr in der gleichen Art verknüpft sind wie das Führungskreuz mit der Puppe. Und ähnlich dem Puppenspieler baut der Operator im Steuerungsprozeß seine Bewegungen so auf, daß die Ausführungsmechanismen, die diese Bewegung kopieren, das gesamte Handlungsprogramm bestmöglich ausführen.

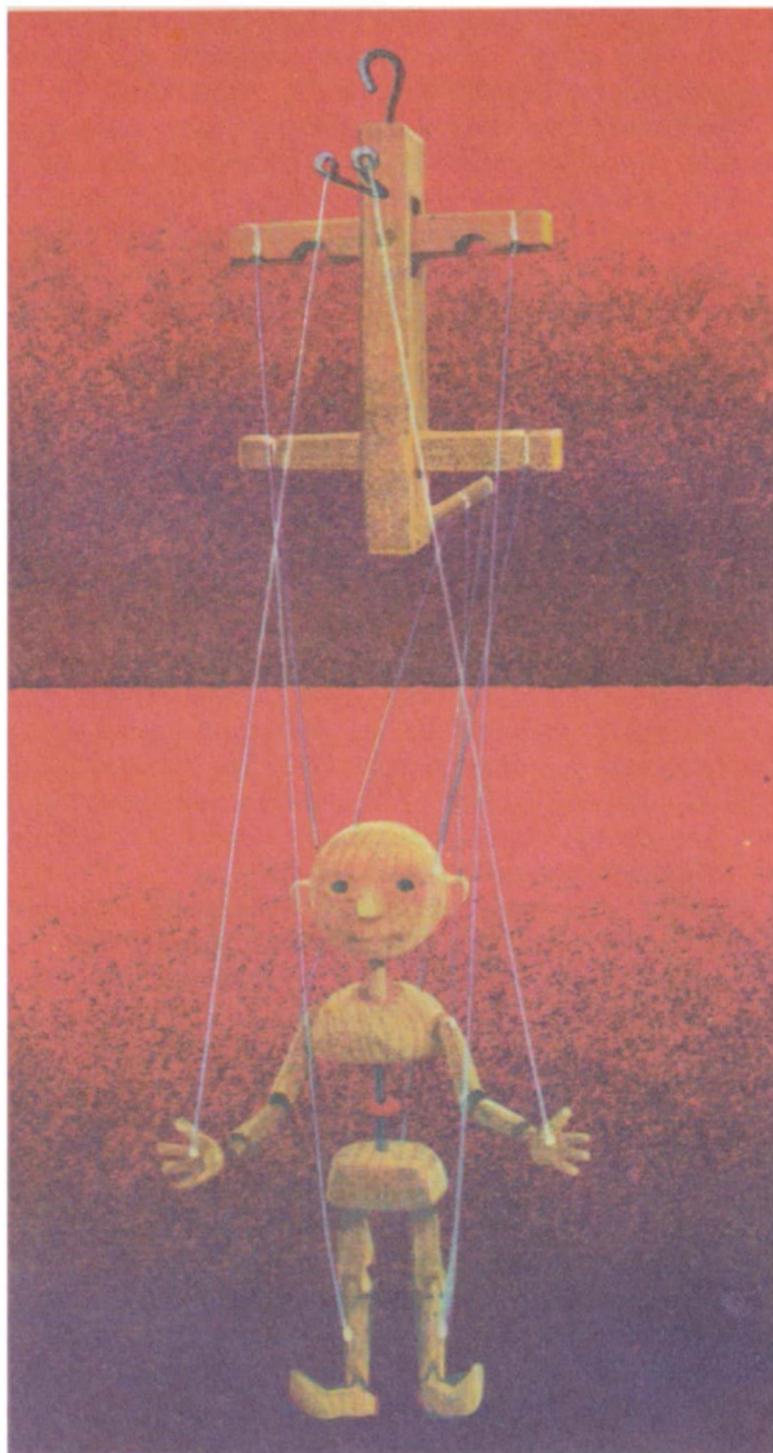
So ist die Idee, die den kopierenden Manipulatoren zugrunde liegt, alles andere als neu. Aber lassen Sie uns nun einmal selbst sehen, in welchem Maße sich ein moderner kopierender Manipulator von den altertümlichen Marionetten unterscheidet.

Mit »Gefühl« geht es besser

Die Gesamtheit jener Probleme, für deren Lösung Manipulatoren eingesetzt werden, kann man folgendermaßen charakterisieren: Der mit dem Manipulator als »Partner« arbeitende Mensch soll ein in einer bestimmten Entfernung liegendes Objekt ergreifen, an den gewünschten Ort befördern und es dort in einer bestimmten Richtung niederlegen (orientieren). Wir wissen bereits, daß der Ausführungsarm des Manipulators zu diesem Zweck mindestens sieben Freiheitsgrade benötigt: sechs Freiheitsgrade für die Ausführung der Ortsveränderungs- und Orientierungsbewegungen und einen Freiheitsgrad für das Ergreifen des Objektes. Hinter diesem anscheinend gar nicht komplizierten Problem verbergen sich jedoch mehrere Forderungen, durch die mechanische Arme zu einem höchst komplizierten technischen Problem werden.

Die Ausführungsarme des Manipulators und der Operator handeln über eine bestimmte Entfernung hinweg (in einer bestimmten Entfernung voneinander). Bei der Arbeit

Marionette mit Führungskreuz, wie es der Schöpfer SpejBELS und Hurvineks, Prof. Josef Skupa, entwickelt hat



mit radioaktiven Stoffen kann diese Entfernung einige Meter oder einige zehn Meter betragen. Bei Unterwasserarbeiten können es dagegen sogar einige zehn, einige hundert und auch einige tausend Meter sein. Beim Einsatz von Manipulatoren im Weltraum werden diese Entfernungen nach Hunderttausenden oder Millionen von Kilometern gemessen. Die zuverlässige und exakte Fernübertragung von Bewegungen ist die erste Forderung, die an jede Konstruktion eines kopierenden Manipulators gestellt wird.

Der Mensch, der mit seiner Umwelt in Wechselwirkung tritt, ist nicht nur gezwungen, ständig die unterschiedlichsten Bewegungen auszuführen, sondern er muß außerdem die bei diesen Bewegungen auftretenden Kräfte lenken und dosieren. So muß beim Anziehen einer Mutter eine Kraft am Schraubenschlüssel angreifen, die sich erheblich von der Kraft unterscheidet, die etwa erforderlich ist, ein rohes Ei in den Fingern zu halten. In der gleichen Weise muß ein Operator imstande sein, beim Betätigen der »mechanischen Hände« Größe und Richtung der Kräfte zu steuern, die bei der einen oder anderen Operation am Manipulierungsobjekt angreifen. Die Möglichkeit, dosierte Kräfte zu übertragen und hinreichend exakt zu reproduzieren, ist also eine weitere Forderung, die an Manipulatorkonstruktionen gestellt wird.

Der Mechanismus, den der Mensch selbst zur Dosierung seiner Kräfte benutzt, ist ebenso wie die anderen Mechanismen seiner willkürlichen Tätigkeit vorläufig noch sehr wenig erforscht. Wieso wir ein zerbrechliches Ei halten können, ohne es zu zerdrücken oder fallen zu lassen, kann uns niemand ausreichend erklären. Eines ist jedoch klar: Bei der Ausführung aller Handlungen benutzt der Mensch Informationen, die ununterbrochen von seinen Sinnesorganen aufgenommen werden.

In der Haut (in besonders großer Anzahl an den Fingerspitzen) befindliche Rezeptoren erzeugen das Tastgefühl. Andere Rezeptoren in den Skelettmuskeln, Sehnen und Bändern produzieren beim Zusammenziehen und Dehnen der Muskeln entsprechende Signale. Diese Signale erreichen das Zentralnervensystem und lösen unklare Empfindungen aus, die I. M. Setschenow als »dunkles

Muskelgefühl« bezeichnet hat. Diese Informationen ermöglichen es dem Menschen, seine Bewegungen und Kräfte, den jeweiligen Erfordernissen entsprechend, zu »dosieren«.

Der Operator steuert den Manipulator und beobachtet die von den mechanischen Armen reproduzierten Bewegungen entweder unmittelbar oder über eine Fernscheinrichtung. Er vergleicht die beobachtete Lage und Geschwindigkeit der »Arme« ständig mit der gewünschten Lage und der gewünschten Geschwindigkeit und vollführt kontinuierlich die notwendigen Korrekturen.

Häufig ist eine derartige visuelle Rückkopplung, die sich ja nur auf die Lageänderung bezieht, ungenügend. Wo Kräfte dosiert werden müssen, bedarf das Steuerungssystem der Ergänzung durch eine Rückkopplung in bezug auf die aufgewendeten Kräfte. Am einfachsten lassen sich hierfür die natürlichen Informations»kanäle« des Operators verwenden. Man muß dem Manipulator also »Gefühl« verleihen, ihn »sensibel« machen. Die im Prozeß der Manipulierung entstehenden bzw. sich verändernden Kräfte müssen ganz oder teilweise auf die Hand des Operators »übertragen« werden. Damit jedoch die Mechanismen und Vorrichtungen des Manipulators diese Fähigkeit erlangen, müssen die Antriebsglieder und die angetriebenen Glieder leicht austauschbar oder umkehrbar (reversibel) sein, d. h., die Antriebsglieder müssen zu angetriebenen Gliedern und die angetriebenen Glieder zu Antriebsgliedern werden. Die »Sensibilisierung« des Manipulators ist also eine weitere Grundforderung, die häufig an seine Konstruktion gestellt wird.

Alle diese Forderungen sind darauf gerichtet, die Steuerung des Manipulators der Bewegungssteuerung einer natürlichen Extremität so weitgehend wie möglich ähnlich zu machen. Dann wird der Operator imstande sein, seine Aufmerksamkeit auf das zu konzentrieren, was er zu tun hat, und nicht darauf, wie er den Manipulator veranlassen könnte, dies zu tun. Der Operator muß mit den mechanischen Armen genau so handeln können wie mit seinen eigenen. Er muß ihre Handlungen »fühlen«, wie er die Tätigkeit seiner eigenen Hände fühlt. Nur unter dieser Voraussetzung wird der Manipulator nicht mehr nur die

Bewegungen der Arme des Operators kopieren, sondern vielmehr jenes Bewegungsprogramm, das der Mensch gedanklich formiert.

Noch ein weiterer Umstand muß im Auge behalten werden, wenn man Klarheit über die Wirkung solcher kopierender Manipulatoren gewinnen will. Beim Steuerungsprozeß setzt der Operator alle Glieder des Steuerarmes in Bewegung, obwohl seine Hand nur auf das Endglied, den Griff, einwirkt. Dieser Handgriff besitzt Aufnehmer für den Daumen und den Zeigefinger, die das Öffnen und Schließen des Greifers am Ausführungsarm steuern. Also muß der Manipulator so konstruiert sein, daß er sich durch einige voneinander unabhängige Bewegungen und die entsprechenden Kraftaufwendungen mit einer Hand bequem steuern läßt. Mit anderen Worten: Der Operator realisiert das gesamte Steuerungsprogramm in Form eines »Kodes« von Handbewegungen. Der Manipulator muß gut steuerbar sein und leicht und exakt mit diesem Kode funktionieren.

Ideal wäre ein mechanischer Arm, der alle Bewegungen und Kräfte des Operators über jede beliebige Entfernung genau wiederholte und ihre Ausführung gleichzeitig an die Hand des Operators zurückmeldete. Solche idealen Konstruktionen gibt es jedoch nicht. Der Operator ist gezwungen, sich im Steuerungsprozeß an die Besonderheiten des Manipulators anzupassen. Er muß nicht nur die – im Vergleich zur natürlichen Extremität – ungenügende Beweglichkeit, sondern auch alle jene Faktoren kompensieren, die durch die beträchtliche Eigenmasse der Konstruktion, durch zusätzliche Reibungskräfte, tote Gänge und Spiele unvermeidlich sind. Gelingt es, die Konstruktion immer mehr zu vervollkommen, so könnten die negativen Auswirkungen dieser Erscheinungen beträchtlich verringert werden. Zwei Mängel lassen sich jedoch bei diesen mechanischen Greifern nicht beseitigen: Der eine besteht in der begrenzten Entfernung, über die eine Bewegung übertragen werden kann, der zweite ist mit der Einschränkung der Belastbarkeit eines Manipulators verknüpft, die sich aus der begrenzten körperlichen Leistungsfähigkeit des Operators selbst ergibt.

Die mechanische Verbindung ist vermutlich das ein-

fachste Verfahren für die Übertragung von Bewegungen, doch kann die Entfernung hierbei höchstens einige Meter betragen, weil bei größeren Entfernungen Dehnung und Biegung der Bänder und Seile zu groß werden, so daß darunter die Genauigkeit der Bewegungsübertragung leidet. Mechanische Manipulatoren sind gewöhnlich für die Arbeit mit Gegenständen mit einer Masse von etwa 7 bis 8 kg gedacht. Das liegt nahe bei dem Höchstgewicht, mit dem ein Mensch längere Zeit hantieren kann. Damit der Operator nicht durch die Eigenmasse der Konstruktion belastet wird, müssen besondere Gegengewichte angebracht sein, die das Gewicht des Systems kompensieren. Jedoch ist das recht schwierig, weil sich ja nun wiederum die Masse aller beweglichen Teile und somit ihre Trägheit erhöht. Wenn man diese Einschränkungen umgehen will, muß man zur Übertragung der Bewegungen von den Steuerarmen zu den Ausführungsarmen nichtmechanische Verbindungen benutzen. Darüber hinaus ist der Manipulator mit einer äußeren Energiequelle auszustatten, so daß auf den Operator nur noch die reinen Steuerungsfunktionen entfallen.

Steuern aus sicherer Ferne

Mit Hilfe eines Tasters läßt sich ein Elektromotor mit einer Leistung von einigen Kilowatt leicht einschalten. Durch das Betätigen weiterer Taster werden weitere Motoren in Gang gesetzt. Nun braucht man eigentlich nur noch die Bewegung jedes Motors auf die Glieder des Manipulators zu übertragen und sämtliche Drucktaster an einem Schaltpult anzuordnen, dann erhält man das Prinzip eines Manipulators mit Drucktastersteuerung. Die Drucktaster lassen sich leicht in einen Hebel- oder Stellgriff verwandeln, dessen allmähliche Drehung die gleichmäßige Änderung der Bewegungsgeschwindigkeit erlaubt. Nun fallen die oben dargelegten Einschränkungen bezüglich der Entfernung und der Kräfte weg. Dafür aber entstehen andere Schwierigkeiten.

Zum Beispiel werden Atomtriebwerke in menschenleeren Wüsten erprobt. Danach erfolgen die notwendigen

Untersuchungen, bei denen Triebwerk und Reaktor demontiert werden müssen. Selbst nach einer langen, intensiven »Abkühlung« behalten die Reaktoren ihre Radioaktivität bei. Die Demontage des Triebwerkes, das Auswechseln von Baugruppen und Einzelteilen müssen deshalb in isolierten Zonen erfolgen. Bei diesen Arbeiten sind Operationen an Teilen und Baugruppen erforderlich, die einige Meter lang sein können und deren Masse mehrere Tonnen beträgt. Daher müssen mechanische Arme eingesetzt werden, deren Größe und Tragvermögen Operationen an schweren und sperrigen Objekten erlauben.

Betrachten wir eine derartige Prüfstation. Ein Teil der Anlage besteht aus einer Spezialhelling von der Höhe eines vierstöckigen Hauses. An einer Wand dieses Komplexes sind massive Führungsschienen angeordnet, auf denen ein Wagen läuft, an dem die Säule eines riesigen Manipulators befestigt ist. An dieser Säule gleitet ein Basisglied auf und ab. Es besitzt also zwei Freiheitsgrade. Mit seinem freien Ende ist das erste Manipulatorglied gelenkig gekuppelt, dessen Schwenkwinkel relativ zu diesem Basisglied nur durch die Raumwände begrenzt ist.

Das nächste Glied, der Unterarm, ist mit dem Oberarm wiederum gelenkig verbunden und kann – relativ zu diesem – eine vollständige Drehung und außerdem Schwenkbewegungen um eine zweite, zur Achse des Gelenks senkrechte Achse ausführen. Die Länge des Unterarms ist veränderlich. Das Handgelenk erlaubt ebenso wie das Ellbogengelenk eine Schwenkung um die eine und eine Drehung um die andere Achse. Der Greifer schließlich kann geöffnet und geschlossen werden.

Auch dieser Manipulator ist seiner Struktur nach nicht »menschenähnlich«, denn seine Kupplungen sind nicht so konstruiert wie die Gelenke einer natürlichen Extremität. Aber ebenso wie die großen Gelenke des Armes vermitteln sie dem Greifer sechs bzw. – wenn man das Öffnen und Schließen des Greifers berücksichtigt – sieben Freiheitsgrade, die für Operationen im Raum notwendig sind.

Der Operator sitzt hinter einer Betonwand, betätigt Drucktaster und Stellgriffe und beobachtet durch eine strahlenundurchlässige Glasscheibe die Ausführung all

seiner Befehle. Über elektrische Verbindungen gelangen sowohl die notwendige Energie als auch die Steuerungssignale zu den Motoren und Ausführungsmechanismen.

Damit sind alle wesentlichen Einschränkungen, die für mechanische Manipulatoren gelten, aufgehoben. Jedoch entstehen neue Schwierigkeiten, die man bei kopierenden Manipulatoren nicht kannte. Dort konnte der Operator durch Betätigen des Stellgriffes Bewegungen in mehreren oder allen Freiheitsgraden gleichzeitig eingeben und dosieren. Er »baute« die Bewegungen nach dem dem Menschen geläufigen Verfahren auf, ohne in der Regel auch nur darüber nachzudenken, aus welchen elementaren Bewegungen und Drehungen sie zusammengesetzt waren. Hier nun hat sich das Bild völlig verändert. Das Drucktastersystem zwingt den Operator dazu, die auszuführenden Bewegungen in ihre einzelnen Elemente zu zerlegen. Sie werden dann mit Hilfe jener »Drucktaster« realisiert, die diesen Elementen entsprechen. Natürlich kann der Operator dank seiner Berufserfahrung die große Anzahl von Drucktastern und Stellgriffen verhältnismäßig rasch betätigen, doch sind – wie die Erfahrung gelehrt hat – die Schnelligkeit und die Genauigkeit der Bewegungen beim Drucktastersystem erheblich geringer als beim mechanischen Kopieren.

Die zweite Einschränkung bei Drucktastersystemen ergibt sich aus der Tatsache, daß bei ihnen die Rückmeldung fehlt. Der Operator fühlt die Belastungen nicht, die an den Manipulatorgliedern angreifen, und er vermag die zur Überwindung dieser Belastung notwendigen Kräfte nicht nach ihrer Größe zu dosieren. Deshalb sind in die Mechanismen solcher Manipulatoren Sicherheitskupplungen eingebaut, die ansprechen, sobald die wirksam werdenden Kräfte über die zulässigen Werte hinausgehen. Wir werden im folgenden Abschnitt sehen, daß dieser Weg zu Konstruktionen führte, bei denen die Möglichkeiten der Fernübertragung, der »Sensibilisierung« und des Einsatzes äußerer Energiequellen in einem Aggregat vereinigt ist.

Der Arm mit Zusatzantrieb

Die elektrische Welle

Das Problem der Fernübertragung einer Bewegung besteht darin, die beiden gleichnamigen Glieder des Steuerarmes und des gesteuerten Armes so miteinander zu koppeln, daß die Bewegungen des einen Gliedes möglichst genau vom anderen Glied wiederholt werden. Am einfachsten ist es natürlich, beide Glieder z. B. durch eine Welle mechanisch miteinander zu verbinden. Bei dieser Übertragung ist die Exaktheit um so größer, je starrer die Welle ist. Genau diese Idee liegt den mechanischen Manipulatoren zugrunde. Am Prinzip verändert sich nichts. Man benutzt nur außer Wellen auch Bänder, Seile und andere mechanische Systeme. Allerdings dürfen sie, wie wir bereits dargestellt haben, nicht sehr lang sein.

Zur Bewegungsübertragung über größere Entfernungen werden deshalb elektrische Systeme, insbesondere die sogenannte elektrische Welle, verwendet.

Um die Funktion der elektrischen Welle zu verstehen, müssen wir zunächst auf das Prinzip des Elektromotors bzw. Generators zurückzugreifen.

Der im Stator fließende Strom erzeugt ein Magnetfeld. Das gleiche geschieht, wenn wir auch am Rotor eine Spannung anlegen. Stator und Rotor stellen dann zwei Magnete dar, deren gleichnamige Pole sich gegenüberstehen. Da sich aber die gleichnamigen Pole abstoßen, wird der Rotor aus seiner bisherigen Stellung gebracht und dadurch in der angedeuteten Drehrichtung bewegt. Sobald der Rotor die senkrechte Mittellage überschritten hat, erfolgt jedoch wegen des geteilten Kommutators eine Ände-

rung der bisherigen Stromrichtung im Rotor und damit auch ein Wechsel der Pole seines Magnetfeldes. Damit wird die gleiche Lage wieder hergestellt, die wir zu Beginn des Vorganges hatten, und der Rotor wird gezwungen, seine Drehung fortzusetzen.

Die hier beschriebene Anordnung kann aber genauso gut als Generator verwendet werden. Läßt man nur im Stator Strom fließen und versetzt man den Rotor durch eine äußere Kraft in Drehung, dann wird im Rotor ein Strom induziert, der am Kommutator abgegriffen werden kann. Dieser Strom kann natürlich dazu verwendet werden, einen anderen gleichartigen Motor anzutreiben. Wird der Rotor des Generators in Drehung versetzt, erzeugt er einen Strom, der in den Rotor des Motors fließt und diesen antreibt. Da wir zwei völlig gleiche Anordnungen verwendet haben, ist der vom Generator erzeugte Strom so groß, daß er den Motor zur genauen Wiederholung der Drehung des Generators veranlaßt. Diese Anordnung bezeichnet man als elektrische Welle und sagt dann üblicherweise statt Generator Geber und statt Motor Empfänger. In dieser Anordnung wiederholt der Empfänger exakt und ohne Verzögerung jede Bewegung des Gebers.

Geber und Empfänger sind nur durch Leitungen miteinander verbunden, können sich also in jeder gewünschten Entfernung voneinander befinden. Wir brauchen jetzt nur noch jedes Glied des Steuerarmes am Manipulator mit einem Geber und jedes entsprechende Glied des Ausführungsarmes mit einem Empfänger zu verbinden und haben damit einen Manipulator hergestellt, bei dem die Entfernung zwischen Steuerungs- und Ausführungsteil nicht mehr jenen Beschränkungen unterliegt, die sich bei mechanischen Übertragungen bemerkbar machen.

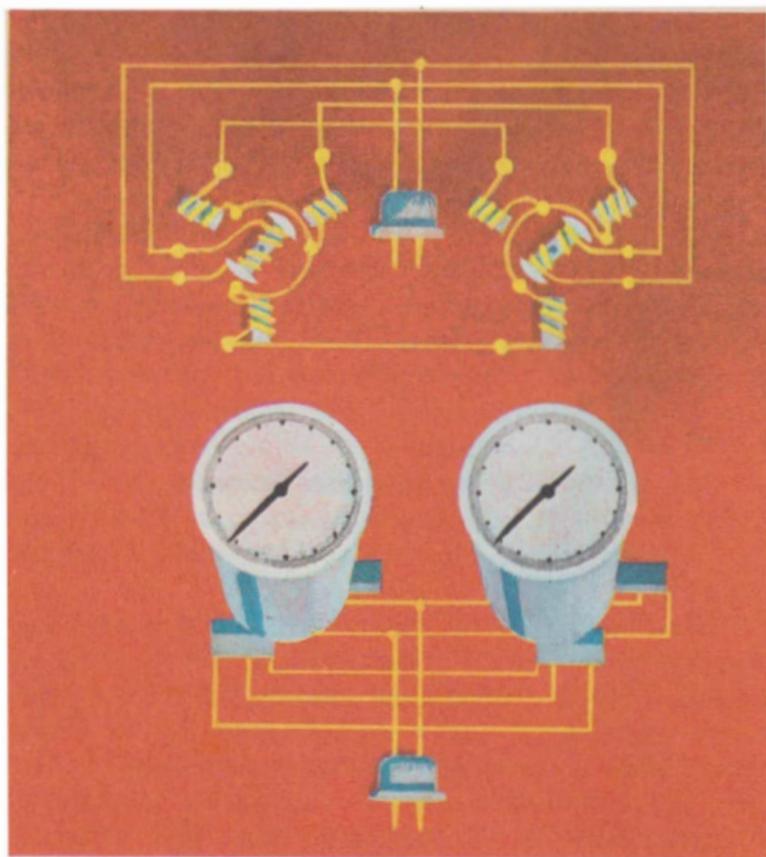
Leider funktioniert die elektrische Welle in der bisher beschriebenen Form nur dann wirklich exakt, wenn der Empfänger beim Ausführen der gewünschten Bewegungen keine oder doch nur verschwindend kleine Widerstandskräfte überwinden muß. Im gegenteiligen Fall entsteht sofort ein Fehler, der um so größer ist, je stärker die Widerstandskräfte am Empfängerrotor sind. Sollen die

Kräfte, die der Operator am Steuerarm angreifen läßt, empfängerseitig verstärkt werden, dann benötigen wir eine äußere Energiequelle, also einen Zusatzantrieb.

Motoren, die Empfindungen erzeugen

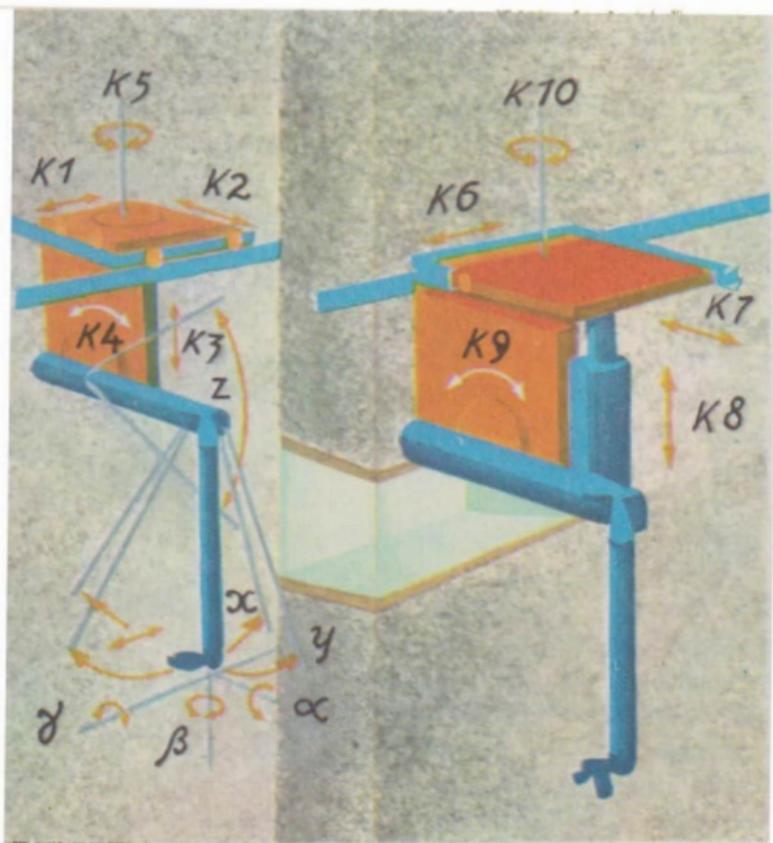
Statt des einfachen Empfängers müssen wir jetzt einen sogenannten Differential-Nachlaufmotor in unser System einbauen. Bisher waren die Statorwicklungen von Geber und Empfänger in Reihe geschaltet; d. h., im Stator des Gebers und im Stator des Empfängers floß genau der

Der Geber setzt die Drehung des Antriebsgliedes in ein elektrisches Signal um, während der Empfänger die umgekehrte Signalwandlung realisiert, wodurch das angetriebene Glied sich synchron zum Antriebsglied dreht.



gleiche Strom. Beim Differential-Nachlaufmotor, unserem neuen Empfänger, ist die Statorspannung steuerbar, und sie kann abhängig davon gewählt werden, wie groß die Kraft sein soll, die wir am Empfänger erzeugen möchten. Zur Steuerung der Rotordrehung im Empfänger benutzen wir die Spannung, die am Rotor des Gebers abgegriffen wird, verstärken sie jedoch so, daß sie der höheren Spannung im Stator des Empfängers angepaßt ist.

Manipulator mit Stellantrieb zur Leistungsverstärkung: Die Steuerhand (rechts) und die gesteuerte Hand (links) sind nicht mechanisch, sondern elektrisch miteinander verknüpft. Die sechs Freiheitsgrade ($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$) beider Hände sowie das Öffnen und Schließen des Greifers werden durch einen Stellantrieb (Servomotor) und Rückmeldesysteme gewährleistet. Außerdem können sich die Hände auch unabhängig voneinander in Richtungen bewegen, die durch Pfeile k_1, k_2, \dots, k_{10} angegeben sind. Diese zehn Bewegungen werden über ein Drucktaster-Steuerungssystem realisiert.



Diese Anordnung ist nichts anderes als das bei automatischen Steuerungen sehr häufig verwendete Nachlaufsystem mit Verstärkung.

Dank dieser Verstärkung läßt sich die Bewegung eines schwerbelasteten angetriebenen Gliedes steuern, und man braucht am Antriebsglied des Manipulators nur geringe Kräfte anzuwenden. Leider verliert die Hand des Operators damit aber auch die Verbindung zur tatsächlichen Belastung am Ausführungsglied. Der Operator kann Veränderungen in der Arbeitsbelastung infolge von Reibungs- und Trägheitskräften nicht mehr wahrnehmen. Er verliert damit die Fähigkeit, die Kraft richtig zu dosieren.

Also müssen wir unser Nachlaufsystem nochmals ergänzen.

In unserer Darstellung der elektrischen Welle hatten wir willkürlich den einen Teil als Geber und den anderen als Empfänger gewählt. Das System ist jedoch auch umkehrbar. Es ist jederzeit möglich, den bisherigen Geber als Empfänger und den bisherigen Empfänger als Geber einzusetzen. Von dieser Möglichkeit machen wir jetzt Gebrauch. Wir statten jeden Geber im Führungsarm mit einem weiteren Motor aus, dessen Drehrichtung der jeweiligen Drehrichtung des Gebers gerade entgegengesetzt ist. Diesen zweiten Motor benutzen wir als Empfänger, und wir steuern ihn durch den Empfänger am Ausführungsarm. Dadurch können wir die Kräfte, die tatsächlich am Ausführungsarm des Manipulators angreifen, auf den Steuerarm übertragen. Wir geben dem Operator so die »kinetischen Empfindungen« zurück, die er zur richtigen Dosierung der Kräfte benötigt.

Der mechanische Handschuh

An Systeme, die bereits Fernwirkung, Verstärkung und Rückübertragung aufweisen, werden immer neue Forderungen gestellt. Sie sind von dem Bestreben diktiert, den Menschen noch fester »an die Maschine zu binden«. Operator und Manipulator arbeiten »Hand in Hand« und bilden ein einheitliches, biotechnisches System. Es ist natürlich, daß die Effektivität eines derartigen Systems

erheblich davon abhängt, wie gut beide Partner aufeinander »eingespielt« sind.

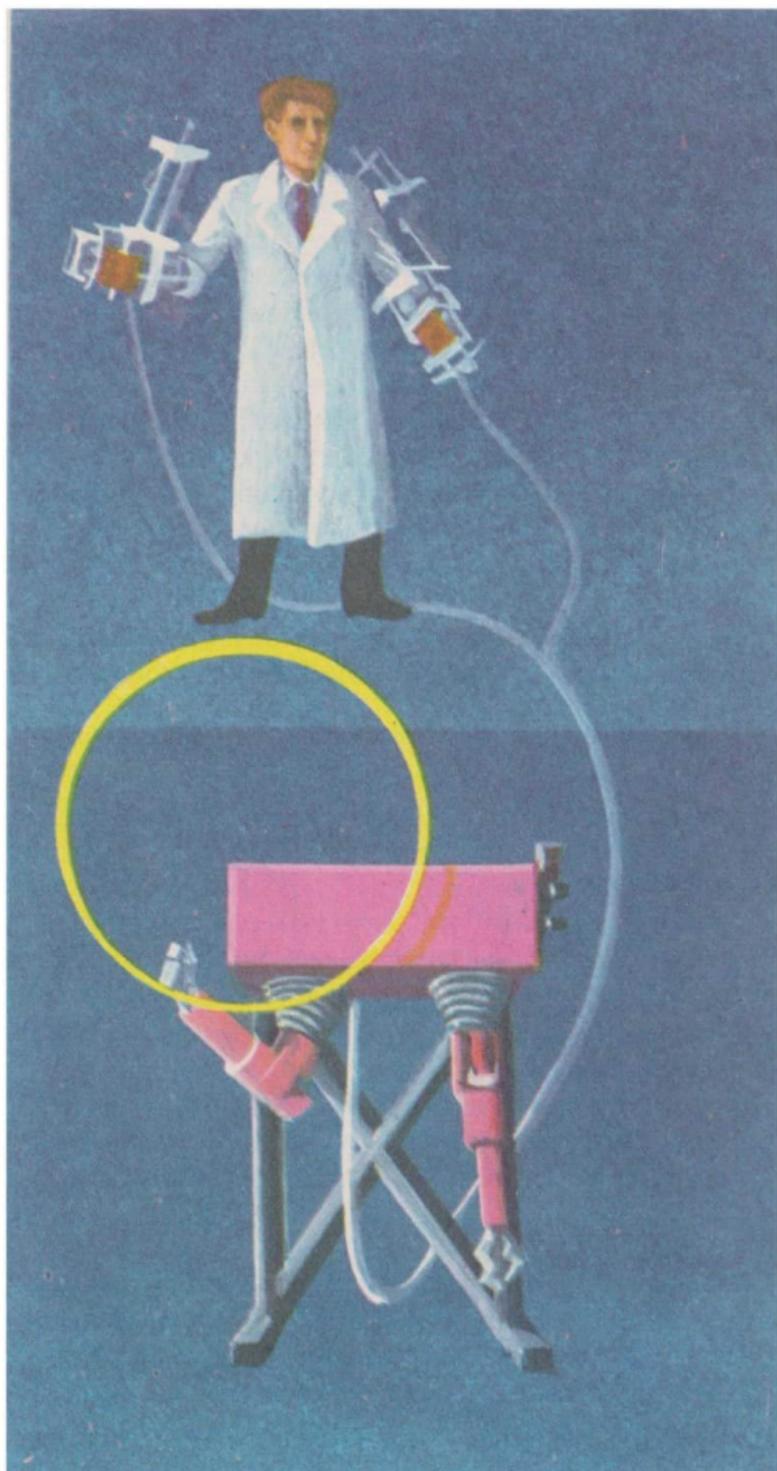
Vor etwa zehn Jahren wurde in den USA der Manipulator »Handyman« mit zehn Freiheitsgraden gebaut. Sechs Freiheitsgrade sind für den Transport und die Orientierung des Objektes notwendig. Sie werden durch vier Freiheitsgrade des Greifers ergänzt. Der Greifer ist kein einfaches Werkzeug mehr wie etwa eine Flachzange, sondern erinnert an eine Zweifingerhand.

Die bessere Greiferbeweglichkeit wirkte sich sogleich auf die Konstruktion des Steuerarmes aus. Der Steuerarm endet nicht in einem einfachen Handgriff, sondern umfaßt die Hand des Operators als eine Art »Handschuh«, in dem die Vorrichtungen für die Übertragung der Fingerbewegungen auf den Stellantrieb (Servomotor) liegen, der der Leistungsverstärkung dient. In dieser Konstruktion gibt es keine Metallbänder, Zugstangen oder -seile; die Übertragung der Energie, der Steuerungsinformationen und der Rückmeldesignale erfolgt über elektronische Systeme. Der »Handyman« ist sehr teuer.

Ist es eigentlich wirklich so wichtig, die mechanischen Arme zu verbessern? Der Puppenspieler, der die Bewegungen einer Marionette lenkt, ist ein hochqualifizierter Künstler. Nicht minder hohe Qualifikation erfordert die Arbeit des Operators, die oft mit außergewöhnlich hoher Verantwortung gepaart ist. Eine Vorstellung davon, wie kompliziert diese Funktionen selbst unter der Voraussetzung sind, daß der Operator an den bisher vollkommensten Systemen arbeitet, geben folgende Untersuchungsergebnisse.

Es wurden einige nicht sehr komplizierte Bewegungsaufgaben formuliert, die unter verschiedenen Bedingungen, insbesondere bei unterschiedlichen Entfernungen zwischen Operator und Manipulierungsobjekt, auszuführen waren.

Dabei stellte sich heraus, daß die Ausführung einer Arbeit mit Hilfe eines Manipulators im Mittel den fünf-fachen Zeitaufwand im Vergleich zur unmittelbaren Ausführung dieser Arbeit mit den Händen erfordert. Das galt für eine Entfernung des Objektes von nur 2 m. Als man diese Entfernung aber auf 3,5 m vergrößerte, lag der



Zeitverlust bereits beim Zehnfachen. Anstelle eines einzigen Fachmannes, der zur Ausführung dieser Arbeit von Hand notwendig ist, wurden jetzt fünf bzw. zehn Fachleute und außerdem fünf bzw. zehn Manipulatoren oder Arbeitsplätze benötigt.

Das mag genügen, um die Notwendigkeit zu veranschaulichen, nach noch besseren technischen Lösungen zu suchen, denn der Umfang der Tätigkeiten, die den Einsatz von Manipulatoren erfordern, wächst noch immer rasch an.

Konstruktion nach Augenmaß?

In der Aufgabenstellung, die der Konstrukteur für die Projektierung eines Manipulators erhält, wird gewöhnlich nur die Gesamtlänge des Armes angegeben. Meist wird nichts darüber gesagt, wie diese Länge auf die drei Glieder, Oberarm, Unterarm und Hand, verteilt werden soll. Dabei läßt sich leicht zeigen, daß Umfang und Reichtum der Bewegungen des Armes, seine Manipulierfähigkeit, sehr stark von seiner Gliedergeometrie abhängen. Hält man die Handlänge bei unveränderter Gesamtlänge des Armes konstant, verkürzt man aber den Unterarm und verlängert man den Oberarm entsprechend, dann werden der Arbeitsraum und die Manipulierungsmöglichkeiten beträchtlich eingeengt. Das gleiche geschieht, wenn man den Unterarm auf Kosten des Oberarmes stark vergrößert.

Wie müssen also die Proportionen der künstlichen Arme gewählt werden? Der Konstrukteur löst dieses Problem gewöhnlich »nach Augenmaß«, oder er entlehnt seine Entscheidungen dem natürlichen Prototyp – was gelegentlich durchaus begründet ist: Er untergliedert seine Konstruktion nach den gleichen Proportionen, wie sie der menschliche Arm aufweist. Wir wollen sehen, wie frucht-

Der Operator demonstriert die hohe Güte der Bewegungswiedergabe, indem er mit der Ausführungshand des Manipulators »Handyman« einen Reifen rotieren läßt. Die Hände des Operators sind mit komplizierten mechanischen »Handschuhen« versehen, mit deren Hilfe die erforderlichen Bewegungen auf den Greifer übertragen werden, der vier Freiheitsgrade aufweist.

bar diese biotechnische Art des Vorgehens ist, und uns danach der Frage zuwenden, wie die Lösung des Problems, eine optimale Geometrie für den künstlichen Arm auszuwählen, anders angegangen werden könnte.

Im Laufe der Entwicklung hat sich der Arm des Menschen durch die Arbeit immer weiter vervollkommnet, so daß ein System entstanden ist, das extreme Beweglichkeit und Anpassungsfähigkeit, kurz gesagt maximale Manipulierfähigkeit, besitzt. Natürlich gibt es auch hier die unvermeidlichen Einschränkungen. Eine der wichtigsten ist durch die Notwendigkeit gegeben, »stabile« Maße für die Extremität insgesamt und für ihre Gelenke zu gewährleisten sowie eine Vielzahl von Antrieben (Muskeln), Blutgefäßen, Nerven usw. darin anzuordnen, wodurch die Quermaße der einzelnen Teile des Armes bestimmt sind.

Bei der Entwicklung einer künstlichen Extremität versucht der Mensch, die Natur zu kopieren: Es soll eine Vorrichtung geschaffen werden, die maximale Flexibilität und Beweglichkeit aufweist sowie eine möglichst große Vielfalt von Manipulationen zu vollziehen vermag. Allerdings wäre es unnütz, auch den Einschränkungen des lebendigen Prototyps zu folgen. Jeder Manipulator weist deshalb Kupplungen auf, die wir in der Natur nicht antreffen. Sie ermöglichen beispielsweise Schwenkungen eines Gliedes relativ zu einem anderen um eine volle Drehung. Auch die Freiheitsgrade sind anders als im lebendigen Arm auf die einzelnen Gelenke verteilt, das Funktionsprinzip der Antriebe ist anders usw.

Und noch eines gilt es zu beachten: Der lebendige Arm endet in der Hand, die ungewöhnlich bewegliche und flexible »Werkzeuge«, nämlich die Finger, besitzt. Hand und Finger erweitern die Manipulierfähigkeit des Armes außerordentlich. Dieser Umstand hat zweifellos seine Geometrie beeinflußt, die sich im Verlaufe der Evolution herausgebildet hat. Der Beweglichkeitsunterschied zwischen der lebendigen Hand und dem einfachen Greifer ist zu groß, als daß man ihn bei der Entwicklung von Manipulatoren unberücksichtigt lassen dürfte.

Wie aber muß ein künstlicher Arm eigentlich gegliedert sein? Stellen wir uns vor, daß der Manipulator ein Objekt von geringer Größe ergriffen hat, das sich an einem

bestimmten Punkt im Raum befindet. Wir bewegen nun den Arm so, daß sein Handgelenk mit dem Greifer um diesen feststehenden Punkt so geschwenkt wird, als wäre es mit ihm durch ein Kugelgelenk verbunden. Konstruktion und Größe des Manipulators bestimmen den Betrag des Raumwinkels, in dessen Grenzen die mechanische Hand eingestellt und geschwenkt werden kann. Mit anderen Worten: Es ist der Manipulierungsumfang an diesem Punkt zu ermitteln.

Bringen wir das Manipulierungsobjekt an einen anderen Punkt, so muß der Raumwinkel, der die manipulativen Eigenschaften des Armes an diesem neuen Punkt charakterisiert, neu berechnet werden, weil ja die einzelnen Glieder des Mechanismus nun in einem anderen Winkel zueinander geschwenkt werden, so daß sich der Raumwinkel verändert. Wir ordnen deshalb dem gesamten Arbeitsraum des Manipulators ein räumliches Punktnetz zu und bestimmen für jeden Punkt den Manipulierungswinkel. Danach berechnen wir den Mittelwert dieses Winkels für den gesamten Arbeitsraum. Je größer dieser Wert ist, um so flexibler und beweglicher ist der Manipulator und um so besser ist eine seiner Grundeigenschaften: die Manipulierfähigkeit.

Die Größe des Manipulierungswinkels an einem beliebigen Punkt des Arbeitsraumes hängt von der Gliederlänge sowie vom Umfang der konstruktiven Beschränkungen ab, die den Gliedern hinsichtlich ihrer Beweglichkeit auferlegt sind. Weiß man dies, so kann man das Problem für die optimale Gliederung des Armes formulieren: Offenbar muß man solche Gliederlängen wählen und die Beschränkungen der relativen Gliederbeweglichkeit so verteilen, daß der über den gesamten Arbeitsraum gemittelte Manipulierungswinkel eine maximale Größe erreicht.

Die Lösung dieses Problems der optimalen Projektierung bereitet große Schwierigkeiten. Dennoch hat dieses Verfahren zur Bewertung der räumlichen Eigenschaften des Manipulators bereits Anwendung gefunden, denn »nach Augenmaß« kann man einen mechanischen Arm nur zufällig so gliedern und konstruieren, daß seine räumlichen Eigenschaften optimal sind.

Bioströme steuern

Elektrizität in lebenden Organismen

Wir wissen seit langem, daß lebendes Gewebe nicht nur imstande ist, elektrischen Strom zu leiten, sondern auch Elektrizität zu erzeugen. Elektrische Signale liegen dem Steuerungssystem für alle Bewegungsmechanismen des lebendigen Organismus zugrunde. Die im lebenden Gewebe zu beobachtenden elektrischen Potentiale – oder, wie man sie auch nennt, Biopotentiale – werden von Nervenzellen im Ergebnis von Stoffwechselprozessen erzeugt. Obwohl die Natur dieser Prozesse noch keineswegs in allen Einzelheiten erkannt ist, wurden doch ihre äußeren Erscheinungsformen, die Eigenschaften, Funktionen und Ausbreitungsformen der Bioströme im lebenden Gewebe bereits recht eingehend erforscht.

Insbesondere wurde festgestellt, daß elektrische Impulse von ganz unterschiedlichen Vertretern der belebten Natur – von Pflanzen ebenso wie von Tieren – erzeugt werden. So zeigte die Untersuchung von Pflanzen aus der Familie der Hülsenfrüchte, daß durch ihre Wurzeln elektrischer Strom fließt. Gewiß, seine Stärke ist sehr gering, sie beträgt nur wenige tausendstel Mikroampere je Quadratmillimeter Oberfläche, doch es gibt diesen Strom!

Den leistungsstärksten bioelektrischen Generator besitzen einige Fischarten. Zitteraale z. B. können Entladungen mit einer Spannung bis zu 500 V erzeugen. Ihre Stärke reicht aus, andere Meeresbewohner zeitweilig zu lähmen oder sogar zu töten. Diese Ladungen werden in einer biologischen »Elektrobatterie« erzeugt, die aus einem System von parallel und in Reihe geschalteten Minia-

turelementen in Form einzelner Zellen besteht. Jedes einzelne dieser Elemente liefert eine Spannung in der Größenordnung von 50 bis 150 mV.

Es gibt auch Fische, die elektrische Impulssysteme geringer Leistung für Navigationszwecke einsetzen. Diese eigentümliche biologische Radarvariante arbeitet im Frequenzbereich von etwa 1500 Impulsen in der Sekunde, wobei einige Fischarten eine Änderung des Potentialniveaus um einen Betrag in der Größenordnung von $0,03 \mu\text{V}$ je Zentimeter zu unterscheiden vermögen. Indem sie den Zustand und die Änderungen des reflektierten elektrischen Feldes »abhorchen«, nehmen sie auch geringfügige Hindernisse wahr und weichen ihnen aus.

Die offensichtliche Wirkung elektrischer Felder auf bestimmte Funktionen des tierischen Organismus brachte die Wissenschaftler auf den Gedanken, sich mit dem Einfluß derartiger Faktoren auf den Menschen zu befassen. So konnten sie feststellen, daß physikalische Prozesse wie die Ionisation der Luft, die kosmische Strahlung, Magnetfelder und Sonneneruptionen erheblichen Einfluß auf den körperlichen und psychischen Zustand des Menschen haben. Diese wenigen Hinweise mögen hier genügen, denn wir wollen uns in diesem Zusammenhang nur mit bioelektrischen Steuerungssystemen befassen.

»Fast« wie eine Maschine

Wie realisiert der Mensch einen zielgerichteten Bewegungsakt? Bei der Beantwortung dieser Frage wollen wir außer acht lassen, auf welche Art der Wunsch entsteht, eine bestimmte Bewegung auszuführen. Wir setzen voraus, daß dieser geheimnisvolle Prozeß bereits abgelaufen und der Mensch z. B. fest entschlossen ist, eine Nadel einzufädeln. Uns interessieren hier nur die »Technik« aller hierfür notwendigen Bewegungen und das allgemeine Prinzip, nach dem sie gesteuert werden.

Die Armbewegungen erfolgen durch die Skelettmuskeln des Armes, die aus einer Vielzahl nebeneinanderliegender Fasern von 10 bis $100 \mu\text{m}$ Dicke bestehen. Insgesamt bilden sie eine spindelförmige Struktur, die durch Sehnen an den

entsprechenden Knochen befestigt ist. Ein ruhender Muskel ist weich und dehnbar wie Gummi. Reizt man den Muskel jedoch, indem man kurzzeitig eine elektrische Spannung, d. h. einen elektrischen Impuls, anlegt, dann ändern sich seine Eigenschaften fast augenblicklich. Der Muskel wird härter und setzt dem Versuch, ihn zu dehnen, Widerstand entgegen. Diesen Spannungszustand behält der Muskel nur sehr kurze Zeit bei (einige hundertstel bis einige zehntel Sekunden), und danach setzt eine erneute Erschlaffung (Entspannung) ein. Um den Muskel wieder »einzuschalten«, bedarf es eines weiteren elektrischen Impulses.

Die Impulse stammen aus dem Zentralnervensystem (Rückenmark und Gehirn). Als Grundelement dieses Systems dient die Nervenzelle, das Neuron. Die Anzahl der Neuronen im Zentralnervensystem beträgt einige Dutzend Milliarden. Das Neuron besteht aus dem sogenannten Zelleib und einer Vielzahl kurzer Fortsätze, den Dendriten, sowie einem weiteren Fortsatz, dem Axon.

Die Größe der Neuronen schwankt innerhalb weiter Grenzen, und zwar von $1\ \mu\text{m}$ bis zu einigen hundert Mikrometern. In dem gleichen Bereich liegen die Durchmesser der Fortsätze. Nur die Länge des Axons unterscheidet sich beträchtlich von diesen mikroskopischen Werten. Die Nervenzellen beispielsweise, die die Fingerstrecker- und Fingerbeugemuskeln steuern, befinden sich im Rückenmark. Die Axone dieser Zellen durchlaufen den Arm und erreichen eine Länge von mehr als einem halben Meter. »Kabel«, die Tausende und Abertausende von Nervenfasern enthalten und imstande sind, Bioelektrizität fortzuleiten, sind also in unserem Körper »verlegt« und verbinden das Gehirn mit den Muskeln.

Wie sieht diese neuromuskuläre Struktur aus?

Die Muskelfasern sind zu Gruppen vereinigt, die einige Dutzend, gelegentlich auch einige hundert oder tausend Fasern umfassen. Zu jeder derartigen Gruppe läuft eine Nervenfaser, die sie mit der entsprechenden Nervenzelle im Zentralnervensystem verbindet. Einen derartigen elementaren neuromuskulären Komplex bezeichnet man als motorische Einheit. Ihre Größe und Leistung werden in erster Linie durch die Funktion der Muskelfasern

bestimmt, die zu ihr gehören. Eine motorische Einheit in der unteren Extremität des Menschen kann 600 Fasern enthalten; ihr Durchmesser beträgt etwa 1,5 mm, und das zugehörige Axon hat eine Dicke von etwa 10 μm . Jede Einheit dieser Art kann eine Kraft in der Größenordnung von 150 p entwickeln. Die motorische Einheit des Muskels, der den Augapfel bewegt, enthält dagegen nur zehn Muskelfasern und entwickelt nur sehr geringe Kräfte. Dafür hat sie jedoch eine größere Beweglichkeit.

Jeder Muskel umfaßt mehrere motorische Einheiten, die nach einem »Programm« arbeiten, das vom Zentralnervensystem »gegeben« wird.

Im Zentralnervensystem sind jene Nervenzellen vereinigt, die die Funktion der Muskeln des Ober- und Unterarmes, des Handgelenks und des kleinen Fingers, die Bewegungen der Augenlider, der Stimmbänder usw. steuern. In ununterbrochenem Strom fließen elektrische Impulse aus dem Zentralnervensystem in die Muskeln. Sie folgen in bestimmten Frequenzen aufeinander und veranlassen die Muskeln, sich zusammenzuziehen und wieder auszudehnen. Dabei werden Kräfte entwickelt und Bewegungen ausgelöst. Durch Veränderung der Impulsfrequenz steuert das Gehirn den Muskelzustand, d. h. die Funktion der lebendigen Antriebe. Über ein bestimmtes weiteres System gelangen dann Informationen über den Grad der muskulären Spannung sowie über die Stellung bzw. die Bewegungsgeschwindigkeit der Gelenke in das Gehirn zurück. Diese Signale werden in Nervenzellen erzeugt, die in den Muskeln und Sehnen liegen. Wiederum ist es ein Strom elektrischer Impulse, der die Rückkopplung bewirkt.

Im Gehirn erfolgen der Vergleich dieser beiden Ströme und die Ausbildung der Korrektursignale im laufenden »Steuerungsprogramm«. An ihrer Bildung ist noch ein weiteres Informationssystem beteiligt, unsere Sinnesorgane. »Lebende Geräte«, die Rezeptoren, mit deren Hilfe wir sehen und hören, fühlen und riechen, die Temperatur empfinden und Geschmacksunterschiede wahrnehmen, erhalten aus der Umgebung Informationen in Form von Reizen (Berührung, Druck, Temperatur, Licht, Schall usw.). Diese Reize werden in Folgen elektrischer Impulse

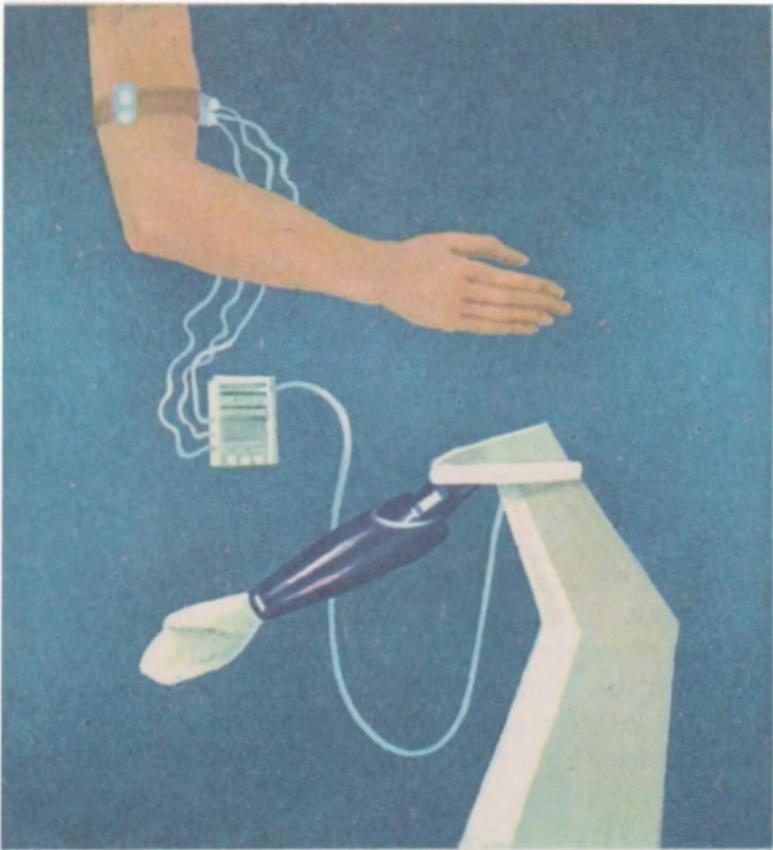
umgewandelt und dem Zentralnervensystem übermittelt. Das Nervensystem bildet also ein einheitliches Verbindungs- und Steuerungssystem, das unter anderem 206 bewegliche »Kupplungen«, d.h. Mechanismen des menschlichen Körpers, versorgt, die von 639 Muskeln – den »Antrieben« – versorgt werden. Sie ermöglichen ihm einen Reichtum an Stellungen und Bewegungen, den keine Maschine aufweisen kann. Das lebendige Steuerungssystem besteht ähnlich wie das Steuerungssystem einer Maschine aus besonders gearteten Kapazitäten und Widerständen, Relais und Leitungen, Schaltern und Verstärkern. Der Mensch ist »fast« wie eine Maschine konstruiert, eine biologische Maschine zwar, aber eine Maschine.

Die »Moskauer Hand«

Im Sommer 1960 fand in Moskau der erste internationale Kongreß über automatische Steuerung statt. Während eines Vortrages betrat ein junger Mann das Podium. Er ging an die Tafel, nahm Kreide und schrieb unter dem Beifall der Anwesenden die Worte an: »Ich grüße die Kongreßteilnehmer!« Der junge Mann hatte die Kreide nicht mit einer lebendigen Hand ergriffen, sondern mit Hilfe einer bioelektrisch gesteuerten Unterarmprothese. Bei dieser »Moskauer Hand«, wie sie in ausländischen Zeitungen genannt wurde, hatte die Idee der bioelektrischen Steuerung ihre erste praktische Anwendung gefunden.

Unser Gehirn kodiert das »Ablaufprogramm« des lebenden Organismus in Form von elektrischen Impulsen und leitet es dann über das Nervensystem an alle Ausführungsorgane weiter. Aber auch die Betriebsprogramme vieler Maschinen werden in Form elektrischer Impulsströme kodiert und an die Ausführungsmechanismen geleitet. In dieser Weise arbeiten die Systeme und Geräte der digitalen Technik.

Es versteht sich von selbst, daß die Natur der bioelektrischen Signale absolut nicht die gleiche ist wie die der technischen Signale. Das ist jedoch kein Hinderungsgrund



Die Elektroden an der Hand des Operators leiten die bioelektrischen Signale ab, die in den Erkennungsblock gegeben werden, wo sie mit den eingegebenen Merkmalen einer Modellbewegung zu identifizieren sind. Von hier aus gelangt das entsprechende Signal in den Steuerungsblock. Das Handmodell kann zwei Bewegungen ausführen: das Beugen der Hand und des Unterarms.

dafür, dieses Signalisationsverfahren als einheitlichen Kode sowohl für ein Lebewesen als auch für ein technisches Gerät anzuwenden, wenn beide miteinander in enge Beziehung zueinander treten sollen. Um dieses neue Nachrichten- und Steuerungsverfahren in einem Komplex zu realisieren, der ein biologisches System und ein technisches Untersystem umfaßt – den Menschen und seine Prothese also –, genügt es, von den Muskeln des Menschen Biopotential abzuleiten und diese für die Steuerung des

technischen Gerätes zu benutzen. Etwa so war auch ein sowjetisches Patent formuliert, das unter der Nr. 110657 (»Ein Verfahren zur bioelektrischen Steuerung von Mechanismen und Geräten«) am 27.3.1957 A.E.Kobrinski, M.G.Breido, W.S.Gurfinkel, A.I.Syssin und I.A.Jakobson erteilt wurde.

Zum Unterschied von den bisherigen Unterarmprothesen wurden für den Antrieb der künstlichen Hand nicht die Muskelkraft des Oberarmes oder des Rumpfes, sondern äußere Energiequellen verwendet. Nicht minder wichtig war die Möglichkeit, die Prothese durch bioelektrische Signale zu steuern, die an den verkürzten Unterarmmuskeln entstehen – zur Steuerung also die gleichen Muskelgruppen einzusetzen, die auch das Beugen und Strecken der Finger an der gesunden Extremität bewirken.

Der Antriebsmechanismus sieht die Verwendung eines elektrischen Kleinmotors vor und ist so projektiert, daß sich der Daumen und die vier Finger beim Öffnen und Schließen der Hand gleichzeitig bewegen. Zur Steuerung einer derartigen Hand sind zwei voneinander unabhängige Quellen bioelektrischer Signale erforderlich, und zwar die eine zur Steuerung des Greifens und die andere zur Steuerung des Öffnens (Loslassen).

Der junge Mann auf dem Kongreß führte Bewegungen aus, die den Anwesenden einfach und natürlich erschienen. Die technische Vorrichtung gehorchte dem Willen des Menschen. Gerade diese Tatsache hatte die lebhafteste Reaktion der Versammlungsteilnehmer hervorgerufen.

Der künstliche Arm »fühlt«

Die 1960 vorgeführte Unterarmprothese mit bioelektrischer Steuerung sieht lediglich eine visuelle Rückkopplung vor und enthält keinerlei Empfindungselemente bezüglich der am Greifer anliegenden Kraft. Aber auch diese Prothese hat bereits eine gewisse Rückmeldung. Die Quelle der Rückkopplungssignale waren geringfügige Geräusche und Vibrationen, die die Arbeit des elektrischen Kleinstmotors und des gesamten Antriebssystems be-

gleiten. Intensität und Zusammensetzung dieser Signale werden in erheblichem Maße durch die »Betriebsart«, durch die ausgeführten Bewegungen, bestimmt. Der Amputierte nimmt sie unmittelbar mit dem Gehör oder in Form von Vibrationsempfindungen wahr, die durch den Prothesenschaft in der Haut des Stumpfes erzeugt werden. Außerdem empfindet er auch die mit den Steuerungsprozessen verbundenen Muskelkontraktionen. Verständlicherweise ist der Genauigkeitsgrad dieser Empfindungen nicht sehr groß. Deshalb wurden Vorschläge ausgearbeitet, Prothesen und Manipulatoren so empfindlich zu machen, daß der Patient die Greifkraft einzuschätzen vermag. Hierunter befand sich die Erfindung einer »Rückkopplungsvorrichtung in bioelektrischen Steuerungssystemen«, die unter der Nummer 166 099 für A. I. Schneider, E. A. Schirokova und A. E. Kobrinski patentiert wurde.

Welche Möglichkeiten bestehen, die verschiedenen Sinnesorgane zur Rückmeldung über die Funktion einer Prothese oder eines Manipulators einzusetzen? Man könnte z. B. die Rückkopplungsvorrichtung mit einer Lichtskala versehen, die entsprechend geeicht ist, oder mit einem Tongenerator, bei dem die verschiedenen Parameter des Ausgangssignals ebenfalls von der Greifkraft abhängig sind. Augen und Ohren sollten jedoch nicht durch die Wahrnehmung zusätzlicher Informationen überfordert werden. Den Geruchs- oder Geschmackssinn zur Sensibilisierung einer Prothese zu benutzen ist wohl nicht möglich.

So wird klar, daß man sich bei dem Versuch, ein Rückmeldesystem zu entwickeln, zweckmäßigerweise an die Empfindlichkeit der Haut hält. Die Haut empfindet Druck, Temperaturänderungen, lokale Vibrationen sowie Schmerz oder elektrische Reize. Wir haben also, wie es scheint, umfangreiche Auswahlmöglichkeiten. Druckänderungen vermag der Mensch jedoch nur sehr grob zu unterscheiden, und schon nach sehr kurzer Zeit nimmt er sie überhaupt nicht mehr wahr. Er hat sich rasch an den Druck gewöhnt. Die Temperaturempfindung ist für die Registrierung eines dynamischen Prozesses, wie ihn die Änderung der Greifkraft nun einmal darstellt, gänzlich ungeeignet, und zwar wegen der großen Trägheit, die alle

Wandler aufweisen, die ein Kraftsignal in ein Wärmesignal umformen. Die Schmerzempfindung ist mit sogenannten Schutzreflexen gekoppelt und damit auch für Rückmeldezwecke nicht verwendbar. So bleibt nur die Sensibilität für lokale Vibrationen und elektrische Reize übrig. Elektrische Reize werden bei hinreichend geringer Intensität, wenn sie die Schmerzschwelle nicht überschreiten, ebenfalls als Vibrationsreize empfunden.

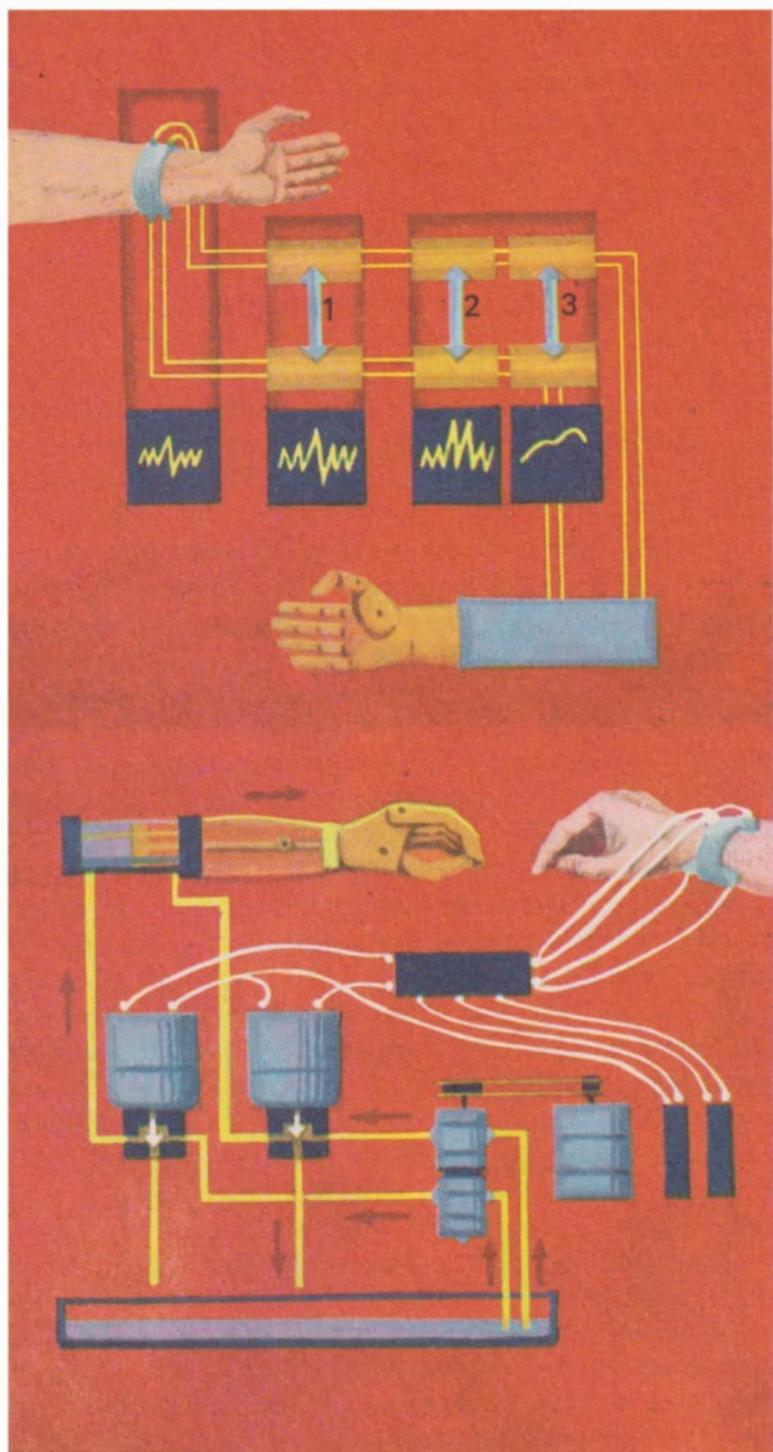
Bereits seit langem sind verschiedenartige Vorrichtungen der Prothetik des Seh- und Hörvermögens bekannt, die darauf beruhen, daß Licht- und Schallsignale in Vibrationswirkungen umgewandelt werden und auf die Haut des Prothesenträgers einwirken. So wurden z. B. Untersuchungen darüber angestellt, wie gering Vibrationen sein können, die der Mensch gerade noch wahrnimmt, und wie er sie voneinander zu unterscheiden vermag. Es ist allerdings noch nicht so weit, daß derartig »empfindliche« Prothesen serienweise produziert werden, weil sie sich noch im Entwicklungsstadium befinden.

In allen Zweigen der Wissenschaft und Technik wird ständig ein gewisser Vorlauf für die Zukunft geschaffen. Es läßt sich nicht so ohne weiteres angeben, was von diesem Vorlauf morgen schon benötigt werden wird und was erst übermorgen. Aber ohne diesen Vorlauf ist kein auch nur halbwegs annehmbares Tempo des wissenschaftlich-technischen Fortschritts denkbar. Er ist das Ergebnis schöpferischen Denkens, unermüdlichen Forschens. Viele Erkenntnisse finden aber zunächst nur in Modellen ihren Niederschlag. Auch die Manipulatoren und Roboter, von

Oben: Der technische Teil eines bioelektrischen Steuerungssystems.

Die vom Stromabnehmer abgegriffenen bioelektrischen Signale werden verstärkt (1) und danach über einen Gleichrichter und einen Integrator bearbeitet (2, 3), damit sie für die Steuerung der künstlichen Hand einsetzbar sind.

Darunter ein elektrohydraulischer Biostrom-Manipulator: Das bioelektrische Signal wird zur Steuerung der Ventilmadelbewegung benutzt. Der durch die Pumpe erzeugte Flüssigkeitsdruck wird wahlweise in den einen oder anderen Zylinderraum übertragen, wobei sich der Kolben dementsprechend in die eine oder andere Richtung bewegt und damit die Manipulatorhand öffnet oder schließt.



denen in diesem Buch die Rede ist, durchlaufen heute das »Kindheits«stadium ihrer Entwicklung. Die meisten von ihnen gehören zum wissenschaftlich-technischen Vorlauf. Sie haben (vorläufig!) noch keine verbreitete Anwendung gefunden. Sie müssen ihre Prüfung in der Praxis noch bestehen.

Auf die Muskeln kommt es an

Es ist sinnvoll, an dieser Stelle kurz bei den Hauptrichtungen der bioelektrischen Steuerung zu verweilen, die sich seit über einem Jahrzehnt abzeichnen. Man kann sagen, daß mindestens drei derartige Richtungen bereits aussichtsreich geworden sind.

Im Jahre 1960 wurde in Jugoslawien unter Leitung von R. Tomovitch eine automatische Hand entwickelt, die in der Handfläche besondere Geber für die Rückmeldung besitzt. Sobald die Handfläche oder die Finger irgendeinen Gegenstand fühlen, faßt die Hand automatisch zu, wobei ihre Konstruktion eine gute Anpassungsfähigkeit des Greifers an die Form des Gegenstandes gewährleistet. Hier werden also für Steuerungszwecke Signale eingesetzt, die von einem oder zwei Muskeln abgeleitet werden.

Eine andere Richtung ist mit der Konstruktion komplizierter bioelektrischer Systeme verknüpft, bei denen bereits mehrere voneinander unabhängige bioelektrische Signale genutzt werden.

Verwendet man zur Steuerung einer Prothese jeden Muskel (d.h. sein bioelektrisches Signal) für sich, also unabhängig von den anderen Muskeln, dann wird die Anzahl der gesteuerten Bewegungen gleich der Anzahl der Muskeln, die für die Steuerung Anwendung finden. Man kann aber auch anders vorgehen. Nehmen wir beispielsweise an, daß vier Muskeln als Quellen von Steuerungssignalen gewählt worden sind. Wird jeder dieser Muskeln einzeln kontrahiert, dann kann man in der gewöhnlichen Weise vier Bewegungen steuern. Darüber hinaus kann man jedoch auch kombinierte Signale für die Steuerung einsetzen, die durch gleichzeitige Kontraktion von zwei oder drei verschiedenen Muskeln erhalten

werden. Auf diese Weise ist es möglich, bei Verwendung von vier Muskeln sechzehn einzelne Bewegungen zu steuern, natürlich unter der Voraussetzung, daß sie nicht gleichzeitig ausgeführt werden.

Dies ist nur eine Variante für die Konstruktion sogenannter polyfunktionaler bioelektrischer Steuerungssysteme. Es fällt aber nicht schwer, sich auch ein prinzipiell anderes bioelektrisches Steuerungssystem vorzustellen. Bisher waren wir davon ausgegangen, daß die Steuerungswirkung der Kontraktionsintensität des Muskels proportional ist. Für Steuerungszwecke läßt sich jedoch nicht nur die veränderliche Größe des bioelektrischen Signals einsetzen, sondern auch schon die bloße Tatsache seines Vorhandenseins oder Fehlens. Mit anderen Worten: Man konstruiert ein Steuerungssystem nach dem »Ja – Nein« – Prinzip. Es läßt sich auch ein Prinzip verwenden, das drei Niveaus des bioelektrischen Signals kennt:

1. Der Muskel ist entspannt: kein Signal.
2. Der Muskel ist leicht angespannt: schwaches Signal.
3. Der Muskel ist angespannt: normales Signal.

So kann man mit Hilfe eines Muskels zwei Bewegungen steuern. Bei schwachgespanntem Muskel wird die eine Bewegung eingeschaltet, und bei normaler Anspannung des Muskels erfolgen die Ausschaltung der ersten Bewegung und die Einschaltung einer zweiten; bei Entspannung des Muskels werden beide Bewegungen ausgeschaltet. Etwa nach diesem Prinzip arbeitet die »kanadische Hand«, die in New Brunswick unter der Leitung von R. Scott entwickelt worden ist.

Große Hoffnungen

Muß die Anzahl der Ableitungspunkte für Biopotentiale vergrößert werden und liegen diese Ableitungspunkte dicht beieinander (was unvermeidlich ist, wenn man benachbart angeordnete Muskeln zur Steuerung verwenden muß), dann werden effektive Verfahren zur »Erkennung« und Verarbeitung der komplizierten bioelektrischen Signale zu einem Problem von erstrangiger Bedeutung.

Ein aussichtsreicher Lösungsweg fußt auf etwa fol-

genden Überlegungen. Die mittels mehrerer Oberflächen-
elektroden von einer Gruppe benachbarter Muskeln ab-
geleiteten Bioströme erzeugen ein bestimmtes bio-
elektrisches Bild vom Spannungszustand dieser Muskel-
gruppe bzw. von der hierdurch realisierten Bewegung.
Doch selbst bei genau gleichen Bewegungen ist dieses Bild
immer anders, weil es praktisch unmöglich ist, genau die
gleiche Bewegung absolut exakt zu wiederholen. Unter-
schiede bestehen außerdem zwischen verschiedenen
Personen. Das Bild wird darüber hinaus auch noch dadurch
beeinflußt, wie genau die Geber an den Muskeln an-
geordnet sind. Deshalb muß man offenbar auf alle Ver-
suche verzichten, dieses Bild auf gewöhnliche Weise zu
analysieren, indem man gewissermaßen die einzelnen
Signale addiert, um dann die verschiedenen Signale von-
einander zu unterscheiden. Stattdessen ist es zweckmäßig,
zum Studium gewisser gemeinsamer Charakteristika des
bioelektrischen Bildes insgesamt überzugehen und diese
Charakteristika mit jenen Bewegungen zu verbinden,
denen sie entsprechen. Man setzt ein bestimmtes Bild zu
einer bestimmten Bewegung ins Verhältnis.

So sieht die Überlegung aus. Die praktische Realisierung
aber wollen wir an einem Gerät aus den USA kennen-
lernen.

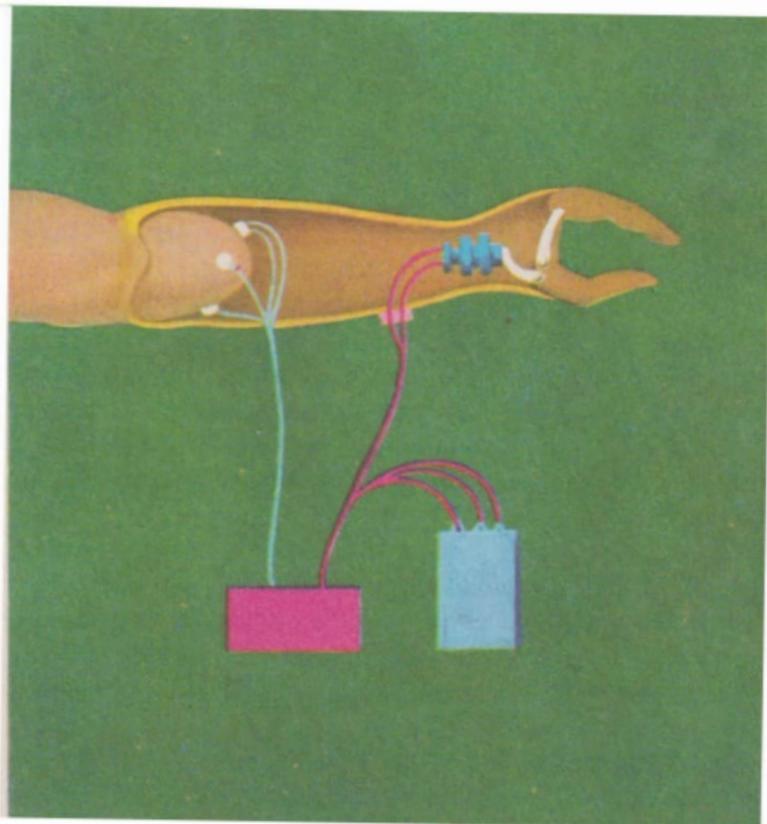
An sechs Muskeln des Schultergürtels werden Ober-
flächenelektroden befestigt. Sie dienen als Quellen für
sechs bioelektrische Signale, die zur Verarbeitung dem
Spezialgerät »Myocoder« zugeleitet werden. Diese Signale
werden zuerst einmal verstärkt und danach in diskrete
Impulse gewandelt, deren Frequenz dem Erregungsniveau
der Muskeln proportional ist. Zum »Myocoder« gehört ein
Rechner, der die Anzahl von Impulsen ermittelt, die in
einer bestimmten Zeit über jeden der Kanäle eintreffen. Im
Ergebnis wird das bioelektrische Bild in ein numerisches
Bild umgewandelt, das für die Erkennung durch einen
Digitalrechner geeignet ist.

Ungelöst bleibt aber vorläufig noch das Problem, die
Erkennung für die Steuerung einzusetzen. Die Erkennung
ist ja hier das Analysenergebnis aus einer bereits aus-
geführten Bewegung. Soll das bioelektrische Signal jedoch
zur Steuerung verwendet werden, muß die Erkennung mit

der Bewegung einhergehen. Die Wissenschaftler sind davon überzeugt, daß auch diese Schwierigkeit überwindbar ist.

Ein Beispiel für die Entwicklung komplizierter bioelektrischer Systeme ist ein orthopädischer Apparat, der zur Wiederherstellung der Bewegungsfunktionen einer gelähmten oberen Extremität dient. Der Apparat umfaßt zwei Mechanismen. Mit Hilfe des einen Mechanismus, der die Form einer Spezialschiene hat, wird der damit verbundene Arm insgesamt in Bewegung versetzt. Ein anderer Mechanismus, der mit den Fingern verbunden ist, er-

Funktionsprinzip einer »künstlichen Hand«: Mit Hilfe von Elektroden werden die bioelektrischen Ströme am Armstumpf abgenommen und über einen Verstärker zu dem elektromechanischen Antrieb geleitet, der von einer Batterie gespeist wird.



möglicht es dem Patienten, die Hand zu öffnen oder zu schließen und Gegenstände zu ergreifen. Dadurch kann der Gelähmte selbständig essen, sich rasieren sowie andere relativ unkomplizierte Handlungen ausführen.

Das Steuerungssystem dieses Apparats umfaßt mehrere Untersysteme. Eines davon gewährleistet den Antrieb des Schienenmechanismus und damit also die Bewegung des gelähmten Armes. Die Steuerung dieses Antriebes erfolgt über ein Programm, das vorher mit Hilfe eines Digitalrechners aufgestellt worden ist. Das Ein- und Ausschalten des Programms geschieht über Miniaturgeräte, die in einer Spezialbrille des Patienten eingebaut sind. Das System schaltet sich ein, sobald durch eine Augenbewegung des Patienten aus einer in die Brille eingebauten kleinen Lampe ein Lichtstrahl auf eine Fozelle fällt. Der Mechanismus zum Öffnen und Schließen der Finger des Patienten wird von einem bioelektrischen System gesteuert: Als Quelle für die Steuerungssignale können beliebige gesunde Muskeln des Patienten dienen.

Zur Ableitung der Biopotiale werden auch Verfahren angewendet, bei denen sogenannte Nadelelektroden Verwendung finden, die durch die Haut eingestochen wurden. Außerdem gibt es Systeme zur Ableitung der Biopotiale, bei denen winzige Geräte in den Muskel eingepflanzt werden.

An der Entwicklung der bioelektrischen Steuerungssysteme arbeiten heute einige Dutzend Forschungsinstitute in der ganzen Welt. Die großen Hoffnungen, die man auf verschiedenen Gebieten der Medizin und der Technik in diese Systeme setzt, beginnen sich bereits zu erfüllen. Ständig entstehen neue interessante Probleme. Kann man beispielsweise die Informationsübertragungskette vom lebenden Organismus auf ein peripheres technisches Gerät noch weiter verkürzen? Kann man es so einrichten, daß der Operator zur Steuerung nicht mehr die Biopotiale von Muskeln, sondern unmittelbar die Biopotiale des Zentralnervensystems, die Biopotiale des Gehirns verwendet?

Die technischen Mittel werden ständig verbessert. Es wäre nicht verwunderlich, wenn sich in nicht gar zu ferner Zukunft auch dieses Problem als lösbar erwiese.

Da sind sie, die Roboter!

Von Čapek zur Kybernetik

Nahezu die Hälfte dieses Bandes liegt hinter uns, und das Wort »Roboter«, das in seinem Titel steht, ist nur auf den ersten Seiten aufgetaucht. Nun ist es an der Zeit, wieder darauf einzugehen. Dabei müssen wir in erster Linie vereinbaren, was wir unter einem »Roboter« verstehen wollen. In der modernen phantastischen, populärwissenschaftlichen und wissenschaftlich-technischen Literatur gibt es vermutlich kaum einen anderen Begriff, der so vieles umfaßt und dabei so verschwommen ist. Der Gerechtigkeit wegen muß jedoch angemerkt werden, daß das Wort »Roboter« möglicherweise gerade deswegen so »lebensfähig« geblieben ist. Es tauchte im Jahre 1920 in dem berühmten Drama »RUR« (Rossums Universal Robots) auf, das der tschechische Schriftsteller Karel Čapek geschrieben hatte. Die Roboter sind bei ihm mechanische Menschen, die in großer Stückzahl produziert werden, um in den Fabriken die lebenden Menschen zu ersetzen. Die Maschinen entziehen sich jedoch der Kontrolle des Menschen, da sie höheren Intellekt und größere physische Möglichkeiten erlangen, und sie beginnen, ihre Schöpfer zu vernichten.

Mit diesem Werk kritisierte Čapek die anarchische und sich verselbständigende Entwicklung der Technik im Kapitalismus. Doch es gab schon viel früher technische Gebilde, denen man Robotereigenschaften zusprechen könnte.

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts erfand der Franzose Joseph-Marie Jacquard, Sohn eines Webers aus Lyon, eine



Vorrichtung, die es ermöglichte, jedes noch so komplizierte Gewebemuster auf Webstühlen mechanisch herzustellen. Die Muster wurden auf Lochkarten übertragen, mit deren Hilfe die Kettfäden des Webstuhls gesteuert wurden. Lyoner Weber zerstörten jedoch das erste Muster dieses Geräts, weil sie befürchteten, daß diese Erfindung sie um ihr Brot bringen würde.

Ein Landsmann Jacquards, der Armeeschneider B. Thimmonier, erfand 1830 die erste funktionsfähige Nähmaschine der Welt. Sie bestand fast vollständig aus Holz und ähnelte überhaupt nicht den Nähmaschinen, die wir heute benutzen. Aber sie nähte! Und mit ihrer Hilfe konnte eine wenig erfahrene Maschinennäherin viele erfahrene Meisterinnen weit hinter sich lassen. Bald aber meinten die Pariser Näherinnen, daß die Maschine sie ihrer Existenzmittel beraubte. Sie zerstörten die Werkstatt, und der Erfinder entkam nur mit großer Mühe.

Es gibt viele ähnliche Beispiele für die instinktive Furcht des Menschen vor der Maschine. Sie erscheint ihm als ein Ungeheuer, das die soziale Ungerechtigkeit, die in der kapitalistischen Gesellschaft herrscht, noch mehr vertieft. Čapeks Drama spiegelt diesen Konflikt in überhöhter Form und mit aller Schärfe wider. Auf diese Weise begann das Wort »Roboter« ein künstliches Wesen zu charakterisieren, das im Gegensatz zum Menschen steht. Es verdrängt ihn aus allen Tätigkeitsbereichen, indem es ihn seiner »Universalität« beraubt, auf die er ja so stolz ist.

In diesem Gewand begann der Roboter seine Reise durch ungezählte phantasievolle und wissenschaftlich-phantastische Romane, Berichte und Erzählungen. Er wurde allerdings gelegentlich nicht zum bösen, sondern zum guten Geist der Menschen.

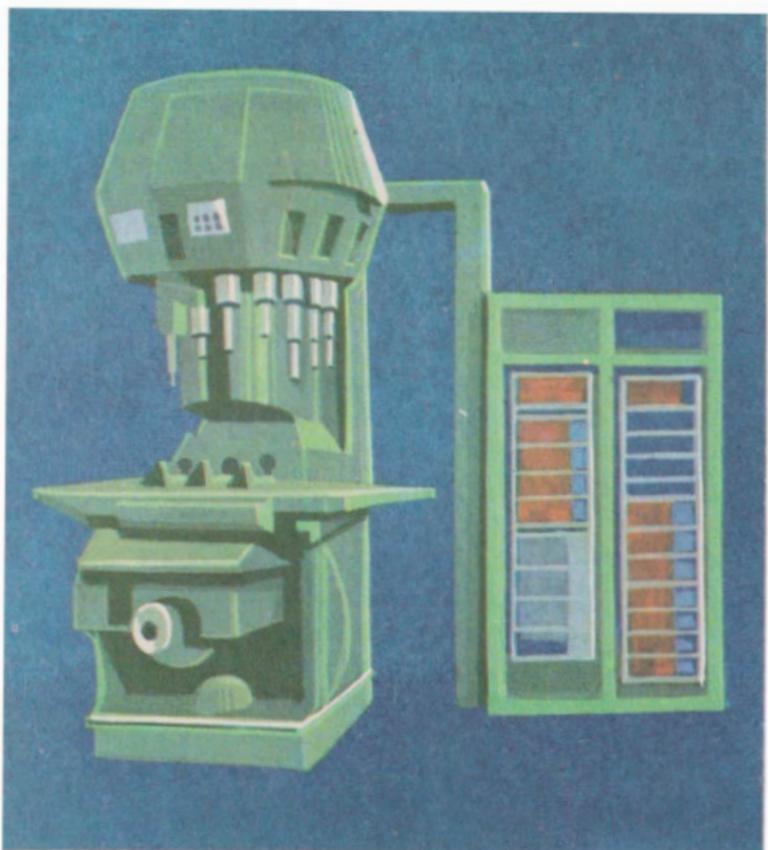
Gleichzeitig zog der Roboter auch in die populärwissenschaftliche Literatur ein. Hier verstand man unter einem Roboter die unterschiedlichsten Dinge. In den zwanziger und dreißiger Jahren stellte er ein metallisches Gebilde dar, das sich von den menschen- und tierähnlichen Spielzeugen des 19. Jahrhunderts hauptsächlich dadurch

Kuriosum um 1930: Roboter mit Elektronenröhren, der auf Worte antwortet, die ihm ins »Ohr« geflüstert werden

unterschied, daß neben mechanischen Vorrichtungen auch elektrische, fotoelektrische und funktechnische Systeme Anwendung fanden. Es wurden ausschließlich seine äußere Ähnlichkeit mit dem Menschen sowie das »Menschenähnliche« seiner Handlungen und Bewegungen unterstrichen. Die produktive Bedeutung dieser Bewegungen und Handlungen blieb unberücksichtigt, da die Zeit noch nicht angebrochen war, den Roboter »auf Arbeit gehen« zu lassen. Diese Zeit brach erst zwischen 1945 und 1960 an, als in verstärktem Maße Automatisierungsmittel in verschiedene Produktionsbereiche eindringen. Nun bezeichnete man in der populärwissenschaftlichen Literatur mit dem Wort »Roboter« auch eine Vielzahl verschiedenartiger Produktionsautomaten und automatische Taktstraßen. Zu den Robotern zählte man z. B. eine technische Vorrichtung, die eine Arbeit auszuführen vermochte, die früher der Mensch verrichtet hatte. Es war also nicht unbedingt eine genaue Wiederholung oder Kopie der Handlungen und Bewegungen des Menschen erforderlich. Man verlangte vom Roboter keinerlei »Menschenähnlichkeit« in bezug auf die Art und Weise seiner mechanischen Bewegungen mehr.

Wie wir sehen, stand der Begriff »Roboter« damals ganz im Gegensatz zu dem der ersten Etappe. Automatisierungssysteme fanden zunächst im Bereich verhältnismäßig einfacher technologischer Prozesse große Verbreitung, die dem Automaten keine höhere »Qualifikation«, keine komplizierten Bewegungen und keine Universalität abforderten. Deshalb wurde der Roboter zu einem bloßen Produktionsautomaten ohne alle Menschenähnlichkeit.

In seinem dritten Gewand trat der Roboter am Ende der fünfziger Jahre auf. Damals begann die Kybernetik ihre ersten Früchte zu tragen, und in die Werkhallen gelangten nun auch Automaten und automatische Systeme mit numerischer Steuerung. Mit ihrer vergleichsweise hohen Universalität waren derartige Maschinen imstande, auch mit komplizierten Produktionsarbeiten fertig zu werden, die man für die ausschließliche Domäne des Menschen gehalten hatte. Man begann sie Roboter zu nennen, und dieser Begriff paßte nun keinesfalls mehr auf die »gewöhn-



Numerisch gesteuerte Bohreinrichtung, bei der achtzehn verschiedene Werkzeuge automatisch gewählt und eingesetzt werden können. Rechts Steueranlage mit Lochband

lichen« Automaten, die zehn bis fünfzehn Jahre früher als Wunder der Technik erschienen waren. Der Elektronenrechner selbst wurde zum Roboter (oder doch wenigstens die Automaten oder Geräte in seiner unmittelbaren Peripherie). Die »intellektuelle« Menschenähnlichkeit wurde besonders betont und dabei unwillkürlich überbewertet. Fragen der Nachbildung von Arm- und Beinbewegungen des Menschen blieben noch unbeachtet.

Heute nun beginnt eine Etappe, in der es unbedingt notwendig wird, nicht einzelne konkrete Prozesse und Operationen, wie sie dem Menschen eigen sind, nachzubilden und zu automatisieren, sondern ganze Gruppen

und Klassen von Handlungen und Bewegungen, deren Umfang sich noch nicht einmal vorherbestimmen läßt. Das Wort Roboter ist inzwischen in die technische Literatur eingedrungen, und zwar mit den (freilich noch nicht offiziell zuerkannten) Rechten eines technischen Begriffs.

Was ist ein Roboter?

Gewöhnlich geht ein neues Wort, das einen neuen wissenschaftlichen oder technischen Begriff ausdrückt, aus der wissenschaftlichen und technischen Literatur in die populärwissenschaftliche und danach in die belletristische Literatur über. Das Wort Roboter hat diesen Weg in umgekehrter Richtung genommen, ohne dabei auch nur eine halbwegs genaue Definition zu erfahren und ohne Eingang in die modernen Enzyklopädien zu finden (was in der Tat sehr erstaunlich ist).

Diese Umstände zwingen uns, noch einmal auf Čapeks Werk zurückzukommen. Um den Handlungen und Bewegungen eines technischen Gerätes »Menschenähnlichkeit« zu verleihen, muß man vorher wissen, wie ein Mensch handelt und wie er seine Bewegungen aufbaut. Die Wissenschaft ist vorläufig von einer auch nur halbwegs genauen Kenntnis dieser Prozesse weit entfernt. Wenn wir davon sprechen, daß eine Maschine Handlungen ausführt, die denen des Menschen ähneln, so meinen wir stets eine äußere, augenfällige Ähnlichkeit, die sich aus der Nachbildung bestimmter Funktionen ergibt.

Der Roboter ist zur Verrichtung physischer Arbeit gedacht, zur Ausführung von Arbeitsbewegungen. Alles, was nicht unmittelbar diesem Zweck dient, ist aus seiner Konstruktion ausgeschlossen. Seine »mechanische Vollkommenheit« ist ebenso wie seine »Intelligenz« nur darauf gerichtet, daß er sich bewegen und rascher, genauer und ökonomischer (bei minimalen Bedürfnissen!) arbeiten kann als der Mensch.

Zwei Grundeigenschaften des Roboters werden also in ihrer Bedeutung auf eine Stufe gestellt: seine »mechanische Vollkommenheit« und seine »Intelligenz«. Seine

Mechanismen – die Bewegungsmöglichkeiten sowie die Fähigkeit, äußere Energie in Arbeit umzusetzen –, also das Niveau seiner »mechanischen Vollkommenheit«, und die Eigenschaften und Möglichkeiten der Informationssysteme, mit denen der Roboter ausgestattet ist, also das Niveau seiner »intellektuellen Vollkommenheit«, müssen einander entsprechen.

Unter einem Roboter ist demnach ein technisches Gerät zu verstehen, das zur Reproduktion einiger Bewegungsfunktionen des Menschen dient, durch die er Arbeit verrichtet, und das über Mechanismen und Systeme zur Aufnahme, Umwandlung und Nutzung von Energie und Informationen verfügt. Was in dieser Definition natürlich fehlt, ist eine klare Vorstellung von der »Selbständigkeit« – von der Autonomie – des Roboters sowie auch von den Bedingungen, die für ihn gegeben sein müssen, damit er diese Selbständigkeit zeigen und sinnvoll nutzen kann.

Erinnern wir uns an das Beispiel mit dem Getränkeautomaten. Was müssen wir nicht alles mit der Hand ausführen, damit wir unseren Durst löschen können! Und wie kompliziert sind doch – wenn man nur einmal darüber nachdenkt – jene Bedingungen, unter denen er seine »Selbständigkeit« zum Ausdruck bringen kann! Die Münze muß unbeschädigt sein, der Automat muß über einen hinreichenden Vorrat an Wasser und Fruchtsaft verfügen, und auch die technische Wartung muß »auf der Höhe« sein. Nur in diesem Fall ist der Getränkeautomat wirklich ein Automat.

Das Niveau der Selbständigkeit (Autonomie) jedes technischen Gerätes ist immer eingeschränkt, unabhängig davon, ob wir es als Automat oder Roboter bezeichnen oder einen neuen, noch ausdrucksvolleren Begriff erfinden. Die Vorstellungen von den Grenzen der Autonomie ändern sich ständig, je nachdem, wie sich Wissenschaft und Technik entwickeln. Was gestern noch als Roboter erschien, kann heute bereits nur mehr als »Halbroboter« aufgefaßt werden. Was uns heute als Roboter erscheint, wird morgen zum »Halbroboter« werden. Deshalb fehlt in unserer Definition des Begriffs Roboter jede Bewertung seiner Selbständigkeit. Es hat keinen Sinn, solche Bewertungen voreilig auszusprechen.

Wenn der »lange Arm« nicht ausreicht . . .

Stellen wir uns die Demontage eines Kernreaktors vor. Baugruppe um Baugruppe, Einzelteil um Einzelteil wird mit Hilfe der großen mechanischen Manipulatoren vom Reaktor gelöst und vorsichtig an besonderen Stellen abgelegt. Einige Baugruppen und auch einzelne Teile werden zur weiteren Demontage oder zur Kontrolle in den Arbeitsbereich von kopierenden Manipulatoren gebracht, die beträchtlich kleiner sind.

Doch da! Eine unvorsichtige Bewegung, ein mißglückter Griff – und ein Teil ist aus dem Greifer herausgeglitten und auf den Boden gefallen. Bei der Montage des Reaktors wird man dieses Teil natürlich ersetzen können. Vollständige Ersatzteilgruppen sind im Zugriffsbereich der mechanischen Arme gelagert. Doch für die Prüfung der Anlage, für die Klärung, wie das Gesamtsystem im Verlauf der Erprobung funktioniert hat, ist vielleicht gerade dieses herabgefallene Teil wichtig. Es muß also an seinen Bestimmungsort gebracht werden. Wer soll das tun? Die kopierenden Manipulatoren kann man dazu nicht benutzen, denn das Einzelteil befindet sich außerhalb ihres Arbeitsbereiches und ist für sie unerreichbar. Die großen Manipulatoren sind ebenfalls ungeeignet. Das Teil ist an eine Stelle gerollt, wohin der »lange Arm« wegen seiner Größe nicht greifen kann. Denkbar ist auch, daß man das Teil überhaupt erst einmal finden muß, da es der Operator von seinem Standort aus nicht sehen kann.

In einem solchen Fall hilft ein Spezialgerät. Es handelt sich um einen etwa 1 m langen Wagen mit einem leichten Raupenfahrwerk, in dessen Mittelpunkt eine Säule von 170 cm Höhe senkrecht montiert ist (170 cm entsprechen der mittleren Größe eines Menschen). An dieser Säule bewegt sich ein Kreuzstück auf und ab, das außerdem um die Säulenachse geschwenkt werden kann; am Vorderteil des Kreuzstückes befindet sich ein »Arm«. Zu beiden Seiten sind die »Sehorgane« – Beleuchtungsvorrichtungen sowie Fernsehkameras – angeordnet. Das Gerät schleppt ein Kabel nach, über das dieser »Kleine Strolch«, wie seine Konstrukteure das Aggregat getauft haben, die notwendige Energie und die Steuersignale erhält. In umgekehrter

Richtung übermittelt das Aggregat die notwendigen visuellen Informationen (Fernsehbild) an das Schaltpult.

Der »Arm« des Aggregats ist mit einer Drucktastersteuerung ausgestattet. Seine Länge entspricht etwa der Länge des menschlichen Armes. Der »Kleine Strolch« kann kreuz und quer durch sämtliche Räume laufen, den Arm heben und damit auch die »Augen« nach oben richten bzw. nach unten senken. So kann er das herabgefallene Teil »erblicken«, mit seiner Hand ergreifen und an Ort und Stelle bringen. Er besitzt noch nicht die »intellektuellen Vollkommenheiten«, von denen Čapek sprach. Der Mangel an Intelligenz wird durch die Tätigkeit des Operators ausgeglichen. Was jedoch die Bewegungsmöglichkeiten, die »mechanische Vollkommenheit«, betrifft, so ist mit diesem Aggregat bereits viel erreicht worden.

Solche Halbroboter – fahrbare Manipulatoren – haben sich als außerordentlich nützlich für die Wartung großer Anlagen erwiesen. Ihre Kenntnis gestattet es uns auch, die wesentlichen Merkmale jener Mechanismen zu formulieren, die wir Roboter nennen wollen.

Der »Kleine Strolch« und die »mechanische Vollkommenheit«

Über die Aktionen seines Muskelapparates tritt der Mensch mit der Außenwelt in Wechselwirkung. Wir wollen zunächst versuchen, alle Bewegungen zu klassifizieren, die ein Mensch dabei auszuführen vermag.

Es erscheint sinnvoll, diese Bewegungen in drei Gruppen einzuteilen. Die erste Gruppe – wir wollen sie globale Bewegungen nennen – umfaßt Bewegungen, deren Umfang im Vergleich zur Körpergröße des Menschen groß ist. Sie werden von den unteren Extremitäten ausgeführt. Die zweite Gruppe – die wir regionale Bewegungen nennen wollen – umfaßt Bewegungen, deren Umfang mit der Körpergröße des Menschen vergleichbar ist. Ausgeführt werden sie im wesentlichen von den großen Gelenken der Arme. Die dritte Gruppe schließlich sind die lokalen Bewegungen. Sie werden vom Wirkungskreis der Hand bestimmt, deren Finger kleine Bewegungen unmittelbar in

der Arbeitszone ausführen. Ihr Umfang ist im Vergleich zu der Körpergröße des Menschen klein. Doch ohne diese Bewegungen könnte der Schneider nicht nähen, der Schlosser nicht feilen, der Pianist nicht Klavier spielen, der Mensch also nicht zu dem werden, was er ist.

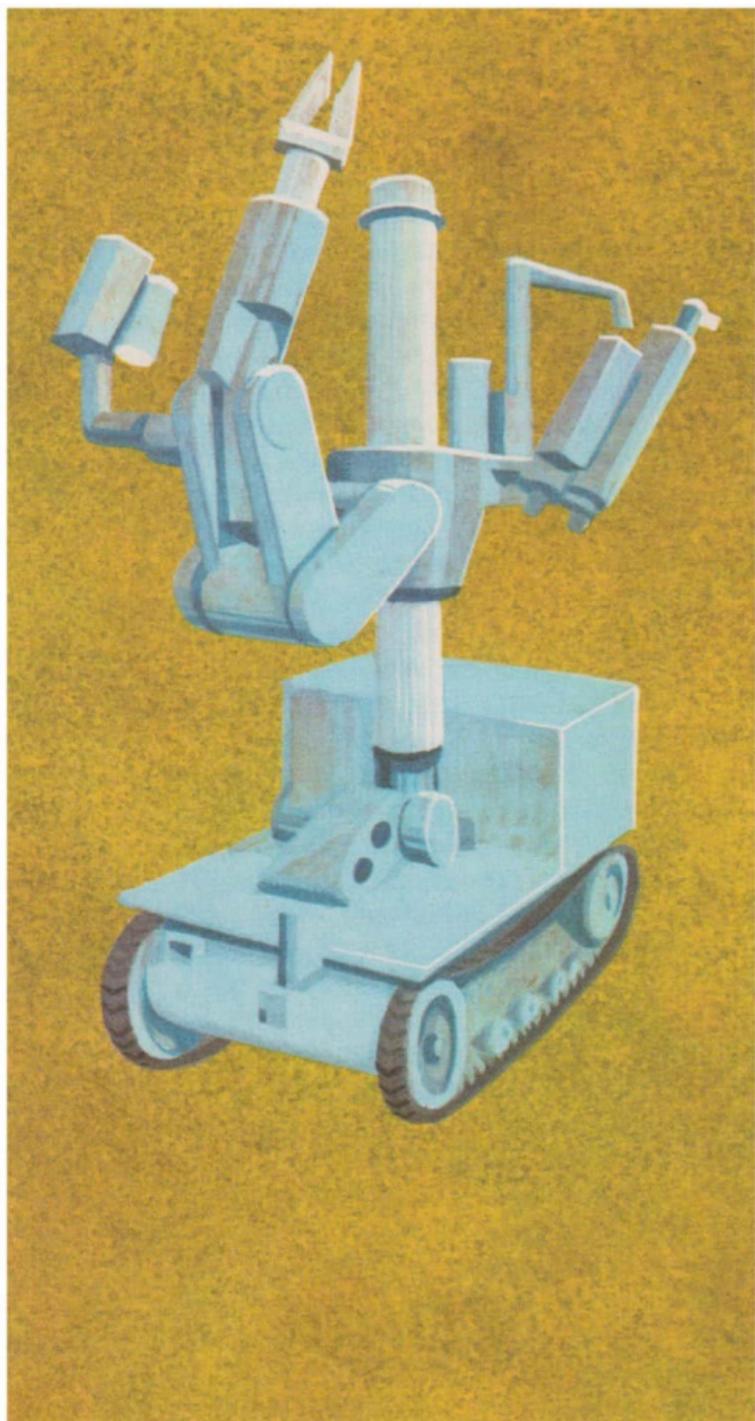
Eine derartige Klassifikation, die sämtliche Bewegungen des Menschen in globale, regionale und lokale Bewegungen untergliedert, ist natürlich nur eine grobe Annäherung und spiegelt das tatsächliche Bild der menschlichen Bewegung nur sehr ungefähr wider. In Wirklichkeit stellen seine natürlichen Bewegungen höchst komplizierte Kombinationen von Anspannungs- und Erschlaffungsprozessen vieler Muskeln der Arme und Beine, ja auch des Kopfes und des gesamten Körpers dar. Sie lassen sich kaum exakt in irgendeine Klassifikation einordnen.

Die Flexibilität eines Roboters wird im Vergleich zu der des Menschen wahrscheinlich stets klein bleiben. Die Funktionen der globalen, regionalen und lokalen Bewegungen lassen sich exakter auf eine größere Anzahl künstlicher Beine, Arme und Hände aufteilen.

Uns ist hier deutlich geworden, daß der Begriff »Roboter« am ehesten für ein Gerät paßt, das in einem einheitlichen Komplex Manipulatoren enthält, die regionale und lokale Bewegungen ausführen, und das einen Stütz- und Bewegungsapparat besitzt, der die globalen Bewegungen gewährleistet.

Diese Merkmale, die sich auf die Bewegungsmöglichkeiten beziehen, charakterisieren die »mechanische Vollkommenheit« des Roboters. Der »Kleine Strolch« z. B. besitzt einen Stütz- und Bewegungsapparat; er hat einen Arm, ein Handgelenk und einen Greifer. Er ist imstande, globale, regionale und lokale Bewegungen auszuführen. Zu einem »echten« Roboter gehören aber auch noch andere Merkmale, die seine »intellektuelle Vollkommenheit« und seine Selbständigkeit ausmachen. Bei dem »Kleinen Strolch« sind sie auf einem niedrigen Niveau stehengeblieben, und das macht ihn zum Halbroboter.

Der »Kleine Strolch«, eine ferngesteuerte mechanische Hand mit Raupenfahrwerk



Im Rahmen des italienischen Kernforschungsprogramms wurde der fahrbare Manipulator »Mascot« entwickelt.

Dieses Aggregat besteht aus einem ferngesteuerten Wagen, der vorwärts- und rückwärtsfahren sowie nach rechts oder links schwenken kann. Zwischen zwei mechanischen Händen ist eine Plattform angeordnet, die einen einstellbaren Drehkranz trägt. An diesem befindet sich eine Fernsehkamera, mit der die auszuführenden Arbeiten beobachtet werden können. Während der »Kleine Strolch« einhändig ist und zwei Augen besitzt, verfügt »Mascot« über zwei Hände und ein Auge.

Die Arme dieses Roboters können sich erforderlichenfalls an jeder beliebigen Stelle eines großen Raumes befinden, und zwar in der Höhe und Stellung, die für Beobachtungen und für Eingriffe in der Arbeitszone am bequemsten sind. Die Möglichkeit, globale Bewegungen auszuführen, vergrößert die Universalität und Anpassungsfähigkeit des Halbroboters beträchtlich.

Die Bewegungen des Wagens steuert der Operator, indem er Fußschalter betätigt. Der Operator bewegt seine Füße, und der Roboter »geht« im Raum umher. Seine Arme kopieren die Bewegungen der Arme des Menschen, und seine künstlichen »Augen« gewährleisten die visuelle Verbindung des Menschen mit der Arbeitszone, so daß der »Anwesenheitseffekt« gegeben ist. Wenn beide Teile des Systems »Mensch – fahrbarer Manipulator« gut aufeinander »abgestimmt« sind, dann empfindet der Operator die Bewegungen und Handlungen des technischen Geräts als seine eigenen.

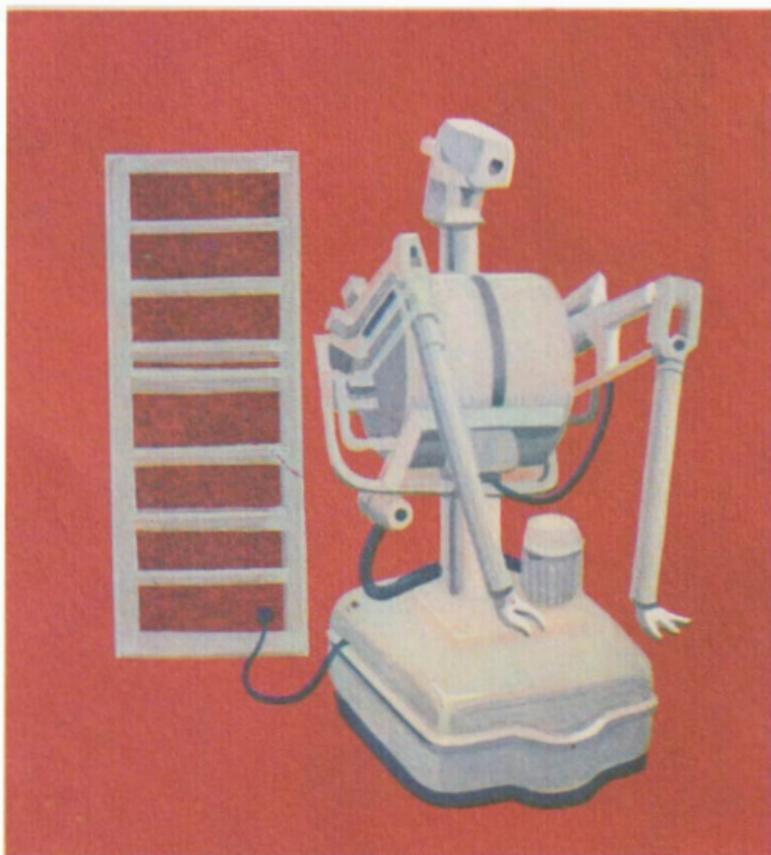
Im Februar 1966 wurde in den USA eine derartige Maschine zum »Helden des Tages«. In einem Chikagoer Krankenhaus war eine Kapsel mit radioaktivem Kobalt aus ihrem Behälter herausgefallen. Die Situation konnte geklärt werden, als man aus dem Atomzentrum einen Halbroboter herbeiholte, der den »Lippenstift« fand und ihn wieder in den Container »einsperrte«.

In der Atomtechnik war – wie wir bereits festgestellt haben – die Einführung der Manipulatoren erforderlich, weil etwas mit den Händen berührt werden mußte, was der Mensch unter gar keinen Umständen tatsächlich berühren

durfte. Das gefährliche Objekt wurde in eine isolierte Kammer gebracht, und man begann, es zunächst einfach mit langen Zangen bzw. Pinzetten »zu betasten«, die durch die Kammerwände hindurchgeführt wurden. Bald darauf wurden spezielle Manipulatoren konstruiert.

In dem Maße, wie die Operationen komplizierter wurden und immer größere Vielfalt erlangten – anfangs an Werkstoffen, später an Erzeugnissen, Einzelteilen, Baugruppen, ganzen Maschinen und Komplexen –, in dem Maße, wie neue Anwendungsgebiete und neue Zweige der Kernenergetik entstanden, nahm auch die Notwendigkeit

Zwei Greiferarme, die an einem eisernen Rumpf befestigt sind, eine mit Rädern versehene Plattform und eine Fernsehkamera sind wichtige Teile dieses aus Italien stammenden Halbroboters »Mascot«.





zu, immer neue Typen von Manipulatoren und Halbrobotern zu bauen.

Bei dem Versuch, die Ideen und Lösungen zu ordnen, auf deren Grundlage fahrbare Manipulatoren gebaut werden, stößt man auf zwei prinzipiell unterschiedliche Arten des Herangehens. Der eine Weg besteht darin, dem Menschen die Möglichkeit zu geben, so nahe wie nur irgend möglich an das Objekt heranzukommen. Bei dem anderen Verfahren wird der Anwesenheitseffekt des Menschen durch den Einsatz von Fernsehsystemen erreicht. Beide Wege haben nicht nur in der Kerntechnik Anwendung gefunden, sondern auch in der Tiefsee- und Raumfahrttechnik.

Im Jahre 1961 wurde in den USA das mobile Manipulatoraggregat »Beetle« (Käfer) entwickelt. Diese gigantische Maschine mit einem Gewicht von 85 t, die auf dem Fahrwerk eines Panzers montiert ist, trägt eine Kabine für drei Personen und ist zum Schutz gegen radioaktive Strahlung mit 30 cm dicken Bleiplatten verkleidet. Im Inneren der engen, mit drei Sichtfenstern ausgestatteten Kabine befinden sich ein Periskop (Rundsichtfernrohr) sowie drei Fernsehanlagen, die das Gesichtsfeld der Operatoren erweitern. Die Kabine, auf einer Teleskopsäule ruhend, kann mit Hilfe eines hydraulischen Antriebs auf eine Höhe von über 4 m gehoben und außerdem um 360° geschwenkt werden. Sie ist mit zwei drucktastergesteuerten Manipulatoren »bewaffnet«; jeder von ihnen besitzt neun Freiheitsgrade. Die Steuerung erfolgt nach dem Prinzip, das wir bereits kennen. Jede der voneinander unabhängigen Bewegungen des Armes wird durch einen besonderen Griff gesteuert. Bringt man den jeweiligen Griff in Mittelstellung, dann wird die Bewegung ausgeschaltet, bei einer Drehung nach links erfolgt eine Bewegung in der entsprechenden Richtung. Je weiter der Griff gegen die Mittellage ausgelenkt wird, um so rascher vollzieht sich die Bewegung.

Eine Vorstellung von den Möglichkeiten dieser Manipulatoren geben folgende Zahlen: Die Länge des

Dieses fahrbare Labor (»Beetle«) dient der Arbeit im Bereich starker Kernstrahlung.

»Armes« beträgt in ausgestrecktem Zustand etwa 5 m, seine Belastbarkeit in dieser Stellung erreicht 50 kp.

Der »Käfer« ist für jene Zwecke bestimmt, von denen schon die Rede war: für die Wartung von Triebwerken, für Arbeiten zur Behebung von Havarien, für die Demontage von Kernkraftanlagen usw. Das Gerät wurde nur in einem einzigen Exemplar gebaut. Seine Kosten, die Aufwendungen zur Aufrechterhaltung der Arbeitsfähigkeit und der Sicherheit der Besatzung waren unverhältnismäßig hoch. Sie werden auch nicht durch die Vorzüge kompensiert, die sich aus der Anwesenheit der Operatoren in unmittelbarer Nähe des »Orts der Handlungen« ergeben.

Ferngesteuerte Systeme besitzen demgegenüber wesentliche Vorteile, da mit ihrer Hilfe alle Steuerungsaufgaben, die der Mensch bewältigen muß, in völliger Sicherheit gelöst und erforderlichenfalls Fachleute der verschiedensten Gebiete dazu herangezogen werden.

Eine der größten Flugzeugfirmen der USA entwickelt seit einer ganzen Reihe von Jahren fahrbare Manipulatoren, die unter der Bezeichnung »Mobots« (mobile Roboter) bekannt sind. Zu ihnen gehört z. B. ein Raupenfahrwerk mit einer Plattform (1,5 m × 2,5 m), auf der – unabhängig voneinander – zwei schwenkbare Fernsehkameras sowie zwei mechanische Arme mit einer Tragfähigkeit von jeweils 25 bis 30 kp angebracht sind. Die Arme des »Mobots« besitzen eine außerordentlich hohe Beweglichkeit. Ein Schulter-, Ellbogen- und Handgelenk besteht aus einem Kugelgelenk, wobei jede Kupplung eine Relativbewegung der entsprechenden Glieder zueinander im Bereich einer Halbkugel erlaubt. Außerdem besitzt der Handteil des Armes eine Teleskopanordnung, die bis zu 10 cm ausfahrbar ist und relativ zur Handgelenkachse rotieren kann. Die Greifkraft läßt sich zwischen 8 und 80 kp fernsteuern.

Auch die Fernsehkameras sind an Spezialarmen befestigt, damit sie nicht die Arbeit der Manipulatoren behindern. Diese Arme ähneln in ihrer Konstruktion den Manipulatoren, haben jedoch statt drei Gelenkkupplungen nur eine einzige. Die Brennweite, die Blende usw. jeder Kamera können mit Hilfe der Fernsteuerung verändert werden.

Am oberen Teil der Plattformsäule ist ein Kran montiert, der eine Tragfähigkeit von 400 kp besitzt. Im vorderen Teil des Fahrgestells befindet sich ein Stapler mit der gleichen Tragfähigkeit wie der Kran. Beide werden zum Transport verschiedener Objekte sowie zum Wegräumen von Bruchstücken oder Trümmern benutzt, die die erforderlichen Manöver und Manipulationen behindern.

Besondere Aufmerksamkeit wurde der Nachrichtenübertragung gewidmet. Komplizierte Signalsysteme erlauben die Benutzung eines einzigen Kabels von weniger als 1,5 cm Durchmesser für die Übertragung sämtlicher Steuerungssignale und zweier Fernsehbilder. Die erforderliche elektrische Leistung zur Fortbewegung und Manipulierung wird von zehn 12-V-Akkumulatorbatterien geliefert, deren Kapazität einen sechs- bis achtstündigen ununterbrochenen Betrieb des Aggregats (abhängig vom Umfang und vom Charakter der ausgeführten Bewegungen) garantiert. Über das Kabel fließt außerdem ständig ein geringer Ladestrom. Diese Energiezufuhr genügt, eine unbegrenzt lange Funktionsdauer des Systems zu gewährleisten, wenn es sich nicht von Ort zu Ort bewegt, also keine globalen Bewegungen ausführt.

Die Kabeltrommel ist mit einem Antrieb ausgestattet, der mit dem Fahrgestellantrieb synchronisiert ist, so daß das 150 m lange Kabel automatisch auf- bzw. abgewickelt wird.

In den letzten Jahren erfolgten Arbeiten zur Entwicklung von funkgesteuerten fahrbaren Manipulatoren, die einen wesentlich größeren Wirkungsradius besitzen.

Die Schreitenden

Ein historischer Exkurs

Unser ferner Vorfahr schleppte sämtliche Lasten »auf dem eigenen Buckel«. Er packte sich das erlegte Tier auf den Rücken und trug es zum Lager. Dabei umging er Felsbrocken. Er bahnte sich seinen Weg durch dichtes Gestrüpp. Er stapfte durch sandigen oder lehmigen Boden. Selbst durch Sümpfe fand er einen Weg. Er überwand steile Abhänge, Berge und Felsen. Eine Abschätzung seiner Möglichkeiten ergibt, daß er am Tage eine Last, die seinem eigenen Körpergewicht entsprach, 15 bis 25 km weit tragen konnte.

Die Transportmöglichkeiten wuchsen beträchtlich, als der Mensch auf den Gedanken kam, zu diesem Zweck Tiere einzusetzen. Das Tragvermögen eines Lasttieres übersteigt das eines Menschen etwa um das Dreifache, wobei die Reichweite der Transporte etwas zunimmt. Allerdings ist das Lasttier beim Überwinden steiler Abhänge nicht so geschickt wie der Mensch. Es kann sich auch im Waldesdickicht seinen Weg nicht ohne weiteres bahnen, und im weichen Boden bleibt es stecken.

Vor etwa 6000 Jahren erfand der Mensch das Rad. Der Wagen mit Rädern vergrößerte die Möglichkeit, Lasten zu transportieren, im Vergleich zum Lasttier fast um das Zehnfache. Doch mußte hierbei der Reiseweg sorgfältig ausgewählt werden: Selbst geringfügige, für den Menschen unkomplizierte Hindernisse waren für den Wagen unüberwindlich; ein künstlicher Weg wurde gebraucht. Verbesserte Fahrzeuge und höhere Geschwindigkeiten erforderten bessere Straßen, und verbesserte Straßen

wiederum eröffneten den Weg zur Verbesserung der Fahrzeuge. Diese Wechselbeziehung zeigt sich z. B. auch an der Entwicklung der Eisenbahn, die den Güterumschlag und die Reichweite der Transporte vertausendfacht hat.

Kraftfahrzeuge und Züge verkehren heute auf dem Festland in jeder beliebigen Richtung, und so entsteht der Eindruck, als könne man »auf Rädern« fahren, wohin man will. Die Naivität dieser Anschauung wird jedoch offensichtlich, wenn man sich daran erinnert, welche gigantischen Räume bis heute für gewöhnliche Transportmittel unpassierbar sind, und wenn man sich mit den Anforderungen vertraut macht, die in bezug auf Geländegängigkeit und Beweglichkeit an Armee-Einheiten zur Erhöhung der Verteidigungsbereitschaft gestellt werden. Seit mehreren Jahren werden auch Fahrzeuge entwickelt, die sich auf der Oberfläche anderer Planeten bewegen sollen.

Aus militärischen Gründen entstand im ersten Weltkrieg das Raupenfahrwerk. Es erwies sich als sehr geländegängig. Seitdem werden Raupenschlepper überall dort eingesetzt, wo es keine Wege gibt. Eine Vorstellung davon, wieviel effektiver das Raupenfahrwerk im Vergleich zum Radfahrwerk ist, vermitteln folgende Zahlen: Der Druck, den das Raupenfahrwerk je Flächeneinheit auf weichen Untergrund ausübt, ist sieben- bis achtmal kleiner als die entsprechenden Werte eines Radfahrzeuges. Die zur Bewegung erforderliche Leistung ist – umgerechnet auf die Masseneinheit – beim Radfahrzeug viermal größer als beim Raupenschlepper. Die optimale Lösung schien gefunden zu sein.

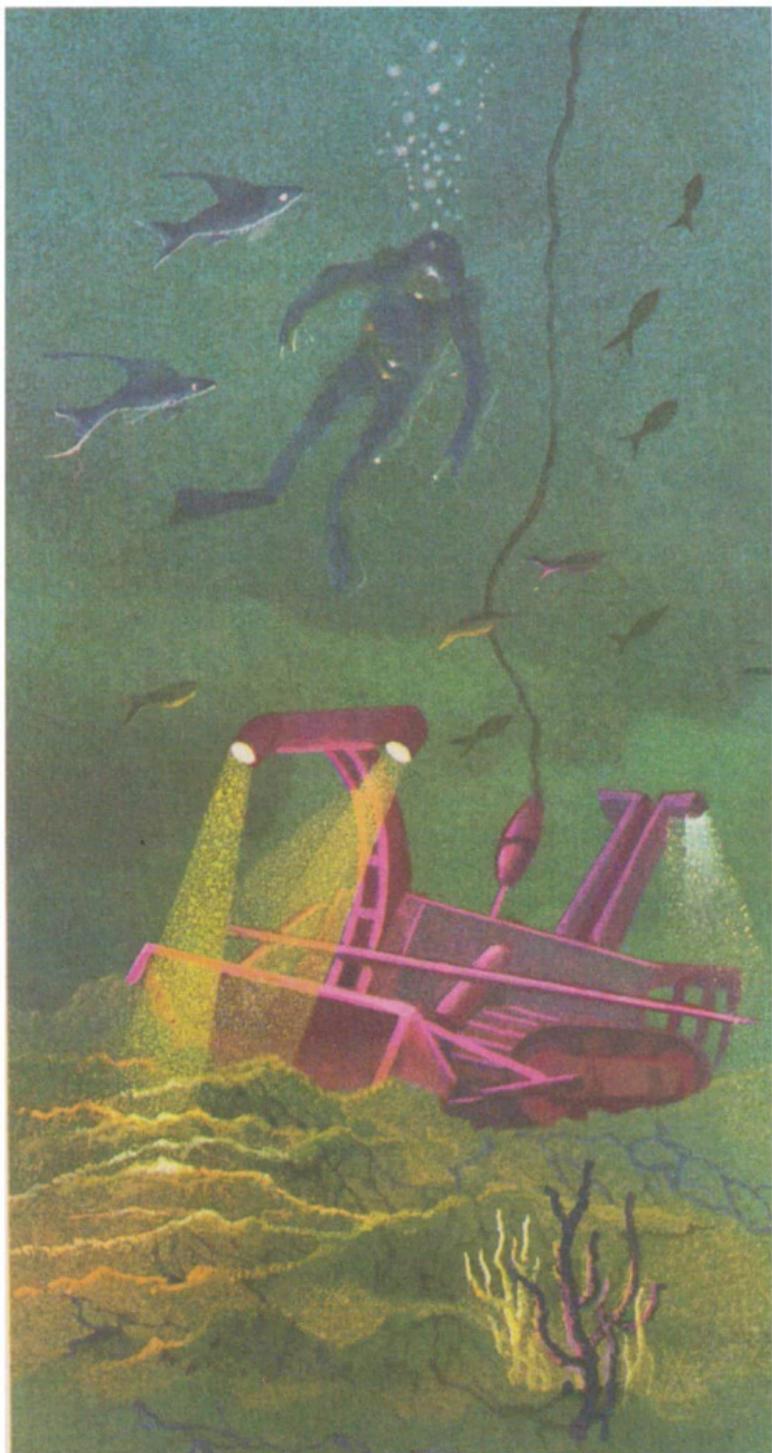
Doch die Erkundungen wurden fortgesetzt. Und so kam man auf die Idee, schreitende Maschinen, Pedipulatoren, zu bauen, die die Bewegungsfunktionen der unteren Extremitäten des Menschen oder der Extremitäten des vierbeinigen Tieres reproduzieren. Die Anzahl der Modelle und Konstruktionen, die das Schreitprinzip zur Fortbewegung ausnutzen, ist außerordentlich groß (mit der Theorie schreitender Maschinen befaßte sich insbesondere der hervorragende russische Mathematiker P. L. Tschebyschew). Das Schreitprinzip wurde beispielsweise an Schreitbaggern realisiert.

Bei der Fortbewegung über eine nicht besonders vorbereitete Oberfläche erlaubt es das Schreitprinzip, die für jeden Schritt geeignetste Stelle auszuwählen. Aber noch eine weitere Überlegung spricht zugunsten schreitender Maschinen: Der Energieaufwand für die Fortbewegung über weichen Boden verringert sich beträchtlich. Maschinen mit Rad- oder Raupenfahrwerken verrichten bei ihrer Fortbewegung eine sehr »undankbare« Arbeit. Man könnte sagen, daß sie sich selbst die Grube graben, aus der sie dann wieder herauszukommen suchen: Die tiefe Spur, die ein Rad- oder Raupenfahrwerk hinterläßt, ist das Ergebnis der Bodenverdichtung, eines Prozesses, der unvermeidlich mit hohem Energieaufwand verknüpft ist. Der Fuß einer schreitenden Maschine sinkt – wie der Fuß des Menschen – im weichen Boden ebenfalls ein. Doch zeigen Versuche, daß der Energieaufwand bei dieser Art der Fortbewegung trotz allem geringer als bei Rad- oder Raupenfahrwerken ist.

Naturgemäß weisen die schreitenden Maschinen aber auch eine Reihe von Mängeln auf. Die Beine einer schreitenden Maschine vollführen relativ zu ihrem Körper – ebenso wie die Füße relativ zum Rumpf des Menschen – eine sehr komplizierte Bewegung. Erhöht sich die Fortbewegungsgeschwindigkeit, so vergrößert sich auch die Trägheitsbelastung. Eine schreitende Maschine kann sich deshalb niemals auch nur halbwegs so schnell fortbewegen wie eine Radmaschine. Daher wird es auch niemals zweckmäßig sein, schreitende Maschinen auf Straßen einzusetzen. Die Konstruktion der »Beine« einer schreitenden Maschine ist – ebenso wie die des lebendigen Beines – verhältnismäßig kompliziert und enthält mehrere bewegliche Kupplungen, von denen jede einen eigenen Antrieb benötigt.

Diese Mängel des Schreitens sind der unvermeidliche Preis für die Geländegängigkeit und Beweglichkeit des schreitenden Wesens. Der Mensch kann sich leicht und

Unterwasser-Bulldozer (Japan) für Bau- und Forschungsarbeiten in Meerestiefen bis 60 m, ein 34 t-Apparat, der selbsttätig oder ferngesteuert operieren kann

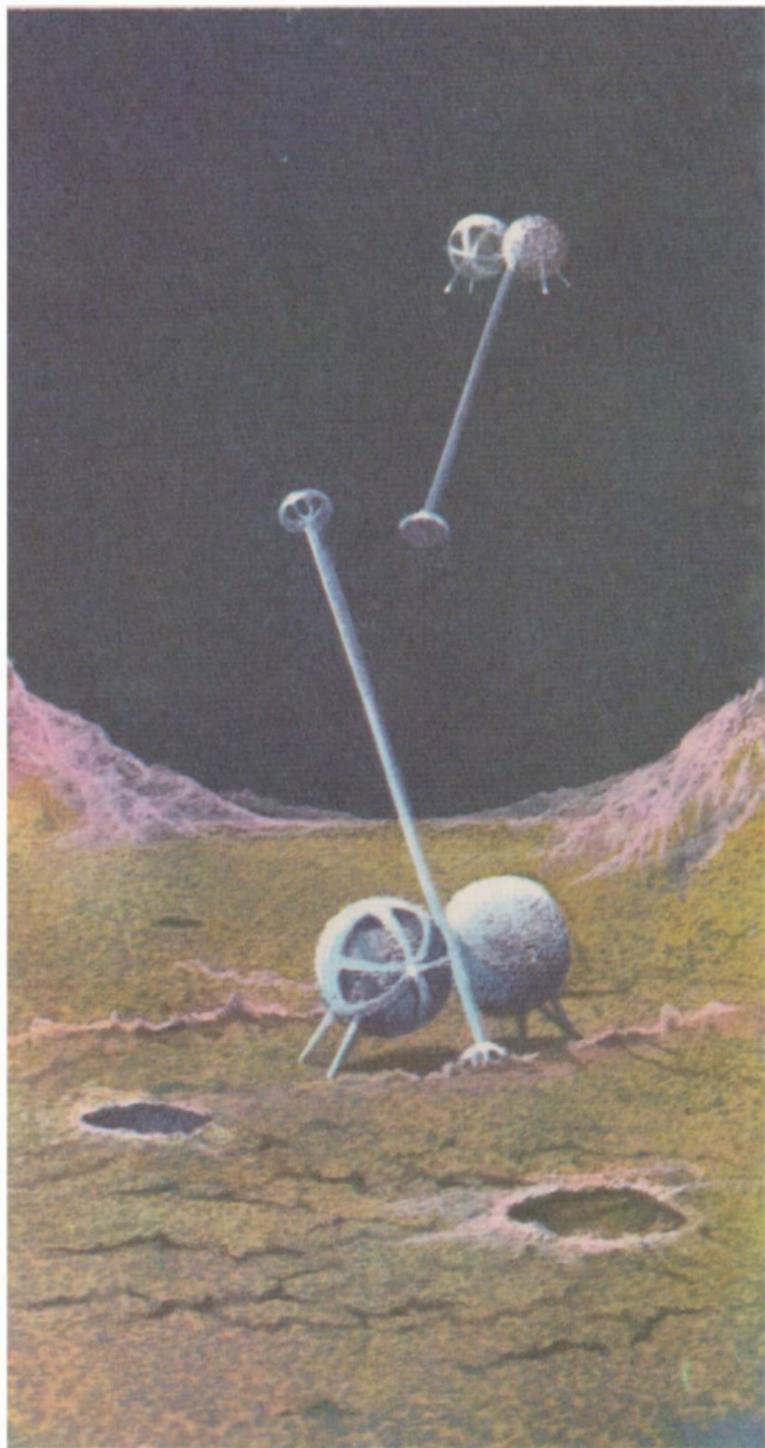


schnell um seine senkrechte Achse drehen, er kann mit einem Bein oder mit beiden Beinen sowohl auf einer ebenen als auch auf einer unebenen Fläche springen. Er überwindet Treppenstufen und kann, ohne sich umzuwenden, rückwärts oder seitwärts gehen; er kann sich niederhocken, die Gangart wechseln, rennen, über Hindernisse hinwegsteigen oder springen. Die erstaunlichen Möglichkeiten dieser Art der Fortbewegung waren es, die die Erkundungsarbeiten der Ingenieure, Wissenschaftler und Konstrukteure auf das Schreiten gelenkt haben. Dabei wurden zunächst die Bewegungsarten verschiedener Tiere untersucht, die sich im Schritt, im Lauf und Trab, im Galopp oder in Sprüngen fortbewegen.

Anfangs erschien die sprungartige Fortbewegung am günstigsten. Der Mechanismus einer springenden Maschine ist verhältnismäßig einfach: Zwei nicht im Gleichgewicht befindliche Massen, die gegensinnig rotieren, entwickeln diskontinuierlich eine längs einer bestimmten Achse angreifende Kraft. Die Angriffsrichtung der Kraft läßt sich durch eine zusätzliche Schwenkung von Gewichten leicht steuern. Unter der diskontinuierlichen Wirkung dieser Kraft kann eine Platte mit den Gewichten und einem Motor, der die Gewichte in Drehung versetzt, vorwärts oder rückwärts springen; durch Änderung der Rotationsgeschwindigkeit der Gewichte ist die Sprungweite regelbar. Alles schön und gut, aber ...

Ein Grashüpfer, der sich von der Erde abgestoßen hat, hält das Gleichgewicht mit Hilfe seiner Flügel, und er ändert auf diese Weise auch seine Bewegungsrichtung, wenn er sich einen Landepunkt sucht. Das Känguruh benutzt für den gleichen Zweck seinen Schwanz. Auch eine springende Maschine muß mit Stabilisierungs- und Steuerungsvorrichtungen ausgestattet werden, damit sie sich im Flug nicht überschlägt. Das ließe sich vielleicht noch schaffen, aber dann bliebe von der erstrebten Einfachheit der Konstruktion nichts mehr übrig. Je höher und weiter der Sprung wäre, um so stärker müßte dann auch der

Eine interessante, phantasievolle Variante: der »Mondhüpfer« nach dem Känguruhprinzip mit 12 m langen, federnden Stelzen für Sprünge bis 120 m



Aufprall auf der Erde sein, und um die Maschine mit ihrer Nutzlast vor dem Bruch und die Besatzung vor Prellungen zu bewahren, müßte man die ganze Vorrichtung mit Stoßdämpfern ausstatten, die in ihrer Wirkung den Hinterbeinen des Känguruhs oder des Grashüpfers vergleichbar wären.

Die Suche nach geeigneten Konstruktionen hat deshalb zu Maschinen geführt, die sich so vorwärtsbewegen, daß stets eines der »Beine« unmittelbaren Kontakt mit dem Erdboden hat. Auch hier ergeben sich viele Fragen, die mit dem Versuch im Zusammenhang stehen, die Gangart eines auf Füßen schreitenden Wesens nachzubilden. Um uns davon zu überzeugen, wollen wir den linken Fuß ein wenig vor den rechten setzen und danach nur einen einzigen Schritt tun. Verfolgen wir dabei, mit welchen Handlungen dieser Schritt gekoppelt ist.

1. Zuerst setzt sich der Rumpf in Bewegung, und zwar so, daß der Schwerpunkt des Körpers nach vorn und ein wenig nach links verlagert wird, d. h., das Körpergewicht wird auf den linken Fuß übertragen.

2. Das rechte Bein wird langsam in Hüft- und Kniegelenk abgewinkelt. Die rechte Ferse hat sich bereits vom Erdboden gelöst; nun stößt sich die rechte Fußspitze ab und erteilt dem Körper eine Vorwärtsbewegung.

3. Das rechte Bein befindet sich in der Luft. Mit verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten bewegen sich Oberschenkel und Unterschenkel so, daß sie, sobald sie sich vor dem linken Bein befinden, eine gerade Linie bilden, und ihre Geschwindigkeit hat sich in dem Augenblick verlangsamt, in dem die rechte Ferse den Erdboden berührt.

4. Die Bewegung des Körpers setzt sich jedoch fort, und in dem Augenblick, in dem die rechte Ferse die Erde berührt hat, beginnt sich das Körpergewicht auf das rechte Bein (vorwärts und etwas nach rechts) zu verlagern.

So sieht der Mechanismus eines einzigen Schrittes in sehr groben Zügen aus. Er geht mit äußerst komplizierten Bewegungen der Arme, des Rumpfes und des Kopfes einher. Dabei bewegen sich alle diese Teile des menschlichen Körpers in unterschiedlichen Richtungen und mit verschiedener Amplitude und Geschwindigkeit. Es gibt noch keine technischen Möglichkeiten, eine so kom-

plizierte Bewegung künstlich nachzubilden, und bei den Versuchen, eine schreitende Maschine zu bauen, ist keine Rede davon, den gesamten Schreitmechanismus des Menschen oder des Vierbeiners nachzubilden. Das »Bein« der Maschine ist ebenso wie der »Arm« des Manipulators nur angenähert menschenähnlich und kann die Bewegungsfunktionen einer natürlichen unteren Extremität nur in ganz bescheidenem Umfang reproduzieren.

Lastkraftwagen auf Beinen

Als Kind haben Sie gewiß einmal versucht, auf Stelzen zu gehen. An einem langen Stock sind in einer gewissen Höhe Stützen für die Füße befestigt, und damit ist die ganze Stelzenkonstruktion fertig.

Wer versucht hat, Stelzen zu benutzen, weiß, daß es viel leichter ist, sich auf Stelzen fortzubewegen als auf Stelzen stehenzubleiben. Auch ein kleines Kind lernt zuerst das Gehen und danach das Stehenbleiben.

Man kann die Stelzenkonstruktion etwas komplizierter machen, indem man sie mit einem zweigliedrigen Mechanismus versieht, der den Oberschenkel und den Unterschenkel unseres Beines imitiert. Verbindet man zwei derartige Stelzen durch eine gemeinsame Platte, dann kann man einen zweibeinigen, schreitenden Mechanismus konstruieren. Um solche mechanischen Beine in Bewegung zu versetzen, lassen sich äußere Energiequellen verwenden, beispielsweise ein elektrischer oder hydraulischer Antrieb, während die Steuerungsfunktion dem Menschen überlassen bleibt. Wir erhalten eine zweibeinige, schreitende Maschine. Doch ihre Steuerung wird die Aufmerksamkeit des Operators während der gesamten Betriebsdauer beanspruchen, denn beim Auf-der-Stelle-Stehen darf er sich vom ständigen Balancieren keine Sekunde lang ablenken lassen. Der wesentliche Einwand gegen zweibeinige, schreitende Maschinen dürfte jedoch vermutlich darin bestehen, daß eine Katastrophe unvermeidlich wird, wenn der Antrieb eines Beines plötzlich ausfällt.

In den Geschöpfen der belebten Natur zeichnet sich eine

gewisse »Gesetzmäßigkeit« ab: Je niedriger die Organisation eines Tieres ist, um so mehr Beine hat es. Den Insekten hat die Natur sechs Beine verliehen, den auf »Füßen« laufenden Tieren vier Beine und der »Krone der Schöpfung«, dem Menschen, nur zwei. Bei der Entwicklung schreitender Maschinen mußte man etwa den gleichen Weg einschlagen, d. h., man mußte die Anzahl der Beine um so höher wählen, je niedriger das »Organisationsniveau« der Maschine war.

Beginnen wir unsere Bekanntschaft mit schreitenden Maschinen bei einem vierbeinigen Gerät, das man hin und wieder als »schreitenden Lkw« oder auch als »mechanisches Pferd« bezeichnet. Die Maschine wiegt etwa 1,5 t, ihre Länge erreicht 3,5 m, ihre Höhe 3 m und die Länge eines Beines 2,3 m. Sie ist mit einem 90-PS-Motor ausgestattet, der eine hydraulische Pumpe in Gang bringt, die die hydraulischen Antriebe der Beinmechanismen speist.

Jedes Bein stellt einen dreigliedrigen Hebel oder einen dreigliedrigen Manipulator dar, dessen Glieder sich in einer Ebene bewegen. Die Bewegung jedes einzelnen Gelenks erfolgt über einen getrennten Antrieb. Der Operator befindet sich in einer Kabine, die im zentralen Teil der Maschine liegt; mit den Händen steuert er die Vorderbeine der Maschine und mit den Füßen die Hinterbeine. Die Steuerung besteht darin, daß der Operator gewissermaßen in der Kabine »läuft« und die Arme und Beine in einer bestimmten, ihm gewohnten Folge bewegt, wobei er Griffe in den Händen hält, während seine Füße in Pedalen stecken. Gleichzeitig mit den Bewegungen der Handgriffe und Pedale beginnen sich die Beine des »mechanischen Pferdes« zu bewegen, dessen Tragfähigkeit 500 kp und dessen Geschwindigkeit 10 km/h erreicht. Der Operator steuert gleichzeitig zwölf Antriebe und kann sowohl die Schrittlänge als auch die Geschwindigkeit des »Pferdes« auf natürliche Weise verändern. Alle Steuerungskanäle sind doppelläufig, d. h., der Operator »fühlt« den Widerstand des Bodens, wenn das Bein der Maschine darauf tritt.

Naturgemäß erfordert die Steuerung einer derartigen Maschine vom Operator gewisse Fertigkeiten. Der Mensch als glücklicher Besitzer von nur zwei Beinen braucht nicht darüber nachzudenken, mit welchem Bein er den nächsten

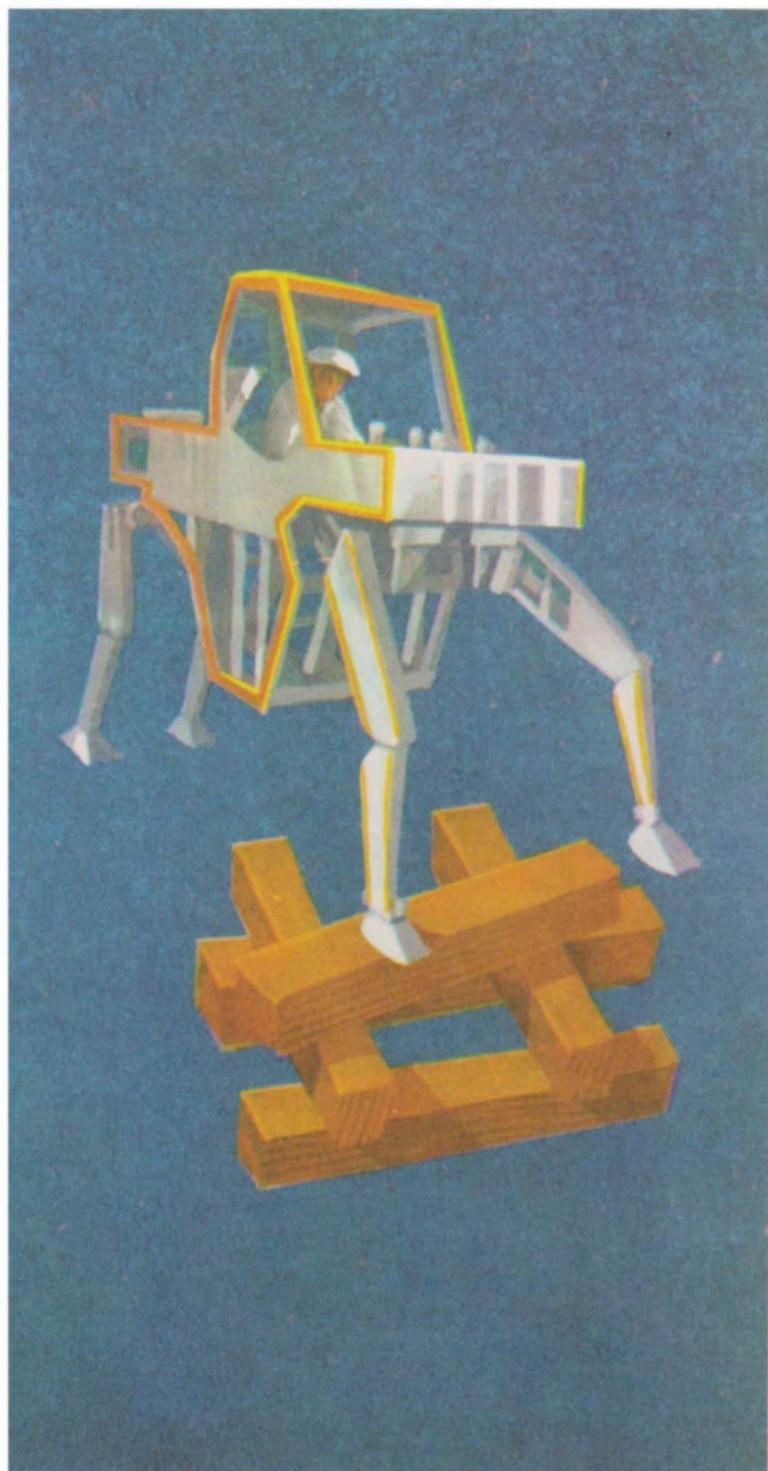
Schritt tun soll, wenn er den ersten Schritt mit dem linken Bein vollzogen hat. Es ist klar, daß der zweite Schritt dann mit dem rechten Bein erfolgen muß, weil er sonst riskiert, in eine Stellung zu geraten, die man beim Turner als Spagat bezeichnet.

Vollziehen wir ein Gedankenexperiment: Ein Vierbeiner, der mit dem linken Vorderbein einen Schritt getan hat, steht plötzlich vor dem Problem, unter einer Anzahl von Möglichkeiten zu entscheiden, was nun geschehen soll. Um uns über diese Situation klarzuwerden, wollen wir das linke Vorderbein unseres mechanischen Pferdes mit der Zahl 1, das rechte Vorderbein mit der Zahl 2, das rechte Hinterbein mit der Zahl 3 und das linke Hinterbein mit der Zahl 4 bezeichnen. Weiter wollen wir annehmen, daß sich immer nur ein Bein zur gleichen Zeit in der Luft befinden kann, weil die Maschine sonst umkippt. Wenn wir nun alle Schrittvarianten durchgehen, dann zeigt sich, daß sechs Gangarten möglich sind, abhängig davon, welche Reihenfolge man einhält:

1-2-3-4	1-3-4-2
1-2-4-3	1-4-3-2
1-3-2-4	1-4-2-3

Die Analyse zeigt, daß die verschiedenen Gangarten einen unterschiedlichen Stabilitätsgrad aufweisen. Für das Pferd und die Kuh hat die Natur bei langsamer Gangart (z. B. auf der Weide) den Typ 1-3-2-4 festgelegt, der maximale Stabilität bewirkt.

Soll nun eine »Schreitmaschine« auf diese Weise gesteuert werden, so muß sich der Operator durch intensives Training eine Reihe wichtiger Besonderheiten aneignen, durch die sich die »Maschinengangart« beträchtlich von der natürlichen Gangart unterscheidet. In erster Linie bestehen Divergenzen zwischen dem Augenblick, in dem die Widerstände an den Maschinenbeinen und beweglichen Kupplungen angreifen, und dem Zeitpunkt, an dem der Operator diesen Widerstand empfindet. Er sitzt und strengt sich deshalb bei den Bewegungen der Maschine erheblich weniger an als ein Mensch beim Gehen, der dabei ja – im Gegensatz zum Operator des Schreitroboters – das volle Gewicht seines Körpers empfindet. Dazu kommt, daß die Steuerungsbewegungen des Operators in vierfach ver-



größertem Maßstab auf die Maschinenbeine übertragen werden. Ein Schritt der Maschine ist viermal so groß wie ein »Schritt« des Operators. Es ist deshalb leicht einzusehen, daß bestimmte Fertigkeiten erst einmal erlernt werden müssen, um die Kräfte und Bewegungen in ein angemessenes Verhältnis zueinander zu bringen.

Ungeachtet dieser und anderer Besonderheiten, die die Aufgabe des Operators komplizieren, zeigten die Versuche, daß es möglich ist, diese Form der Wechselwirkung zwischen Mensch und Maschine zu realisieren. Die Maschine gehorchte dem Operator und ging bei den Prüfungen vorwärts und rückwärts, sie drehte sich auf der Stelle, balancierte auf zwei diagonal zueinander liegenden Beinen, schlüpfte durch schmale Lücken, schleppte eine Last von 500 kp hinter sich her, hob mit einem Vorderbein eine Last von 200 kp und beförderte sie auf die Ladefläche eines Kraftfahrzeuges usw.

Die Arbeiten zur Weiterentwicklung des schreitenden Lastkraftwagens tragen Erkundungscharakter. Sie sind also experimenteller Natur. Doch auf ihrer Grundlage entstehen neue Ideen. So wird insbesondere in der technischen Literatur die Möglichkeit diskutiert, eine Maschine zu entwickeln, die das Schreitprinzip mit dem Abrollprinzip kombiniert.

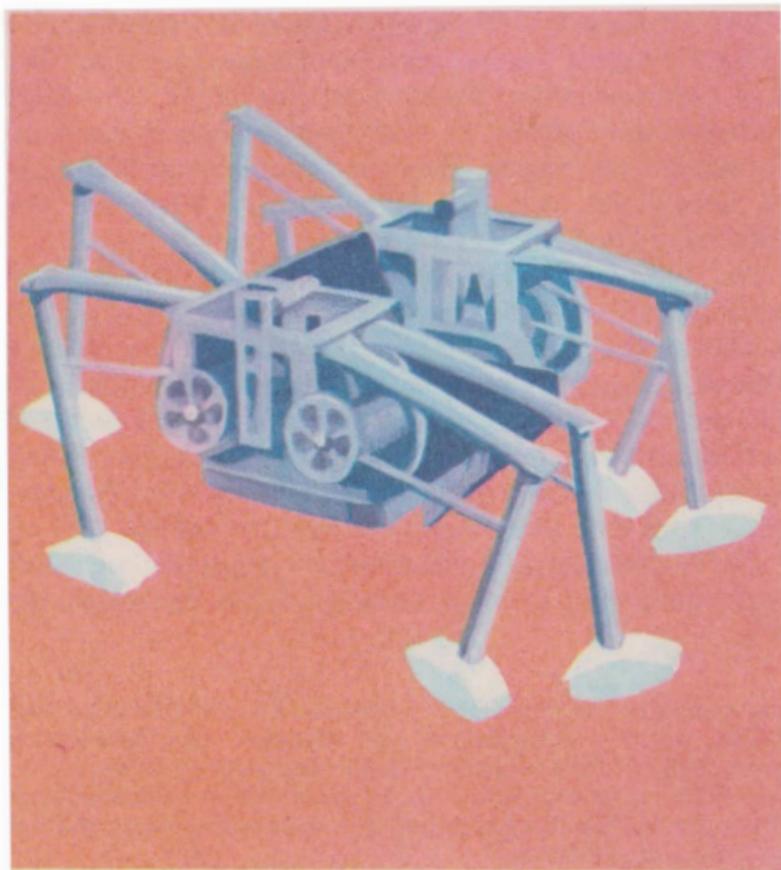
Es sind auch bereits einige Typen vielbeiniger schreitender Automaten entwickelt worden. So gibt es z. B. einen mechanischen Fußgänger auf acht Beinen (Länge: 180 cm; Breite: 120 cm; Höhe: 90 cm). Er stellt ein Gehäuse dar, das die Antriebsmechanismen enthält und sich auf weit auseinander stehende Füße stützt, die an den Ecken dieses Gehäuses paarweise angeordnet sind. Als Energiequelle wird eine Akkumulatorbatterie verwendet.

Die Schrittkinematik, die die Bewegungsbahn der Beine bestimmt, umfaßt vier Intervalle: das Stützintervall, das die

Der Operator steuert diesen »Schreit-Lkw« mit Händen und Füßen, wobei – entsprechend der »Gangart« des Operators – gleichzeitig zwölf Bewegungen koordiniert werden können. Die »Füße« der Maschine können auch als »Hände« dienen: Dieser »Roboter« vermag Balken gegen eine Wand zu schmetterern, aber auch Äpfel zu pflücken.

Hälfte der Bewegungszeit der Beine beansprucht, das Hubintervall des einen Beines, das Aufsetzen des Beines und das Übertragungsintervall des Beines. Die drei letzten Etappen, in deren Verlauf das Bein die Stützfläche nicht berührt, umfassen zusammen die andere Hälfte der Gesamtzeit, die ein Schritt braucht. Bei dieser Kinematik stützt sich die achtbeinige (oder sechsbeinige) Maschine im Bewegungsverlauf stets auf vier (oder drei) Beine und behält ein stabiles Gleichgewicht. Damit ist die Bewegungsgeometrie der Maschine vollständig definiert. Einmal in einer bestimmten Richtung in Bewegung gesetzt, wird sich diese Maschine über ebene Wegabschnitte fort-

Der »mechanische Fußgänger«: Seine »Gangart« ist durch Größe und Konstruktion des Mechanismus bestimmt. Unterschiedlichen Geländebedingungen kann er sich anpassen.



bewegen, Steigungen überwinden, über Hindernisse hinwegklettern und innerhalb der Grenzen, die durch deren Größe und die Leistung des Antriebs abgesteckt sind, »alles tun, was möglich ist«.

Die beiden Motoren treiben – unabhängig voneinander – ihre vier linken bzw. vier rechten Beine an. Bei Vorwärts- oder Rückwärtsgang rotieren sie immer in der gleichen Richtung. Damit die Maschine nach links oder rechts schwenkt, genügt es, die Motoren so zu schalten, daß sie gegensinnig rotieren.

Sehen wir uns noch ein weiteres Beispiel an, das die Möglichkeiten schreitender Maschinen illustriert.

In der medizinischen Praxis wird (in sehr begrenzter Anzahl) ein Rollstuhl mit elektrischem Antrieb für die selbständige Fortbewegung von Patienten mit amputierten oder gelähmten Extremitäten verwendet. Die Geländegängigkeit des elektrischen Rollstuhls ist sehr begrenzt, denn er kann sich nur auf glattem Boden fortbewegen.

So wurde die Aufgabe gestellt, einen schreitenden Stuhl für ein krankes Kind zu entwickeln, das, in diesem »Gerät« sitzend, imstande sein soll, selbständig seinen Aufenthaltsraum zu verlassen, im Garten »spazierenzugehen« usw. Die voneinander unabhängigen elektrischen Antriebe für die vier rechten und die vier linken Beine erlauben eine Bewegungsänderung des Stuhls. Zu ihrer Steuerung genügt ein einziger Hebel. Die Erfahrung hat gezeigt, daß ein krankes Kind mit der Steuerung eines derartigen Stuhls selbst dann fertig wird, wenn es weder Beine noch Arme bewegen kann. Es genügt, den Kopf zu bewegen und mit dem Kinn den Steuerhebel vor oder zurück, nach rechts oder nach links zu stellen.

Hier sollen einige der technischen Bedingungen genannt werden, die bei der Projektierung des schreitenden Stuhls gestellt worden sind: Der Stuhl soll eine Bordsteinkante von 15 cm Höhe aufwärts und abwärts überwinden; er soll einen Sandstrand passieren können; er soll einen Weg, auf dem die Höhe der Unebenheiten bis zu 10 cm beträgt, begehen können; die Bewegung über Abhänge mit einer Steigung bis zu 15° soll stabil sein, und die Tragfähigkeit muß mindestens 30 kp betragen.

Auch ein Haus mit Treppen und Schwellen oder eine Straße mit Gehwegen und Bordsteinkanten kann »unwegsam« sein, wenn die Fortbewegungsmittel diesen Bedingungen nicht angepaßt sind. So ist vieles, was für einen gehfähigen Menschen kein Hindernis bedeutet, für einen Wagen mit Rädern unpassierbar. Welche Grenzen sind aber dem Erfindungsreichtum des Menschen gesetzt?

Wenn irgendwann einmal Wirklichkeit wird, wovon die Autoren wissenschaftlich-phantastischer Romane träumen, und die Menschen in ihren Fabriken und in ihren Wohnhäusern Roboter einsetzen – was soll man dann noch tun? Soll man die Fabriken und Häuser so bauen, daß sie für Maschinen mit Rädern passierbar sind, oder soll man die Roboter als »Ebenbild« des Menschen konstruieren? Wir meinen, daß über die schreitenden Maschinen noch nicht das letzte Wort gesagt ist. Halbroboter und Roboter der nächsten oder der fernerer Zukunft werden nicht nur unter dem Aspekt anthropomorph sein, daß sie mit mechanischen Armen arbeiten, sondern sie werden sich auch schreitend fortbewegen wie der Mensch.

Der Mensch im »Futtermal«

Bei der Entwicklung von Raumanzügen müssen sich die Wissenschaftler und Ingenieure nicht nur über den Schutz des Menschen vor der tödlichen Gefahr des Vakuums Gedanken machen. Derartige Hüllen sind nicht nur eine Schutzkleidung, sondern auch die Grenzflächen zur Umwelt, in der sich der Mensch aktiv betätigen soll. Um den erdnahen Raum zu erobern, müssen die Menschen – wie K. E. Ziolkowski sagte – mit diesem in Wechselwirkung treten. Sie müssen in ihm arbeiten, sich in ihm fortbewegen, sich dort längere Zeit aufhalten. Der Kosmonaut muß sich in einem Schutzanzug genauso unbehindert fühlen wie ein Mensch, der einen gewöhnlichen Anzug trägt.

Dieses Problem zu lösen ist nicht einfach. Der von der Luft aufgeblähte Schutzanzug behindert die Bewegungen der Arme und Beine. Die in Handschuhen steckenden

Finger verlieren an Beweglichkeit. Herkömmliche konstruktive Maßnahmen erbrachten keine wirksamen Ergebnisse. Man war deshalb gezwungen, ungewöhnliche Wege einzuschlagen.

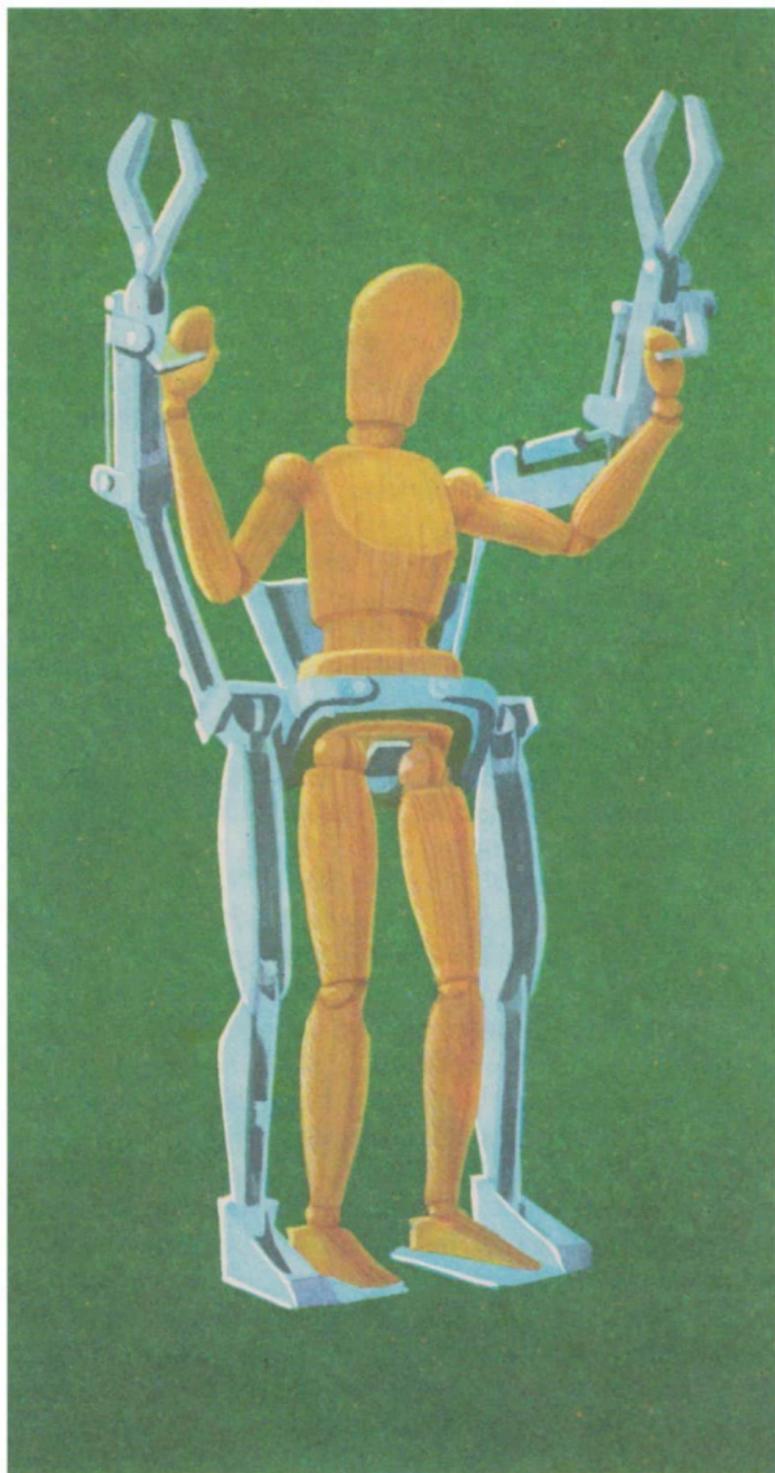
Ein solcher Weg sieht folgendermaßen aus: Wenn es dem Kosmonauten im Schutzanzug schwer fällt, die Arme und Beine zu bewegen, dann müssen äußere Energiequellen zur Unterstützung eingesetzt werden, d. h. Motoren, die den Schutzanzug in der für den Kosmonauten erforderlichen Richtung abwinkeln. Unmittelbar am Schutzanzug lassen sich diese Motoren jedoch nicht befestigen. Es muß ein eigenes »Futteral« mit beweglichen Kupplungen (Gelenken) konstruiert werden; der Kosmonaut muß gewissermaßen ein Außenskelett erhalten. Dieser »Mensch im Futteral« wird sich dann leicht neigen und die Arme und Beine bewegen können. In Übereinstimmung mit diesen Bewegungen müssen sich die entsprechenden Teile des »Futterals« abwinkeln und drehen. Die natürlichen Bewegungen des Menschen werden dadurch verstärkt, so daß er mit Lasten umzugehen vermag, die sonst nicht im Bereich seiner Kräfte liegen.

Dies ist die Kurzdarstellung eines Gerätes, das die Bezeichnung Exoskeletton (Außenskelett) erhalten hat.

Bereits bei der Konstruktion dieses Gerätes stießen die Forscher auf große Schwierigkeiten.

Die Gelenke unseres Körpers besitzen einen sehr komplizierten Aufbau. Die Gelenkköpfe und Gelenkpfannen, die jeweils ein »kinematisches Paar« bilden, sind keine einfachen Gelenke mit konstanter Drehachse. Sie rollen bei den Gliederbewegungen aufeinander ab, so daß sich die Drehachse auf den Berührungsflächen verschiebt.

Die Konstruktionsprinzipien und die geometrischen Eigenschaften lebendiger Gelenke sind jedoch noch wenig erforscht, und es ist schlechthin sinnlos, bei der Konstruktion künstlicher Gelenke den Versuch zu machen, die Natur genau nachzubilden. Deshalb verwendet man im Außenskelett ebenso wie bei Manipulatoren und Pedipulatoren anstelle komplizierter Gleitpaare gewöhnliche Gelenkkupplungen. Wenn sich jedoch die Kupplungen des Außenskeletts nicht genauso bewegen wie die natürlichen Gelenke, dann bedeutet dies, daß sich der Kosmonaut und



sein Schutzanzug verschieden bewegen. Wird dies dem Kosmonauten nicht schaden?

Aber nehmen wir einmal an, daß das Außenskelett fertig ist. Wie soll es am Menschen angebracht werden? Und gelingt das – wie kann man erreichen, daß diese Verbindung die gemeinsamen Bewegungen des biotechnischen Systems nicht behindert? Wie kann man das »Futteral« veranlassen, sich so zu bewegen, daß seine Bewegungen sowohl leistungsstark als auch schnell sind? Wie sollen am Außenskelett die Hilfsmotoren verteilt sein, die erforderlich sind, um alle beweglichen Kupplungen in Bewegung zu setzen? Diese und viele andere Fragen bilden den Inhalt nur eines Teils der Untersuchungen, die gegenwärtig in einer Reihe von Ländern durchgeführt werden.

Eine Außenskelettvariante weist eine Doppelschichtkonstruktion auf. Die innere Schicht, eine leichte, mechanische Konstruktion, streift sich der Operator über. Sie wiederholt die Hauptbewegungen des Menschen, für deren Ausführung das System insgesamt gedacht ist, und realisiert die Steuerungsfunktionen für ein hochleistungsfähiges Außenskelett, das diese Bewegungen unter mehrfacher Verstärkung kopiert. Doch was heißt mehrfach? Es muß berücksichtigt werden, daß sich die Motoren innerhalb eines Raumes befinden, der durch die relativ bescheidene Größe des Außenskeletts eingegrenzt wird. Wenn sie zu groß sind, behindern sie die Bewegungen des Operators. Dennoch läßt sich ein Außenskelett bauen, das dem Menschen die Möglichkeit gibt, eine Last von einer halben Tonne leicht aufzuheben und diese mit einer Geschwindigkeit von etwa 1,5 km/h zu tragen.

Hat der Operator aber auch die Möglichkeit, sich vom »Futteral« zu trennen, und kann er – ohne die Verbindung mit ihm zu verlieren – dessen Bewegungen und Handlungen über große oder sogar sehr große Entfernungen hinweg steuern?

Auch solche Möglichkeiten werden erforscht. Es gibt bereits einen Vorschlag, dafür bioelektrische Steuerungs-

Das Außenskelett »Hardiman«; ein beweglicher Stützapparat für das Begehen von fremden Planetenoberflächen und des Meeresbodens

systeme zu verwenden, die es erlauben, die Fernwechselwirkung zwischen dem Operator und seiner mechanischen Kopie oder sogar mehreren derartigen Kopien auf natürliche Weise zu organisieren. Dann könnten einige Dutzend Roboter gleichzeitig die Bewegungen eines Menschen wiederholen, sofern dafür eine Notwendigkeit besteht.

In seinem Roman »Der Krieg der Welten« (1898) hat der englische Schriftsteller Herbert G. Wells das phantastische Bild einer Landung von Marsbewohnern auf der Erde beschrieben, die sich mit Hilfe schreitender Maschinen

Die innere Schicht eines Außenskeletts: Die Maße der Glieder, die Konstruktion der Gelenke sowie die Elemente, mit denen das System am Körper des Operators befestigt ist, sind so gewählt, daß sie die Ausführung komplizierter Bewegungen nicht behindern.



vorwärtsbewegen. Es gibt Gründe für die Annahme, daß dieses Bild die Zukunft recht genau zeichnet. Aber es werden nicht Marsbewohner sein, die den Versuch unternehmen, die Erde zu erobern und sie ihren Bedürfnissen anzupassen, sondern die Erdbewohner werden dies mit dem Mars tun. Warum sollten die Erdbewohner dabei nicht schreitende Außenskelett-Halbroboter verwenden? Möglicherweise wird man ihre Handlungen über eine große oder auch sehr große Entfernung hinweg steuern, so daß die Menschen hierbei in einer Sicherheitszone bleiben können.

In den letzten Jahren wurden Mitteilungen veröffentlicht, aus denen hervorgeht, daß Außenskelette auch für Unterwasserarbeiten und -untersuchungen eingesetzt werden können. Das Erstaunlichste ist wohl, daß die Phantasie nicht nur die Verfasser wissenschaftlich-phantastischer Romane immer mehr beflügelt, also Leute, die von Berufs wegen das Unmögliche als real darzustellen geneigt sind, sondern daß auch Wissenschaftler und Ingenieure, die »von Berufs wegen« nur in den bescheidensten Grenzen zu phantastischen Vorstellungen neigen, immer häufiger das scheinbar Unmögliche realisierbar machen.

In zwei Ozeanen

Vorstoß in das Unterwasserreich

Einer der ersten, der in den Tiefen des Ozeans weilte, war der Schweizer Physiker Auguste Piccard: 1953 tauchte er an seinem 70. Geburtstag vor der italienischen Küste in einem Bathyskaphen eigener Konstruktion über 3 km tief. Mit dem Tiefseeapparat »Trieste« erreichten sein Sohn Jacques Piccard und Don Walsh am 23. Januar 1960 die Rekordtiefe von 10916 m.

Doch ohne Geräte für einen aktiven Eingriff in das Untersuchungsmedium bleibt dem Menschen nur die Rolle des passiven Beobachters. Schon nach dem ersten Tauchversuch begannen die Piccards, die »Trieste« mit Manipulatoren auszurüsten. 1961, ein Jahr vor dem Tode Auguste Piccards, war die »Trieste« zum ersten mit Manipulatoren ausgerüsteten Tiefseeapparat geworden. Als 1963 ein amerikanisches Atomunterseeboot im Atlantischen Ozean sank, wurde neben anderen Rettungsmitteln auch die »Trieste« in das Unglücksgebiet gebracht, und sie war es auch, die in 2600 m Tiefe ein Bruchstück fand, mit ihrer »Hand« ergriff und an die Oberfläche brachte, wodurch das Suchgebiet beträchtlich eingeeengt werden konnte.

Zu dieser Zeit nahm der Bau von bemannten Tiefseeapparaten beträchtlichen Umfang an. Zwar entwickelten die Ozeanographen Geräte und Vorrichtungen, die noch für viele Jahre die Grundlage der ozeanographischen Technik bilden werden, aber diese Technik »hängt an der Leine«. Während der Benutzung weiß der Wissenschaftler oftmals nicht genau, welche Lage die ver-

wendeten Werkzeuge relativ zum Schiff einnehmen, und er kann auch keine genaue Vorstellung von der Arbeitszone erlangen, in der die Messungen bzw. die Probenahmen erfolgen. Die Lösung einer ganzen Reihe wichtiger ozeanographischer Probleme erfordert jedoch die unmittelbare Beobachtung. Das gilt für die Topographie des Bodens, für das Überblicken einer großen Fläche, für das Unterscheiden natürlicher Formen und Farben, für die Auswahl der Untersuchungsobjekte sowie für die Beurteilung der Bedeutung und der Lage des Objekts.

Für Unterwasserarbeiten wurden zahlreiche Apparate entwickelt. Am Beispiel des amerikanischen Tauchapparats »Beaver« (»Biber«) wollen wir die Aufbau- und Funktionsprinzipien sowie die Möglichkeiten derartiger Halbroboter kennenlernen. Dieser Apparat mit einer Tauchtiefe bis 300 m stellt eine eiförmige Stahlkammer von etwa 5 m Länge und 2 m Durchmesser dar. Er vermag Objekte mit einer Masse bis 600 kg vom Meeresboden an die Oberfläche zu bringen.

Ein einheitliches System mit dem Gehäuse bilden vier Manipulatoren, die paarweise und symmetrisch zu beiden Seiten angeordnet sind.

Zwei dieser mechanischen Hände (die je fünf Freiheitsgrade haben) dienen dazu, die Stellung des Apparates am Arbeitsplatz so zu fixieren, daß die beiden anderen Hände die erforderliche Bewegungsfreiheit haben.

Die Arbeitshände der »Biber« haben acht Freiheitsgrade und infolgedessen eine hohe Flexibilität. Die zwei zusätzlichen Freiheitsgrade, die zu den üblichen sechs Freiheitsgraden hinzukommen, werden durch ein Zwischenglied erzeugt, das sich zwischen dem Handgelenk und dem Unterarm befindet und mit diesem gelenkig verbunden ist; dazu kommt die Drehbewegung des Handgelenks. Das Handgelenk des Manipulators ist kein gewöhnlicher Zweifingergreifer, der die funktionellen Möglichkeiten eingeschränkt hätte, sondern ein besonderes Endstück, an dem sich die unterschiedlichsten Werkzeuge befestigen lassen.

Das auswechselbare Werkzeug (der übliche Zweifingergreifer, eine Kneifzange, ein Bohrer, ein Schraubenzieher, ein Schweißelektrodenhalter usw.) wird in

einem Spezialmagazin aufbewahrt, das am Außenteil des Gehäuses befestigt ist. Zum Auswechseln braucht der Operator die Hand des mechanischen Armes mit dem darin befestigten Werkzeug nur in das freie Fach des Magazins einzuführen; durch einige einfache Bewegungen wird die Arretierung gelöst und die frei gewordene Hand wieder herausgezogen, wobei das zuvor benutzte Werkzeug in seinem Fach zurückbleibt. Die freie Hand wird dann in das Fach eingeführt, in dem sich nunmehr das erforderliche Werkzeug befindet. Durch einige andere Bewegungen wird die Arretierung wieder befestigt und die Hand dadurch mit dem neuen Werkzeug gekoppelt.

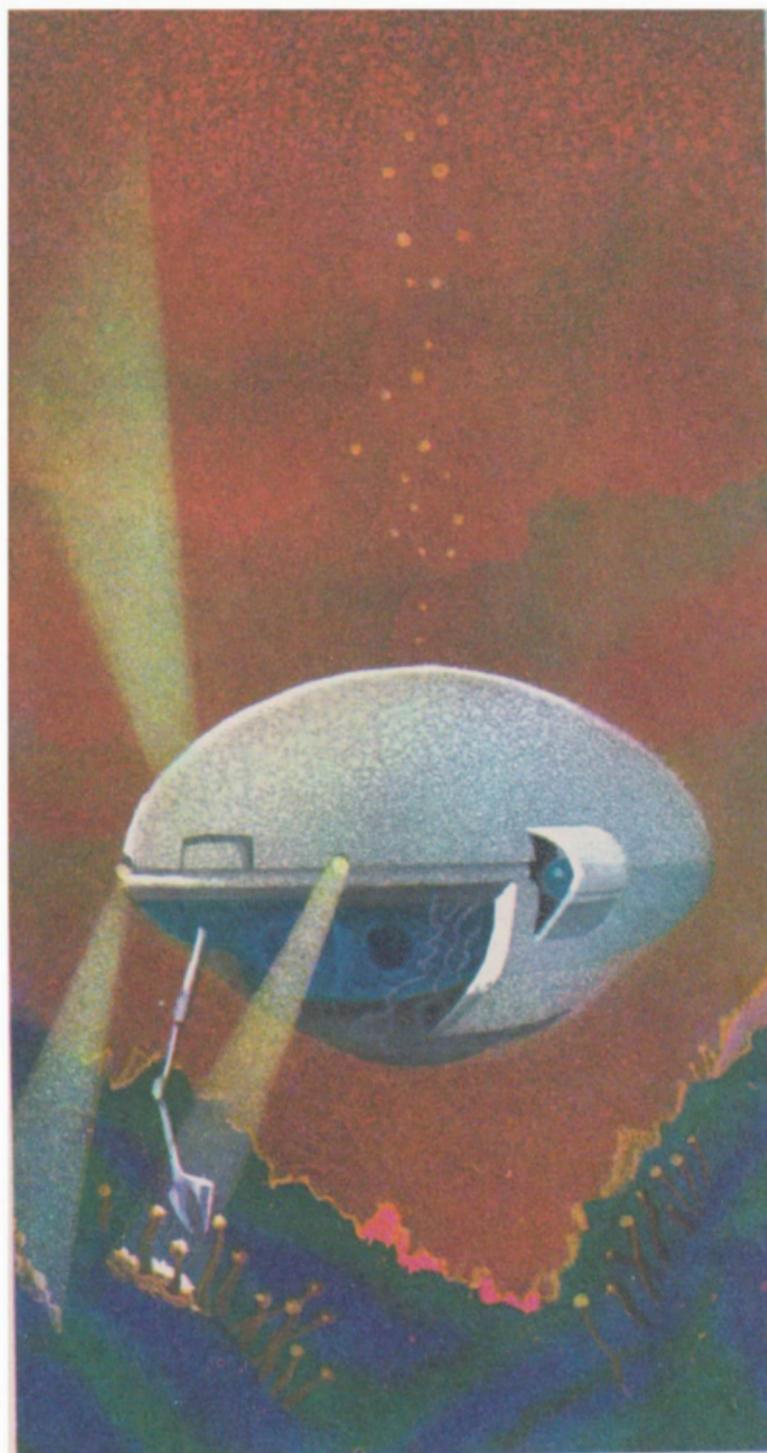
Jede Arbeitshand der »Biber« entwickelt eine Kraft bis zu 20 kp. Ihre Arbeitsbereiche überschneiden sich, so daß eine Hand der anderen »helfen« kann.

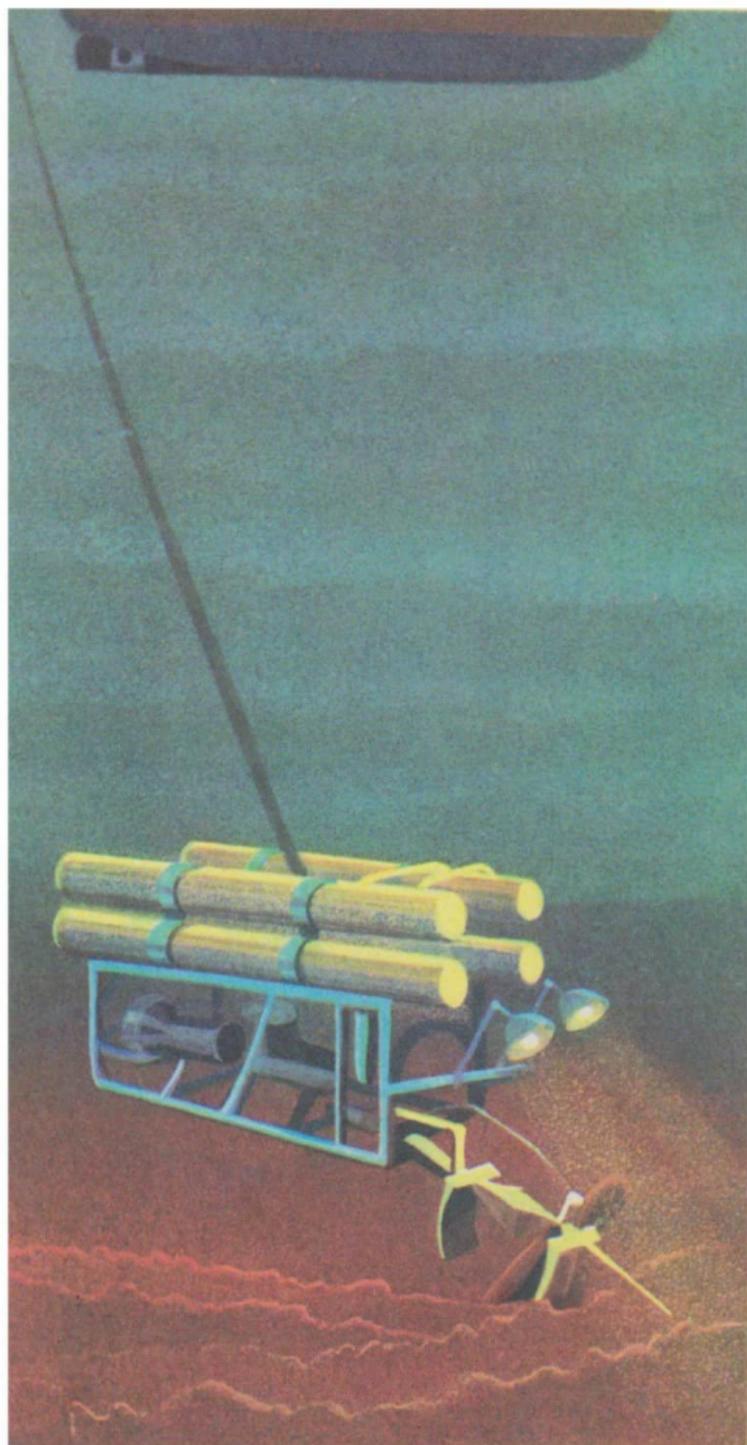
Die »Trieste« und die »Biber« sind mit drucktastergesteuerten Manipulatoren ausgerüstet.

Soweit man aus der Literatur entnehmen kann, wird heute kein bemannter Tiefseeapparat mehr mit kopierenden Manipulatoren ausgestattet, weil sie einen für die Arbeit des Operators verhältnismäßig großen Raum erfordern. Sie stehen deshalb offensichtlich in Widerspruch zu den Forderungen nach maximaler Reduzierung der Eigenmasse und Größe des Apparats selbst. Forderungen, die ja verständlich sind, wenn man an die Bedingungen beim Transport der Tauchapparate zum Einsatzort und an die Einsatzvorbereitungen an Bord des Mutterschiffes denkt.

Der bemannte Unterwasserapparat »Deepstar-4000« (»Seestern-4000«) unterscheidet sich äußerlich von der »Biber«. Es handelt sich hier um ein spezialisiertes ozeanographisches Schiff für drei Mann, das mit allen möglichen Geräten für Tiefseeuntersuchungen (bis 4000 ft = 1219,2 m) geradezu gespickt ist.

Im Jahre 1966 verlor ein Flugzeug der USA vor der spanischen Küste eine Wasserstoffbombe. Um dieses gefährliche Objekt in 1 km Tiefe zu finden, wurde der bemannte ozeanographische Unterwasser-Forschungs-





apparat »Alvin« (nach dem Namen des Konstrukteurs Allyn Vines) eingesetzt. Er ist etwa mit den gleichen Manipulatoren ausgerüstet wie der »Kleine Strolch« (für den Einsatz auf dem Festland).

Der Antrieb des Manipulators erfolgt elektromechanisch mit Drucktastersteuerung. Mit Hilfe eines kleinen Hebels am Steuerpult wird die Greifkraft zwischen 0 und 40 kp geregelt. Hier befindet sich auch ein Schalter, der den sogenannten Abwurfmechanismus betätigt, durch den bei einer Havarie der Manipulator vom Tauchkörper getrennt werden kann.

Das systematische Absuchen des Meeresbodens in dem Gebiet, in dem die Bombe vermutet wurde, führte schließlich zum Erfolg. Trotzdem war diese Arbeit außerordentlich kompliziert. Die Besatzung der »Alvin« entdeckte die Bombe, tauchte auf, um dies mitzuteilen, und fand die Bombe nach erneutem Abtauen nicht wieder, so daß sie gezwungen war, die Suche wieder zu beginnen. Schließlich war die Lage der Bombe genau fixiert. Die »Alvin« war jedoch mit einer Hand weder imstande, die Bombe zu ergreifen, noch ein Seil daran zu befestigen. Selbst wenn die Größe des Greifers ein Erfassen der Bombe erlaubt hätte, wäre das Heben der Bombe wegen des ungenügenden Tragvermögens unmöglich gewesen.

Zum Bergen der Bombe wurde nun ein unbemannter ferngesteuerter Halbroboter eingesetzt, der die Bezeichnung CURV trägt.

Dieser Apparat arbeitet an der »Leine«. Als Manipulator dient ein einfacher, ausfahrbarer Greifer. Vor jedem Abtauchen wird der Apparat für das Ergreifen eines ganz bestimmten Objektes ausgerüstet und ist somit eng spezialisiert. CURV ist mit Beleuchtungseinrichtungen und zwei Fernsehkameras versehen. Die Bildinformation wird über Kabel an das Steuerpult übertragen. Mit dem eigentlichen Heben befaßt sich CURV jedoch nicht. Sobald das zu hebende Objekt ergriffen ist, wird der Greifer vom Apparat getrennt. Er dient sozusagen als »Halsband«, denn

Der ferngesteuerte Tiefseeapparat CURV, mit Ballast- und Treibstofftanks und einem Motor ausgerüstet

er ist mit dem Hubseil verbunden, das zum Überwasserschiff führt.

Unter der Bezeichnung RUM wurde ein ferngesteuerter Unterwasser manipulator bekannt, der für die Wartung und Versorgung von ozeanographischen Stationen am Meeresboden sowie zum Aufbau neuer Stationen bestimmt ist. Über ein 8 km langes Kabel wird außer den Steuerungssignalen und dem Fernseh bild auch die elektrische Energie übertragen, die für den Betrieb aller Antriebsmotoren notwendig ist. Doch dieser 1959 gebaute Apparat, dessen Manipulator eine Tragfähigkeit von 400 kp bei einer Ausladung von 2 m besitzt (beim Ausfahren auf eine Weite von 4 m beträgt die Tragfähigkeit nur noch 40 kp), erwies sich als wenig aktionsfähig. Der Meeresboden ist selbst für ein Raupenfahrwerk schwer passierbar. Die Schwierigkeiten werden noch dadurch verstärkt, daß während der Fortbewegung Bodenteilchen aufgewirbelt werden, was zu starker Trübung des Wassers und erheblicher Sichtbeeinträchtigung führt.

Auch der Einsatz schreitender Maschinen am Meeresboden löst starken Zweifel aus, besonders wenn es sich um ferngesteuerte Apparate handelt. Die Oberfläche, auf der diese Roboter schreiten sollen, ist sehr unzuverlässig und heimtückisch. Wahrscheinlich ist gerade das der Grund dafür, daß man in der technischen Literatur immer häufiger auf Angaben stößt, nach denen auf dem Meeresboden ein hochleistungsfähiges Außenskelett nützlich sein könnte, das den Menschen schützt und ihm die Ausführung schwerer Arbeiten erlaubt.

Unter den ferngesteuerten Apparaten wird Geräten der Vorzug gegeben, die im Wasser über dem Arbeitsobjekt »dahinschweben« und sich über dem Meeresboden bewegen können, ohne ihn zu berühren, wobei sie Hindernisse leicht umgehen.

Roboter im Weltraum

In der Weltraumfahrt steht inzwischen die praktische Realisierung der Idee K. E. Ziolkowskis auf der Tagesordnung, Raumstationen zu errichten, die lange Zeit die Erde

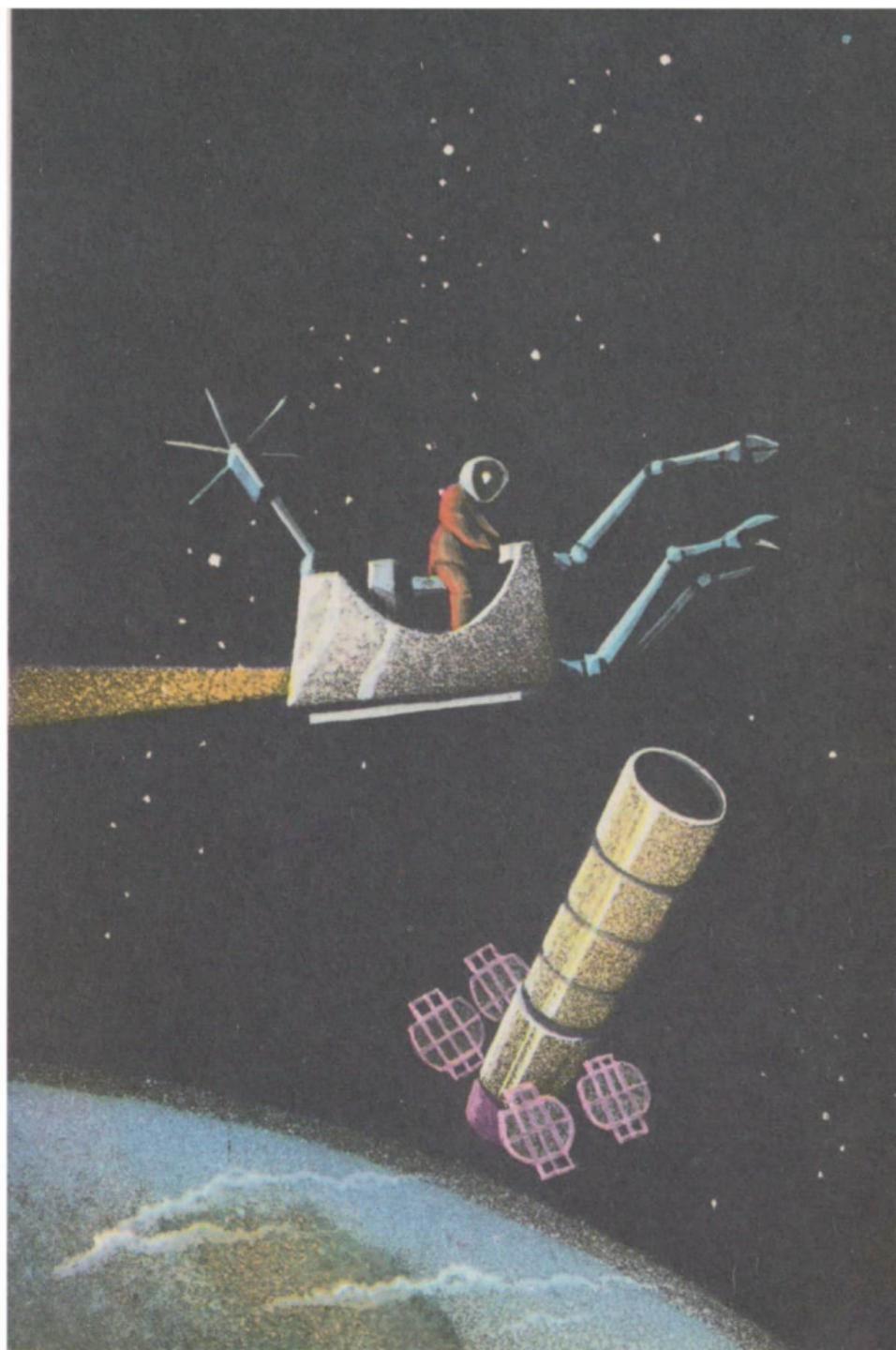
umkreisen. Sputniks und Raumstationen sind technische Objekte, Systeme von Mechanismen und Vorrichtungen, die wie alle technischen Objekte gesteuert, kontrolliert, repariert und gewartet werden müssen.

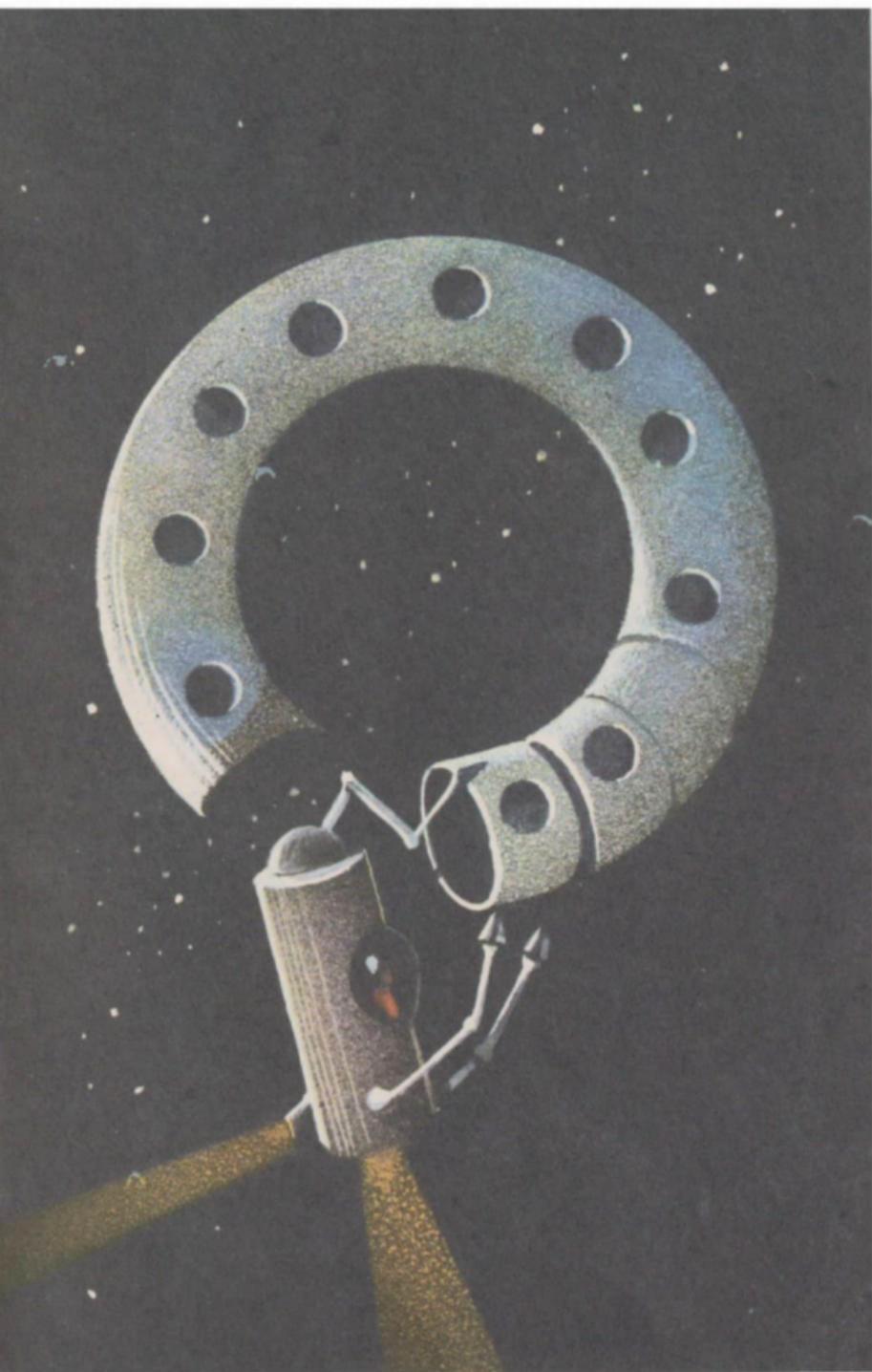
Es ist möglich, bei Raumflugkörpern alle Operationen der Geräte und Systeme zu programmieren, so daß sie dann automatisch ablaufen. Ein anderes Verfahren beruht auf dem Einsatz spezialisierter Steuerungssysteme nach der Art von »Druckknopf«-Systemen. Die Betätigung einer Drucktaste am Steuerpult der Bodenstation bewirkt ein vorher durch die Konstruktion des Systems festgelegtes Ergebnis: Der Satellit ändert seine Lage im Raum, seine Solarzellenflächen werden entfaltet usw.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ein bemanntes Raumfahrzeug einzusetzen. Sicherlich werden vollautomatische Raumfluggeräte auch in Zukunft eine große Rolle bei der Erforschung des Weltalls spielen. Wenn es aber um die Aufrechterhaltung bzw. Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit von Raumflugkörpern und Raumstationen auf Erdumlaufbahnen geht, um das Reparieren oder Auswechseln einzelner Bauteile, Baugruppen und Systeme, um Arbeiten im Inneren oder an der Außenseite der Station, für die sich ein auch nur halbwegs detailliertes Programm nicht vorhersagen läßt, dann werden vollautomatische Systeme nicht ausreichen. Für solche Zwecke werden bemannte oder ferngesteuerte Apparate eingesetzt werden, die ihrer Konstruktion nach von Festland- und Unterwasserhalbrobotern kaum zu unterscheiden sind.

Wir wollen uns nun zwei Entwicklungen von Weltraumhalbrobotern zuwenden, und zwar einem bemannten und einem ferngesteuerten Raumfahrzeug. Vorläufig handelt es sich um Projekte, bei denen noch vieles ungelöst zu sein scheint. Noch steckt viel Phantastisches in den Plänen der Konstrukteure. Doch ihre Phantasie bewegt sich im Bereich des prinzipiell Möglichen und stützt sich auf die praktische Notwendigkeit, die selbst die stärkste

Nächste Seite: Bau einer Raumstation mit Hilfe von Raumtaxi, links ein Weltraum-»Motorrad«, rechts eine geschlossene Arbeitskapsel





Phantasie dazu zwingt, die unabwendbaren Forderungen der Realität zu berücksichtigen.

Wir sind heute der Auffassung, daß die Lebensdauer von Erdsatelliten 5 bis 10 Jahre betragen kann. Während einer so langen Zeit kann es geschehen, daß die installierten Forschungs- und Aufzeichnungs-, Empfangs- und Sendeausrüstungen nicht nur ausfallen, sondern daß sie veralten und ausgewechselt werden müssen. Wer wird dieses Auswechseln vornehmen?

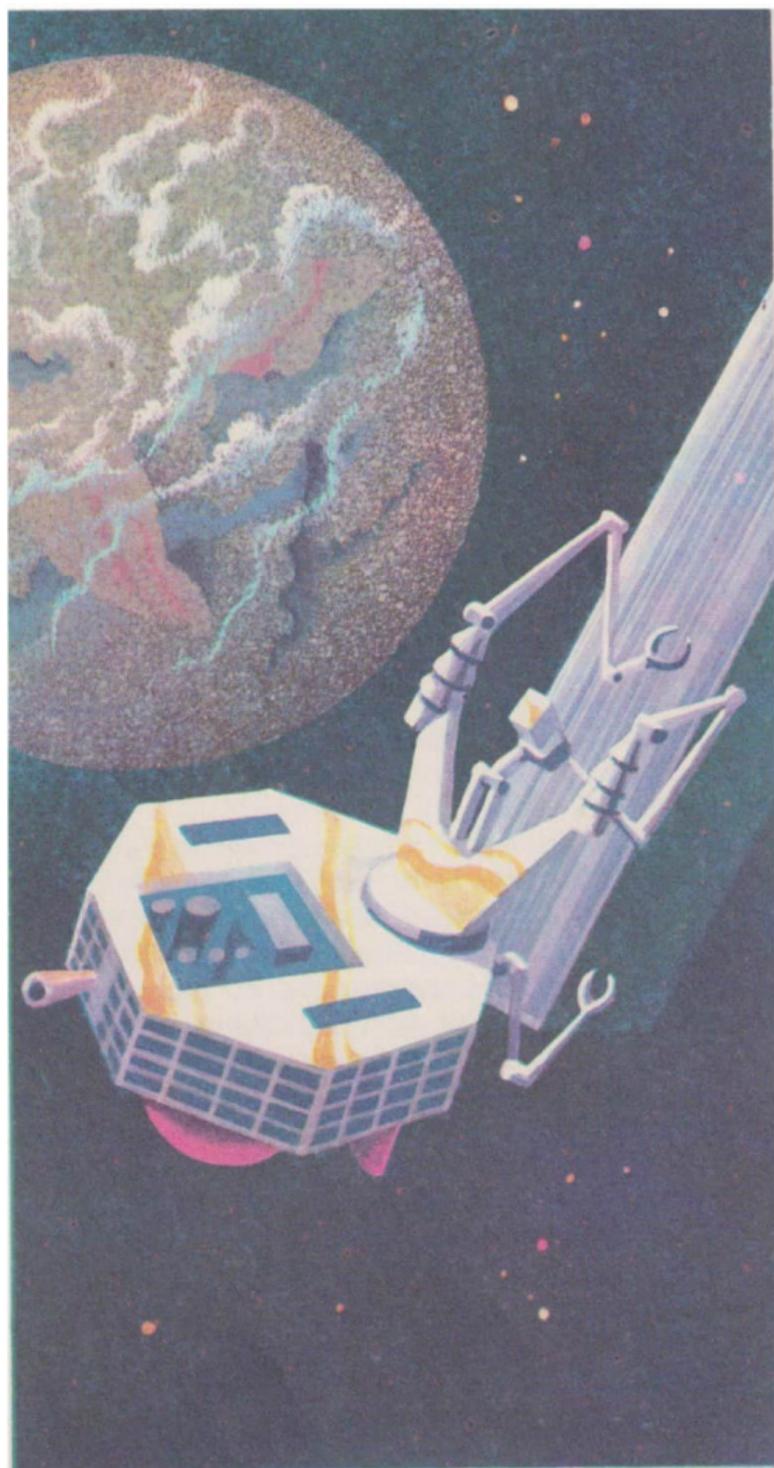
Als »Weltraumtaxi« wird ein bemannter Apparat bezeichnet, der zur Wartung und Reparatur von Sputniks und Raumstationen gedacht ist. Eine große Raumstation könnte als Basis, sozusagen als »Garage«, für mehrere derartige Taxis dienen.

Eines der Projekte für einen derartigen Apparat (USA) stellt eine zylindrische Kapsel dar, in der für den Operator ein »Mikrolebensraum« geschaffen worden ist. Zur Fortbewegung im Weltraum sowie zur Annäherung an das Objekt sind kleine Flüssigkeitsrakentriebwerke vorgesehen, die wiederholt ein- und ausgeschaltet werden können.

Der Apparat ist mit fünf Händen ausgestattet. Drei davon dienen dazu, ihn mit dem Raumflugkörper zu koppeln. Sie werden über ein »Druckknopf«-System gesteuert. Drucktastergesteuerte Hände sind für die Ausführung einer etwas komplizierten und doch genauen Arbeit relativ schlecht geeignet. Deshalb arbeiten die beiden übrigen Greifer (mit je sieben Freiheitsgraden) nach dem Prinzip der kopierenden Manipulatoren.

Die Projektanten haben berücksichtigt, daß die mechanischen Hände in der Schwerelosigkeit natürlich kein Eigengewicht haben und mit »gewichtslosen Objekten« operieren müssen. Daher enthält die Konstruktion der Manipulatoren keine Gegengewichte, die Hände des Apparats erscheinen dünner, als es bei einer so massiven Kapsel »eigentlich« der Fall sein müßte. Aber erst die praktische Erprobung dieser Geräte wird zeigen, ob es dem Operator gelingt, die Kräfte zu dosieren, und ob er es leicht

Ferngesteuerter Bau- und Reparaturapparat bei Arbeiten an einer Raumstation



und schnell lernt, komplizierte Handlungen und Bewegungen aufeinander abzustimmen.

Doch das »Weltraumtaxi« hat wie jeder andere bemannte Raumflugkörper einen ernsthaften Konkurrenten: das ferngesteuerte Gerät. Obwohl es nach unseren heutigen Erkenntnissen notwendig erscheint, daß der Mensch auch in Zukunft im erdnahen Weltraum schwierige Operationen direkt ausführt und deshalb in bestimmten Situationen unmittelbar am Geschehen teilnimmt, erhebt sich dennoch die Frage, ob nicht noch vollkommenerer Roboter ihm auch diese Tätigkeit werden abnehmen können.

Ein bemannter Apparat erfordert einen speziellen Raum für den Operator, besondere Lebenserhaltungssysteme usw. Ist dieser sehr hohe Aufwand gerechtfertigt? Während der Mensch nur eine Zeitlang im Weltraum operieren kann, läßt sich ein ferngesteuerter Apparat in einer Erdumlaufbahn in ständiger Betriebsbereitschaft halten. Dieser große Vorzug wird noch durch die Tatsache unterstützt, daß der ferngesteuerte Apparat keiner Kapsel bedarf. Der Apparat könnte wie eine kleine Plattform aussehen, die mit fünf Händen und einem Hilfstriebwerk ausgerüstet ist.

Die auf S. 105 gezeigte Variante ist noch ein Produkt der Phantasie. Es war eine Serie von Versuchen erforderlich, um die Fernsteuerungsmöglichkeiten für einen derartigen Apparat bei seiner Ankopplung an einen Satelliten sowie während der Arbeit einzuschätzen. Zu diesem Zweck wurde ein Sputnikmodell aufgebaut, das um seine Achse frei drehbar war. Unter Benutzung seiner Manipulatoren koppelte sich der ferngesteuerte Apparat an das Modell an und führte eine Reihe von Operationen aus. So gelang z. B. das Auswechseln eines Apparateblocks, wobei sechs Schrauben gelöst und zwei elektrische Kontakte herausgezogen werden mußten. Die Versuche wurden von einem Operator bei unmittelbarem Einblick in die Arbeitszone, aber auch bei Beobachtung über ein Fernsehsystem ausgeführt.

Entsprechend unserer Definition muß ein »echter« Roboter »mechanische« und »intellektuelle Vollkommenheit« besitzen. Vorläufig war jedoch fast ausschließlich

von mechanischen Händen und Füßen die Rede, davon, wie sie aufgebaut sind und was der Operator, also der Mensch, damit machen kann. Nun wollen wir noch kurz über automatische Systeme berichten, die die mechanischen Vorzüge der Halbroboter durch intellektuelle Fähigkeiten ergänzen und den Robotern dadurch einen gewissen Grad von Selbständigkeit sowie neue Eigenschaften verleihen.

Der von einem Menschen gesteuerte Halbroboter ist nicht imstande, im Raum oder auch nur auf einer Ebene den gleichen Weg zweimal zurückzulegen, jedenfalls nicht mit annehmbarer Exaktheit, weil das der Mensch, der ihn steuert, selbst nicht kann. Er ist auch nicht imstande, schneller zu arbeiten als der Mensch, und er kann auch keine Verfahren oder Fertigkeiten während der Arbeit anwenden, die ein sehr rasches Rechnen erfordern. Anders ausgedrückt: ein Mensch, der einen Halbroboter steuert, rüstet diesen nicht nur mit seinen intellektuellen Vorzügen, sondern auch mit all jenen »Begrenzungen« aus, die seinem Intellekt eigen sind. Zusammen mit den physischen und mechanischen Beschränkungen, die für ein biologisches System natürlich sind, bilden alle diese Beschränkungen einen Kreis, aus dem ein technisches System nur »ausbrechen« kann, indem es zu einem Automaten wird, indem er »lernt«, ohne unmittelbare Teilnahme des Menschen zu arbeiten. »Ohne unmittelbare Teilnahme des Menschen« bezieht sich auf das Wort »arbeiten«, nicht auf das Wort »lernen«. Also werden wir jetzt erfahren, wie der Mensch einer Maschine Selbständigkeit beibringt, wie er die Maschine in einen Automaten, den Halbroboter in einen echten Roboter verwandelt.

Drei Generationen

Die erste Generation ist einseitig

Da sind sie, die Roboter! Generation auf Generation – immer vollkommener. Vielseitigkeit der Handlungen, Wechselwirkung mit der Umwelt und weitgehende Selbständigkeit, das sind die wichtigsten Züge, die sich immer stärker innerhalb der Roboterfamilie ausprägen und allmählich zu ihren kennzeichnenden Merkmalen werden.

Numerisch gesteuerte Metallbearbeitungsmaschinen beispielsweise sind Roboter der ersten Generation. An ihnen sind die Ausführungsorgane noch eng spezialisiert; doch gesteuert werden sie durch ein universelles automatisches System.

Ein »Industrieroboter« der ersten Generation wird unter der Bezeichnung »Versatran« in den USA und in England in zwei Varianten produziert. Die eine Variante sieht die Programmwahl unter Verwendung einer besonderen Programmtrommel vor. Bei der zweiten Variante ist das Programm auf Magnetband aufgezeichnet. In beiden Fällen besteht die erste Etappe der Vorbereitung des Roboters auf seine Tätigkeit in seiner Ausbildung, d. h. im Abspeichern der Programme.

Die gesamte Anlage besteht aus zwei Blöcken: dem Ausführungsblock einschließlich des Armes mit sämtlichen Antrieben sowie dem Steuerungsblock in Form eines getrennt aufgebauten Tisches.

Der mechanische Arm mit der daran befindlichen Hand, an der der Greifer befestigt ist, befindet sich an einer drehbaren Säule. Er besitzt drei Freiheitsgrade: Bewegungen in zwei Richtungen und eine Drehbewegung wer-

den durch einen hydraulischen Antrieb realisiert. Drei weitere Bewegungen kann die Hand gemeinsam mit dem Greifer ausführen: zwei Rotationsbewegungen sowie das Öffnen und Schließen des Greifers.

Der Industrieroboter, die mechanischen Arme, die von Programmtrommeln, Loch- oder Magnetbändern gesteuert werden, übertreffen in ihrer Leistung die menschlichen Möglichkeiten. Doch Unermüdlichkeit, Kraft und Vielfalt der Bewegungen sind samt und sonders Züge, die in erster Linie mechanische Eigenschaften charakterisieren. Wie sieht es dagegen mit dem »Intellekt« des Industrieroboters aus?

Beim Aufstellen des Programms für den »Versatran« wird angenommen, daß dieser unter streng definierten Bedingungen arbeitet. Sie betreffen keinesfalls nur den »Versatran«, sondern auch die Umwelt, mit der er in Wechselwirkung tritt. Die Rohlinge, Lasten und Erzeugnisse, die er ergreifen soll, müssen sich stets am gleichen Platz befinden. Dort, wo er sie einsetzen oder ablegen soll, muß stets der Platz frei sein usw. Sonst wäre dieser Industrieroboter nicht arbeitsfähig, da seine »Wechselwirkung« mit der Umwelt einseitig ist. Alle Informationen, mit denen ihn sein Programm versorgt, sind vom Zentrum zur Peripherie gerichtet, vom Steuerungsblock an die Ausführungsorgane, und während seines Betriebes erhält er von außen keinerlei Information. Die geringfügigsten Veränderungen in der Umwelt können ihn augenblicklich funktionsuntauglich machen.

Menschen und Tiere dagegen erhalten in jeder Minute, in jeder Sekunde ununterbrochen auf den verschiedensten Wegen Informationen aus der Umwelt. Sie verarbeiten diese und bilden entsprechende »Programme« für ihre Handlungen. Sie sind imstande, die unterschiedlichsten Situationen im Gedächtnis zu behalten, sie miteinander zu vergleichen und Entscheidungen zu finden. Sie besitzen die Fähigkeit, Schwierigkeiten erfolgreich zu begegnen.

Man kann einem kleinen Kind die Aufgabe übertragen, Würfel, die auf dem Fußboden verstreut sind, aufzuheben und in eine Schachtel zu legen. Vielleicht wird es diese Aufgabe nicht auf die rationellste Art lösen, viele überflüssige Bewegungen beim Einsammeln der Würfel aus-

führen und auch nicht den kürzesten Weg einschlagen. Aber es genügt, dem Kind das Ziel anzugeben; das Programm seiner Handlungen entwickelt es dann selbst.

Auch dem Roboter »Versatran« kann die Aufgabe erteilt werden, diese Würfel einzusammeln. Wenn man nur die Anzahl und die Lage der Würfel genau angibt und außerdem auch die Lage der Schachtel, dann wird er mit dieser Aufgabe besser fertig werden als ein Kind. Der mit ihm verbundene numerische Rechner ist imstande, das vorteilhafteste Programm für das Einsammeln der Würfel zu berechnen, alle möglichen Sammelvarianten zu untersuchen, einschließlich der Fälle, die ein Umstellen der Schachtel voraussetzen. Doch wenn die Schachtel oder die Würfel nicht am angegebenen Ort sind, dann wird der »Versatran« dies »nicht merken«: Er wird entweder alle Würfel einsammeln und sie dort ablegen, wo die Schachtel sein sollte, oder er wird nicht alle Würfel in die Schachtel bringen.

Wie wir sehen, können die intellektuellen Vollkommenheiten eines Roboters der ersten Generation nicht gerade Begeisterung auslösen. Wir müssen stets daran denken, daß man sich ihrer nur bedienen kann, wenn man ihnen auch die geringfügigsten Einzelheiten mit größter Sorgfalt eingibt, sie mit dem entsprechenden Arbeitsprogramm versieht und dieses Programm ebenso sorgfältig mit der Umwelt abstimmt, in der es realisiert werden soll.

Die zweite Generation kann schon »fühlen«

Läßt sich das intellektuelle Niveau eines Automaten anheben? Kann man ihn lehren, tierähnlich oder möglicherweise sogar menschenähnlich zu handeln? Kann man einem Automaten »beibringen«, ein bestimmtes Ziel zu erreichen, wenn er allgemeinere Hinweise und kein in allen Einzelheiten entwickeltes Programm benutzt, das seine Bewegungen bis in die letzten Einzelheiten festlegt? Vermag er »selbständig« zu handeln, wenn das Programm nur Informationen darüber enthält, wie in der einen oder anderen Situation zu verfahren ist?

Aus der Aufgabenstellung selbst wird klar, daß man am

Roboter der ersten Generation Ergänzungen vornehmen muß, damit er instande ist, unter der Anleitung durch ein derartiges Programm zielgerichtet zu handeln. In erster Linie muß man ihn mit Rückmeldemechanismen, also mit »Gefühl« ausstatten, damit er Informationen aus der Umwelt wahrzunehmen vermag. Nur auf diese Weise kann er eine Vorstellung von der jeweiligen Situation gewinnen. Außerdem muß er natürlich mit einem Digitalrechner als Partner zusammenarbeiten, der diese Informationen abspeichert, verarbeitet, die Situation einschätzt und in Übereinstimmung mit dem Programm den Plan für die weiteren Handlungen festlegt. Man muß den mechanischen Arm also mit mechanischen »Empfindungen« versehen und mit einem Rechner koppeln.

Der Gedanke, einen derartigen Manipulator zu bauen, wurde Ende 1958 von den amerikanischen Mathematikern und Ingenieuren Claude Shannon und Marc Minski ausgesprochen. Im Jahre 1960 wagte sich Heinrich Ernst, Aspirant am Technologischen Institut Massachusetts, unter Leitung der beiden Wissenschaftler an die Realisierung dieser Idee. Ende 1961 wurde das betriebsfähige Modell montiert. Sein Arm ist mit Gebern, mit mechanischen »Sinnesorganen«, versehen, die – wenn auch nur in bescheidenem Umfang – jene natürlichen »Rückkopplungsgeber« ersetzen, die bei den elektromechanischen kopierenden Manipulatoren Mensch und Manipulator zu einem einheitlichen System machen, da der Operator die Bewegungen »spürt« und in der günstigsten Weise aufzubauen vermag.

Der Ernst-Manipulator ist mit zwei Gruppen von Gebern ausgerüstet. Die eine Gruppe bilden die Geber, die in allen beweglichen Kupplungen (Gelenken) installiert sind. Sie liefern die Informationen darüber, wie die Signale, die die Bewegungen aller Armgelenke steuern, ausgeführt werden. Diese Geber der internen Rückkopplung des Systems arbeiten nach dem Prinzip des üblichen geschlossenen Schaltkreises. Innerhalb dieser Schaltung erfolgt der ständige Vergleich jener Armstellungen, die vom Steuerpult vorgegeben werden, mit den Stellungen, die der Arm in Wirklichkeit einnimmt. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen dieses Vergleiches erzeugt der Digitalrechner

kontinuierlich Steuerungssignale, die den mechanischen Arm veranlassen, die erforderlichen Stellungen einzunehmen bzw. sie in der erforderlichen Weise zu verändern.

Die zweite Gruppe von Gebern, die Rückinformationen vermitteln, ist am Greifer installiert. Diese Geber stellen die Verbindung mit der Umwelt her.

Der Greifer besteht wie gewöhnlich aus zwei »Fingern«. Jeder Finger ist mit mehreren Kontaktgebern ausgerüstet, die nach dem Dualcode (EIN-AUS) arbeiten. Sprechen sie an, dann hat die Hand das Objekt mit einer Stelle berührt, die zur Arbeitsausführung ungeeignet ist. Weitere sechs Geber an den Greifflächen jedes Fingers erzeugen Signale, deren Größe der am-Geber angreifenden Druckkraft proportional ist. Sie informieren darüber, welche Teile der Finger am Zugriff beteiligt sind und mit welcher Kraft die Finger das Objekt zusammenpressen.

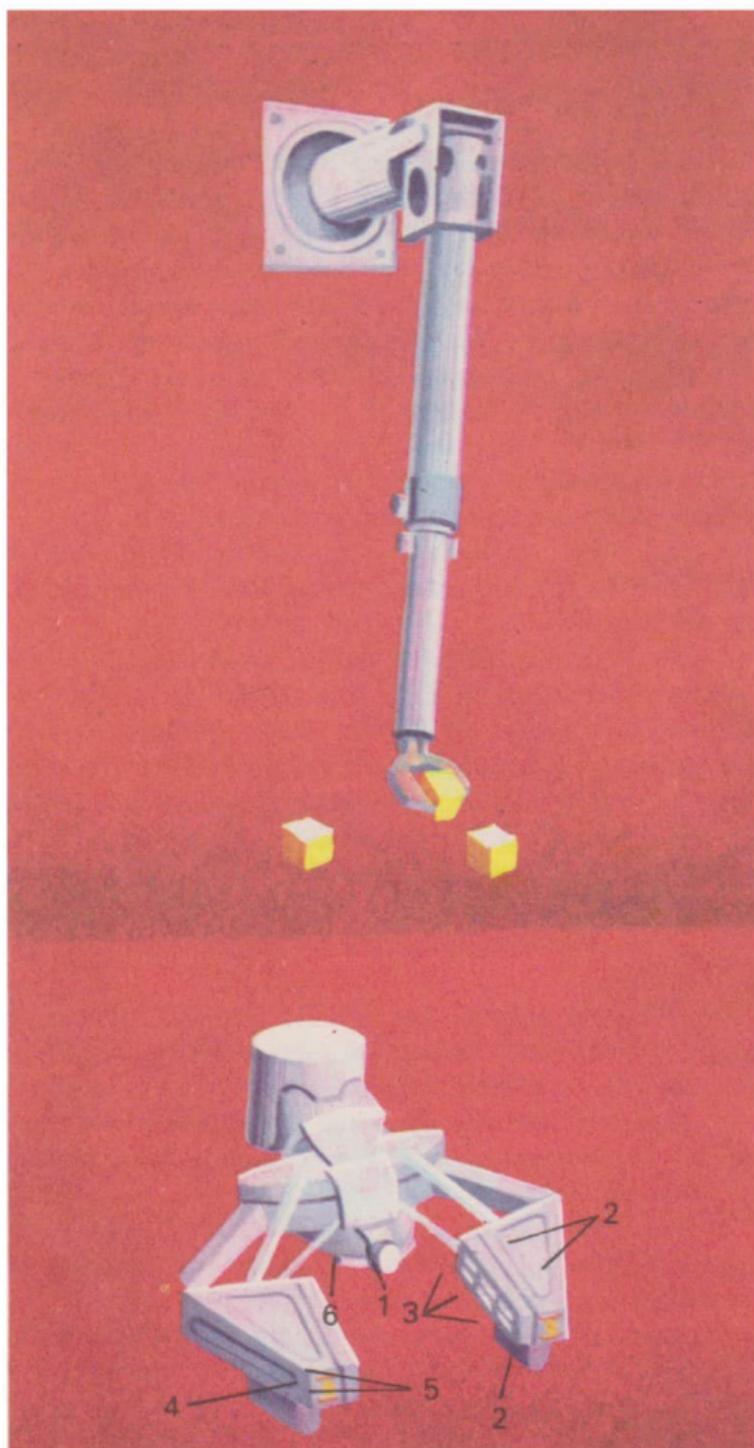
Zwei Geber, die sich an den Spitzen jedes Fingers befinden, registrieren den Widerstand, der der Greiferbewegung von seiten des Objekts entgegengesetzt wird. Stößt die Hand im Bewegungsablauf auf ein Objekt, dann übermitteln die Geber eine Information darüber, welche Ausdehnung dieses Objekt besitzt.

Auf diese Weise ist der Greifer an seinen Arbeitsflächen und seinen übrigen Flächen mit einer Nachbildung des Tastgefühls ausgestattet und vermittelt Rückmeldungen über die Greifkraft. Außerdem ist oberhalb der »Fingerspitzen« zwischen den Tastgebern noch je ein »Auge« angeordnet, eine Fotodiode, die auf Dunklerwerden reagiert: Wenn sich die Hand irgendeinem Objekt nähert,

Der Manipulator nach Ernst beim Einsammeln von Würfeln

Der Greifer des Manipulators

1 – Geber, der die Lage des Objekts zwischen den Greiferfingern bestimmt, 2 – sechs Geber (je drei an jedem Finger), die eine Berührung mit Abschnitten der Finger signalisieren, die keine Arbeitsabschnitte sind, 3 – sechs Geber, die die Lage des ergriffenen Objekts signalisieren, 4 – Fotodiode, die auf den Schatten reagiert, der von einem schwarzgefärbten Würfel geworfen wird, 5 – Geber, die anzeigen, daß der Greifer auf ein Objekt gestoßen ist, das sich vor der Stirnseite befindet, 6 – Geber, der sich einschaltet, sobald die »Hand« den Tisch berührt, auf dem die Würfel ausgelegt sind



dann wird, noch ehe sie gegen das Objekt stößt, ein Signal in die Maschine gegeben, das eine »Gefahr« und die Notwendigkeit anzeigt, die Geschwindigkeit zu verringern.

Alle Informationen, die bei der Bewegung des Armes erfaßt werden, werden an den Digitalrechner übermittelt, wo sie verarbeitet und zur Realisierung des eingegebenen Programms benutzt werden. Zum Beispiel soll der Arm ungeordnet verstreute Würfel einsammeln und in einer Schachtel ablegen. Das Einsammeln von Würfeln ist, wie wir sehen werden, eine »Modellaufgabe« mit vielen Varianten. In der Variante, wie sie dem Ernst-Manipulator gestellt wurde, war sie durch folgende in Maschinsprache formulierte Operationen beschrieben und mit dem Programm in den Rechner eingespeist worden.

1. Der Arm beginnt die Suchbewegungen, um die Schachtel zu finden. Die Schachtel ist höher und größer als die Würfel.

2. Nach dem Auffinden der Schachtel bestimmt der Automat ihre absolute Lage und Größe. Er ermittelt die Stellung des Armes, in der sich dieser befindet, wenn er die Schachtel gefunden hat. Der Digitalrechner speichert diese Informationen ab. Sie werden später für das Ablegen der Würfel in die Schachtel benötigt.

3. Danach beginnt der Arm die Würfel aufzusuchen. Sobald er auf einen Würfel stößt, bestimmt er seine Lage und Größe, um den Greifer relativ zum Würfel richtig zu orientieren.

4. Der Arm ergreift den Würfel und trägt ihn an die Stelle, wo sich die Schachtel befindet. Er bewegt sich dabei so lange, bis er auf die Schachtel stößt.

5. Nun wird die richtige Lage des Würfels relativ zur Schachtel bestimmt und der Würfel danach in die Schachtel fallen gelassen.

6. Der Arm bewegt sich dorthin zurück, wo er den letzten Würfel gefunden hat, und macht sich von dort auf die Suche nach dem nächsten Würfel.

Während der Würfelsuche führt der Arm in bestimmten Abständen Kontrollbewegungen aus, um sich davon zu überzeugen, daß die Suche hinreichend tief über der Tischfläche erfolgt. Wenn der Arm im Verlauf der Suche

am Tisch anstößt, wird die Suche eingestellt, und der Arm wählt erneut die richtige Höhenlage aus.

In unserer Aufzählung haben viele Hinweise keinen Platz gefunden, die in Wirklichkeit im Programm berücksichtigt sind, um »Irrtümer« zu vermeiden. So könnte der Arm, insbesondere beim Einsammeln, zufällig einen Würfel anstoßen oder die Schachtel wegschieben. Deshalb enthält das Programm verschiedene Spezialhinweise oder Befehle zur Überführung des Armes auf Handsteuerung.

Im Programm ist die Prozedur des Suchens vollständig beschrieben. Angegeben ist auch, was zu tun ist, wenn einer der Kontakte geschlossen wird. Außerdem enthält das Programm auch Angaben darüber, wie der Greifer in dem einen oder anderen Fall eingestellt bzw. geschwenkt werden muß. Mit anderen Worten: In das Programm für das Aufsuchen der Würfel sind alle »Verhaltensweisen« des Armes nicht so eingeschrieben, wie wir die Punkte 1, 2, 3 usw. formuliert haben, sondern wesentlich detaillierter und natürlich in einer Sprache, die die Maschine versteht, d. h. in Form von Zahlen.

Einem Kind bereitet es keine Schwierigkeiten, Würfel einzusammeln, die mit Bildern von Blumen oder Pilzen beklebt sind, weil das Kind weiß, was das ist. Man kann ihm Bilder von Schrauben und Muttern, von Blumen oder Raketen zeigen, und es wird danach leicht Würfel mit diesen Abbildungen einsammeln. Das Gehirn eines Menschen ähnelt einem Schwamm: Es saugt die Bilder der Umwelt ein und besitzt die verblüffende Fähigkeit zum Abspeichern, Unterscheiden und Vergleichen von Erscheinungen.

Das Einsammeln und Ablegen von Würfeln ist für das Kind eine elementare Aufgabe. Unser Roboter löst nur eine der Varianten dieser Aufgabe, aber selbst dafür mußte man ihn mit einer eigenen »inneren Welt« ausstatten, die ihm beispielsweise eine Vorstellung davon »erlaubt«, wodurch sich die Schachtel von einem Würfel unterscheidet. Seine intellektuellen Möglichkeiten sind erheblich größer als die des »Versatran«, und man kann bereits sagen, daß er das Verhalten eines Lebewesens imitiert, indem er unmittelbar mit seiner physikalischen Umwelt in Wechselwirkung tritt. Diese Maschine zählt zu den Vertretern der

zweiten Robotergeneration. Bezüglich ihres »Intellekts« wird man jedoch nur in mäßiges Entzücken geraten, wenn man daran denkt, daß auch sie von unseren Vorstellungen über einen echten Roboter noch weit entfernt ist.

Der Ernst-Manipulator arbeitet wie ein Roboter mit verbundenen Augen. Die Geber, mit denen er ausgerüstet ist, erfassen die Informationen blindlings durch Tasten und Anfassen. Er vermag den Prozeß der Informationserfassung nicht vom Bewegungsprozeß zu trennen. Er ist also nicht imstande, die Situation zu »überblicken«, die in seiner Umwelt entstanden ist, um sich mit seinen Handlungen darauf einzustellen. Soll er die ungeordnet auf dem Tisch verstreuten Würfel einsammeln, muß er einen Würfel nach dem anderen suchen. Ein richtiger Roboter dagegen muß »Sinnesorgane« besitzen, die es ihm ermöglichen, Informationen zu sammeln, bevor er seine Mechanismen in Gang setzt.

Der Mensch und das Tier sind imstande, Informationen zu erfassen, ohne sich vom Fleck zu rühren. Zu diesem Zweck bedienen sie sich des Gesichts- und Geruchssinns sowie des Gehörs. Diese »berührungsfreien Geber« erlauben es dem Lebewesen, seine Handlungen zu »planen«. Etwas Ähnliches braucht auch der Roboter zur Nachbildung der Bewegungsfunktionen des Menschen.

Die dritte Generation kann auch »sehen«

Manipulatoren und Halbroboter sind mit einer Fernsehverbindung ausgestattet: In der Arbeitszone werden eine oder mehrere Fernsehkameras installiert. Am Steuerpult befinden sich die Bildschirme. Das Fernsehsystem »verlängert« sozusagen die visuellen Möglichkeiten des Operators. Diese Fernsehrückkopplung bewirkt, daß sich der Operator am Ort der »Handlung« anwesend »fühlt«, ein Effekt, der für die Informationserfassung und die Einschätzung der Situation notwendig ist. Am Beispiel eines Modells, das unter der Leitung von Marc Minski am Technologischen Institut von Massachusetts (USA) entwickelt worden ist, läßt sich zeigen, was die Roboter der dritten Generation auszeichnet.

Die Arbeitszone des Geräts wird durch eine Fernsehkamera beobachtet, jetzt allerdings ohne den Menschen als Operator, denn hier »erblickt« ein Automat die Situation über ein Fernsehbild, und das Einschätzen – jene Aufgabe, die man sonst dem Menschen überträgt – muß nun, wenigstens teilweise, vom Automaten vorgenommen werden.

Wir haben bereits den »Myocoder« kennengelernt, ein automatisches System für das Erkennen bioelektrischer Bilder. Dort erfolgte das Erkennen durch die statistische Verarbeitung einer Vielzahl bioelektrischer Bilder, wobei eine bestimmte Sonderverteilung herausgegliedert werden mußte, die für jene Bewegungen bzw. Erscheinungen charakteristisch war, die erkannt werden sollten. Bei dem neuen Automaten wird ein anderes Erkennungsverfahren benutzt. Die geradezu gigantische Informationsmenge aus dem Fernsehempfänger wird künstlich durch eine Spezialvorrichtung reduziert, die aus dem erhaltenen Bild nur jene charakteristischen Besonderheiten auswählt, die zur Erkennung eines Objekts mit vorher bekannten Eigenschaften notwendig sind. Diese Objekte waren bei der Erprobung des Automaten wiederum Würfel. Für Würfel ist die Tatsache charakteristisch, daß an ihren Kanten eine sprunghafte Helligkeitsänderung von einer Fläche zur nächsten eintritt. Der Digitalrechner, der das optische Bild aus der Fernsehkamera verarbeitete, war imstande, aus diesem Bild jene Zonen auszugliedern und abzuspeichern, in denen plötzliche Helligkeitsänderungen eintreten.

Die aus der Umwelt empfangene Information muß dann nach einer bestimmten Verarbeitung mit einer Information verglichen werden, die dem Automaten als Vorlage dient. Um mit der Umwelt richtig in Wechselwirkung zu treten, muß der Roboter also diese Vorlage kennen; es muß eine »innere Welt« des Roboters gebildet werden. Die Vergleichsvorschriften und Kriterien, die er zur Einschätzung der erfaßten Information benutzen muß, müssen formuliert sein.

Die »innere Welt« des Roboters muß in einem Ausbildungsprozeß entwickelt werden, beispielsweise in der Art, wie sie zur Erkennung eines bioelektrischen Bildes dient, d. h. auf der Grundlage einer Mehrfachverarbeitung

von Informationen, die bestimmte statistische Eigenschaften aufweisen. Oder es muß so geschehen wie in dem von Minski gewählten System, wo Angaben über besondere Eigenschaften (schriffe Helligkeitsunterschiede) und ihre Verteilung für die zu erkennenden Objekte vorher in die Maschine eingegeben werden und so ihre »innere Welt« bilden. Dann ist die Maschine imstande, die Würfel zu erkennen, indem sie die Besonderheiten der Objekthelligkeit auf dem Bildschirm mit den zuvor eingegebenen Merkmalen des Objekts vergleicht. Sie fixiert ihre Lage und findet sich in der Situation zurecht. Nun kann sie »mit offenen Augen« vorgehen, statt die Würfel blindlings zu suchen. Sie ist jetzt »fast« wie ein Mensch imstande, die Würfel aufzunehmen, in die Schachtel zu legen oder in einer bestimmten Weise anzuordnen. Sie kann alles tun, was im Programm festgelegt ist.

In Stanford (USA) wurde das Modell eines Roboters erprobt, das einen Wagen darstellt, der mit einem Radfahrwerk versehen ist, wobei jedes Rad einen unabhängigen elektrischen Antrieb besitzt. Doch hier interessieren uns nicht die Fragen, die mit der Konstruktion des Stütz- und Bewegungsapparates, mit der Geländegängigkeit usw. zusammenhängen. Es galt, ein System zu entwickeln, das hohe informative Möglichkeiten besitzt, die für eine eigenständige Fortbewegung ausreichen. Deshalb ist der Automat mit vier Kanälen ausgestattet, über die die Informationserfassung aus der Umwelt erfolgt.

Die Tastorgane bestehen aus einer Gruppe flexibler Drähte, die sich mit den Schnurrbarthaaren einer Katze vergleichen lassen. Sie sind am Gehäuse des Wagens befestigt und arbeiten im Dualcode. Berührt ein »Schnurrbarthaar« irgendeinen Gegenstand, gelangen die entsprechenden Signale über einen Digitalrechner in die Bremsanlage des Wagens, so daß das Gefährt anhält.

Dieser Vorgang vollzieht sich gewissermaßen reflektorisch. Der Rechner, der gleichzeitig die Information darüber erhalten hat, auf welcher Seite sich das Hindernis befindet, ist jedoch imstande, diese reflektorische Handlung zu unterdrücken; er kann den Wagen veranlassen, weiterzufahren oder seine Bewegungsrichtung zu ändern. Etwa dem gleichen Zweck dient eine Puffervorrichtung,

die mit Gebern ausgestattet ist, welche die Wechselwirkung zwischen Wagen und Hindernis messen.

Der Wagen ist mit einem Entfernungsmesser ausgestattet, mit dessen Hilfe der Digitalrechner die Entfernung bis zu einem Hindernis bestimmt. Der Entfernungsmesser befindet sich auf einer beweglichen Plattform mit zwei Freiheitsgraden. Sie kann sich automatisch aufwärtsbewegen und außerdem um die Vertikale geschwenkt werden. Die Information über die gemessene Entfernung gelangt ebenfalls in den Rechner, der ein grobes Bild des Raumes entwirft, der den Wagen umgibt. Der Wirkungsbereich des Entfernungsmessers beträgt 0,5 bis 10 m.

Auf der gleichen Plattform, auf der sich der Entfernungsmesser befindet, ist auch eine Fernsehkamera angeordnet. Der Wagen tritt ebenso wie der Manipulator mit einfach geformten Objekten (etwa Würfeln) in Wechselwirkung, und das Sehsystem gliedert aus dem von der Fernsehkamera gelieferten Bild Zonen mit schroffen Helligkeitsübergängen heraus. Es erkennt und identifiziert diese.

Die Orientierungsempfindung wird durch ein besonderes Navigationssystem gesichert. Im Grunde genommen handelt es sich dabei um ein System zur Erfassung des zurückgelegten Weges. Dabei wird irgendein Punkt auf dem Boden des Raumes, in dem sich der Wagen bewegt, als Anfangspunkt gewählt. Von diesem Punkt aus erfolgt die ständige Fortschreibung der Drehungen der beiden Antriebsräder. Aus diesen Angaben werden die Position und die Bewegungsrichtung des Wagens berechnet.

Der Antrieb der Räder sowie der Plattform mit der Fernsehkamera und dem Entfernungsmesser erfolgt mittels Elektromotoren, die ihre Befehle aus dem Digitalrechner erhalten. Zwischen dem Rechner und der Programmierereinheit einerseits und dem Wagen andererseits besteht eine Funkverbindung.

Der Operator schreibt seine Anweisungen in einem besonderen Kode über Fernschreiber in den Rechner ein.

Mit diesem Roboter, der vorläufig noch keine Arme besitzt, werden bereits seit mehreren Jahren Versuche unternommen. Dieser Apparat tritt nur über seinen Puffer

mit der Umwelt in Wechselwirkung. Aber selbst das hat ausgereicht, die ungewöhnlichen »intellektuellen« Fähigkeiten dieses Roboters zu demonstrieren, der ebenfalls ein Vertreter der dritten Generation ist.

Die Aufgaben, die ihm anfangs gestellt worden waren, betrafen die Untersuchung eines unbekanntes Territoriums: Er mußte dieses Gebiet »begehen« und besichtigen. Er sollte die jeweilige Situation erkennen und bestimmte Situationen abspeichern. Danach erreichten die Forscher, daß der Roboter bestimmte Objekte (Würfel) fand und mit Hilfe seiner Puffer an einen bestimmten Platz schob. Nach der Realisierung einer Reihe derartiger Programme wurde ein neues Experiment durchgeführt, in dessen Verlauf der Roboter eine unvergleichlich schwierigere Aufgabe als das Einsammeln von Würfeln ausführte. Dabei entschied er (erstmalig in der Geschichte!) selbständig, ob er zur Ausführung einer bestimmten Tätigkeit ein besonderes Werkzeug benutzen sollte oder nicht.

Der Roboter befand sich in einem Raum, in dem eine Plattform aufgebaut war, auf der sich ein Gegenstand in Form eines Prismas befand. Der Apparat sollte nun dieses Objekt aufsuchen und mit Hilfe seines Puffers an einen bestimmten Ort schieben. In einer anderen Ecke des Zimmers lag ein Gebilde in Form einer Rampe. Der mit Rädern versehene Roboter war nicht imstande, die Plattform zu erklimmen, auf der das Prisma lag. Um seine Aufgaben zu lösen, mußte er erst den Entschluß fassen, ein Hilfsmittel – in unserem Fall die transportable Rampe – zu suchen und zu benutzen. Nachdem er diese Entscheidung gefällt hatte, mußte er die Rampe finden, sie richtig orientieren und an die Plattform heranrücken. Erst danach war er imstande, über diese Rampe, die in Form einer schiefen Ebene ausgeführt war, auf die Plattform hinaufzurollen, das Objekt zu finden, von der Plattform herunterzustoßen, danach selbst wieder von der Plattform herunterzufahren, das Objekt richtig aufzustellen und dann an den gewünschten Ort zu schieben.

Bei der Formulierung dieser Aufgabenstellung gingen die Forscher davon aus, daß sie – vom Standpunkt der Logik aus – nicht weniger kompliziert ist als das klassische Problem vom Affen und den Bananen, das die Psychologen

zur Einschätzung der »intellektuellen« Fähigkeiten eines höherentwickelten Tieres benutzt haben. Der Affe befindet sich hierbei in einem Zimmer, an dessen Decke eine Bananenstaude hängt. In einer Ecke des Zimmers steht ein Stuhl. Für den Affen besteht die Lösung seines Problems darin, den Stuhl dorthin zu rücken, wo die Bananen hängen, auf ihn hinaufzuklettern und die Bananen zu greifen.

Das Problem »Affe und Bananen« ist mehrfach durchexperimentiert worden. Dabei wurde festgestellt, daß nur ein gut trainiertes Tier dieses Problem lösen kann. Hinsichtlich der logischen Schwierigkeit wurde einem Roboter das gleiche »zugemutet« wie dem Affen.

Er vermochte eine analoge Aufgabe zu lösen. Damit gelang der Beweis, daß er sich doch wenigstens schon affenähnlich verhalten kann.

Der Roboter ist nicht nur imstande, Anweisungen in geschriebener Form zu empfangen, sondern er kann die Antworten auf diese Anweisungen auch ausdrucken. So ist eine Wechselwirkung zwischen dem Roboter und dem Operator möglich, die weder den Charakter noch den Inhalt der Informationen einschränkt, die sie austauschen. Ein typisches »Szenarium«, wie es in Stanford inszeniert worden ist, enthielt folgendes Gespräch:

Operator: Rücken Sie bitte um 15.00 Uhr einen kleinen Würfel in meine Nähe.

Roboter: Es sind zwei kleine Würfel vorhanden.

Operator: Rücken Sie den kleineren von beiden heran.

Roboter: Verstanden.

Operator: Wann werden Sie den kleinen Würfel herandrücken?

Roboter: Ich werde ihn um 15.00 Uhr herandrücken.

Roboter: (Zeit: 15 h 01 min): Ich habe den kleinen Würfel herangerückt.

Operator: Danke.

Wieviel Mühe auf das Einfahren jedes derartigen Programms auch verwendet wurde und wie »glatt« dem Roboter die Ausführung dieser Programme schließlich gelang – diese und ähnliche Fragen dürfen uns nicht den Blick auf das Wichtigste versperren: Die Möglichkeiten der Roboter nehmen von Generation zu Generation zu.

Bei dem beschriebenen Robotermodell ist der Operator

von der Notwendigkeit befreit, die Bewegungen des Apparats ständig zu steuern. Die Steuerungsfunktionen des Menschen betreffen jetzt nicht mehr die Einzelheiten der Bewegung, d. h. keine Spezialaufgaben mehr, die bei der Ausführung einzelner Bewegungsakte entstehen, sondern sie reduzieren sich auf die Ausgabe allgemeiner Anweisungen.

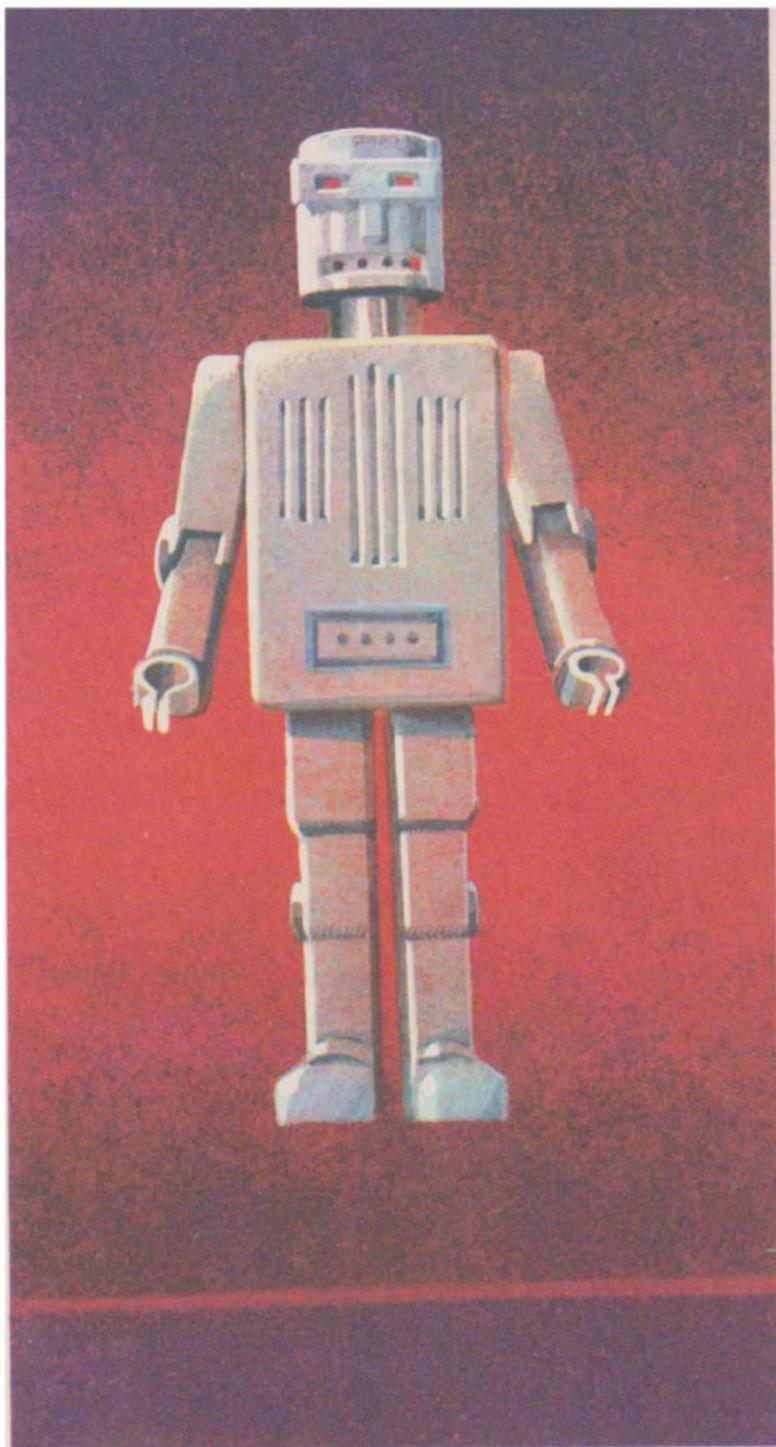
Der Stanford-Wagen mit seinen »intellektuellen« Fähigkeiten ist als Träger eines mechanischen Armes durchaus geeignet. Und würde man diesen Rumpf statt mit einem Radfahrwerk noch mit Beinen versehen, dann wäre er einem echten Roboter schon recht ähnlich.

Der englische Wissenschaftler Professor M. W. Turing hat in einer technischen Zeitschrift die Vorteile des Einsatzes von Robotern im Haushalt untersucht und folgende technische Bedingungen für derartige mechanische »Haushaltshilfen« formuliert. Seinen Berechnungen zufolge muß der Roboter einen Rumpf von 1,2 m Höhe haben und sich mit Hilfe eines Mechanismus fortbewegen, der Treppen steigen und Schwellen überwinden kann.

Turing »stattet« seinen Roboter mit nur einem Arm aus. Er verleiht ihm allerdings »solide« Maße: Ober- und Unterarm sind jeweils 1,2 m lang, und der Arm endet in einem Greifer, dessen Hubkraft 40 kp erreicht. Der Roboter müßte nun noch mit künstlichen Sinnesorganen und einem Digitalrechner versehen werden. Außerdem müßte er einige bedingte Reflexe erhalten, die z. B. das Umgehen von Hindernissen ermöglichen.

Die Diskussionen über diesen Vorschlag des englischen Professors betrafen nicht so sehr die technischen Voraussetzungen, einen derartigen Roboter zu bauen, als vielmehr die Zweckmäßigkeit und Effektivität seines Einsatzes. Wer soll dieses Monstrum bezahlen?

Noch nicht »aus der Mode« gekommen: der »eiserne Homunkulus« als radioelektronischer Sekretär, Wächter und Kindermädchen, das »Hobby« eines Kalugaer »Bastlers«: mit 20 000 Einzelteilen, Dutzenden von Elektromotoren, einem 160adrigen Kabel, das die Verbindung zu fünf Tonbandgeräten herstellt, und zwei Dutzend in allen Teilen der Wohnung installierten »Fühlern«

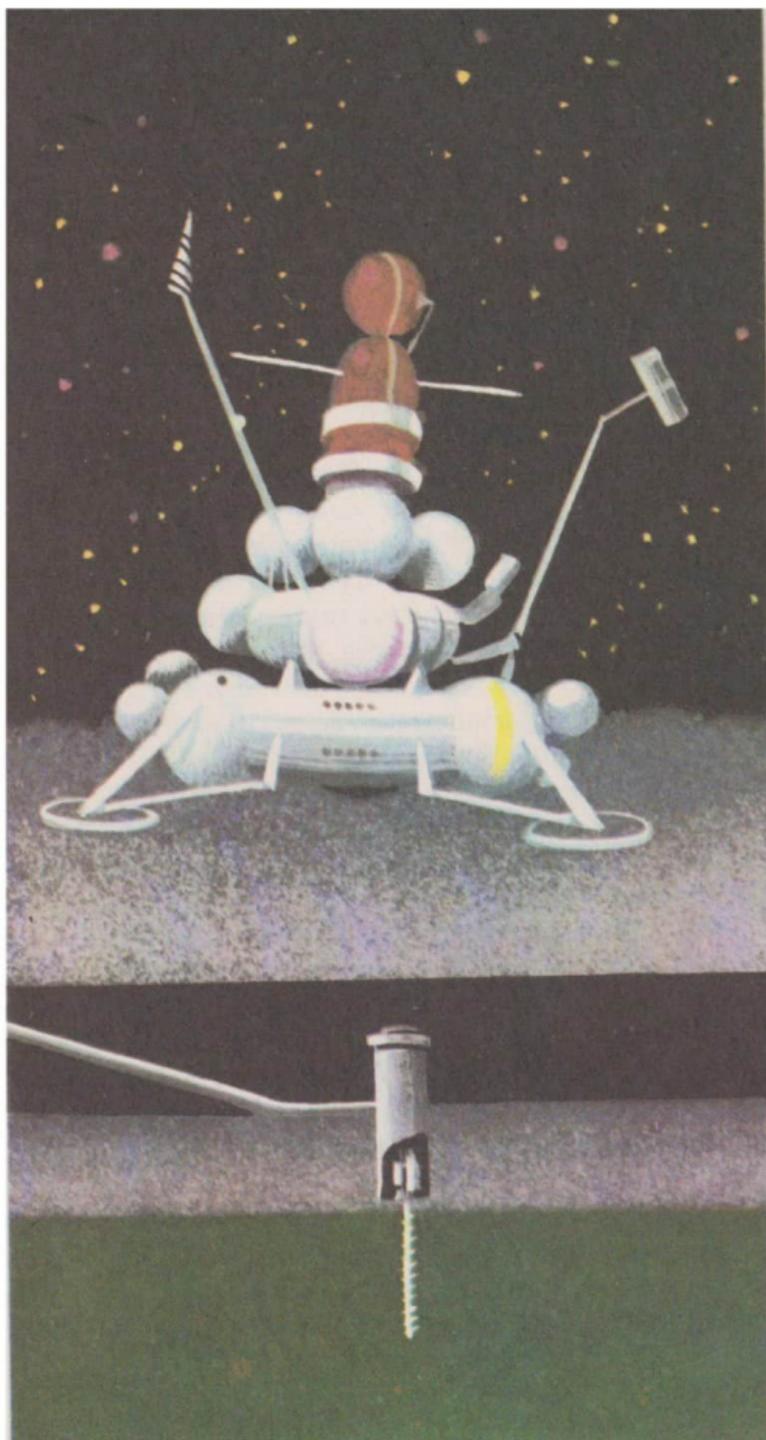


Erde – Mond – Erde

»Die Rückkehrkapsel der Station ‚Luna 16‘ ist am 24. September 1970, 6h 26 min MEZ, 80 km südöstlich der Stadt Dsheskasgan gelandet.« So wurde ein hervorragendes Raumflugunternehmen beendet, das am 12. September 1970 begonnen hatte, als der Raumflugkörper »Luna 16« auf die Reise ging. Während des Fluges führte er eine Reihe komplizierter Bahnmanöver aus. Die Landestufe des Apparats ging am 20. September 6h 18 min MEZ auf dem Mond im Gebiet des Mare Foecunditatis (»Meer der Fruchtbarkeit«) nieder. Die Abschaltung der Hilfstriebwerke erfolgte automatisch durch einen Gammastrahlenhöhenmesser. Ein elektrisch betriebenes Bohrsystem wurde auf den Boden niedergebracht. Mit Hilfe eines hohlen Bohrmeißels wurde Mondgestein bis zu einer Tiefe von 35 cm entnommen. Die Rückkehrkapsel hob sich am 21. September vom Landeteil ab. Zum erstenmal in der Geschichte der Menschheit wurde mit Hilfe eines unbemannten fernsteuerbar-halbautomatischen Lande- und Rückkehrgeräts eine Bodenprobe von einem anderen Himmelskörper zur Erde gebracht.

Nachdem wir nun bereits viele Modelle von Automaten und Robotern kennengelernt haben, die zur Erforschung und Erschließung der Tiefen des Ozeans und der kosmischen Weiten bestimmt sind, können wir jene »mechanischen« und »intellektuellen« Vollkommenheiten exakter einschätzen, die »Luna 16« besaß. Die »globalen« Bewegungen des Apparats, die ja immerhin einige 100 000 km umfaßten, gingen in Bewegungen über, die nur Meter und Zentimeter weit reichten. Die Flugbewegungen waren mit Arbeitsbewegungen kombiniert, mit jenen Manipulationen, die zur Entnahme der Bodenproben, zum Einbringen in einen hermetisch verschließbaren Behälter usw. notwendig waren. Kurz gesagt: Vieles von dem, was wir in den vorhergehenden Kapiteln als wünschenswert und denkbar bezeichnet haben, war in diesem bemerkenswerten Projekt in dem einen oder anderen Umfange bereits realisiert. Es

»Luna 16« auf der Mondoberfläche beim Ausbringen des Bohrgeräts. Unten das Bohrgerät in Aktion



charakterisiert den hohen Stand des wissenschaftlich-technischen Fortschrittes in der Sowjetunion.

»Luna 16« zeigte insbesondere, wie kompliziert der »Auftrag« sein kann, den man einem Automaten erteilt. Wäre es nun wirklich so verwunderlich, wenn einer der nächsten Raumflugkörper einen Automaten absetzte, der die Aufgabe hätte, in der Nähe des Landeortes Bodenproben zu entnehmen, wobei der Operator auf der Erde über ein Fernsehsystem alles sehen könnte? Danach »erkundigte« sich der Automat beim Operator über Einzelheiten der Aufgabenstellung, und schließlich führte er noch eine Reihe weiterer Aufträge aus, die ihm unmittelbar erteilt werden könnten. Und werden Mondfahrzeuge vom Typ »Lunochod« nicht eines Tages noch vollkommener »Geschwister« erhalten, die dann auf anderen Planeten des Sonnensystems selbständig operieren?

Natürlich werden sich die Kontakte des Automaten mit der Leitzentrale auf der Erde in dem Maße erweitern, in dem das Arbeitsprogramm des Automaten komplizierter wird. Dabei werden auch alle Vorzüge zur Geltung kommen, die ein ferngesteuerter Apparat gegenüber einem bemannten Raumfahrzeug besitzt. Ein Roboter kann sich an jedem beliebigen Ort eine beliebig lange Zeit aufhalten, und das Ausführen des Auftrags ist bei ihm nicht mit einem Aufwand zur Lebenserhaltung und zur Erhaltung der moralischen Kraft verknüpft.

Die Erfahrung hat uns im Verlauf einer langen Zeit gelehrt, daß die »Konstruktion« des Menschen – seine physiologischen und psychischen Möglichkeiten – sich im Laufe der Zeit kaum ändert. Was dagegen die Möglichkeiten von Automaten und Robotern betrifft, so besagen die bisherigen Erfahrungen genau das Gegenteil. Ihre Möglichkeiten nehmen buchstäblich stündlich zu. Natürlich weist die Raumfahrttechnologie eine Reihe spezifischer Besonderheiten auf, doch kann sie sich unter dem Aspekt der Automatisierung nicht grundsätzlich von anderen Zweigen unterscheiden. Und die Erfahrung zeigt auch, daß der Automatisierungsgrad in allen modernen Zweigen der Technologie unaufhörlich steigt.

Diese Überlegungen führen zu dem Schluß: Ändert sich in der Zukunft das Verhältnis zwischen bemannten und

automatischen Systemen, wird dieser Wandel höchstwahrscheinlich zugunsten der Automaten eintreten.

Wir haben in diesem Taschenbuch nicht die Möglichkeit, über die Besonderheiten der Raumfahrttechnologie ausführlicher zu sprechen. Doch eine davon muß erwähnt werden: Sie hängt mit den großen Entfernungen zusammen, die den künftigen Roboter bei seiner Landung auf dem Mond oder einem Planeten von den »Beratern« und »Helfern« auf der Erde trennen.

Die Höchstgeschwindigkeit, mit der Signale im Raum übertragen werden können, kann die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten. Die Strecke Erde-Mond-Erde legen Funksignale in 2,6 s zurück, und ein Signal von der Erde zum Mars und zurück benötigt 188 s. Wenn der Roboter keine hinreichend hohen »intellektuellen« Fähigkeiten besitzt und keine genügend große Autonomie aufweist, dann müssen Zuverlässigkeit und Effektivität seiner Handlungen bei diesen Verzögerungen erheblich in Mitleidenschaft gezogen werden.

Also muß der Roboter, den so große Entfernungen vom Menschen trennen, nicht nur mit künstlichen Sinnesorganen, sondern auch mit einem Digitalrechner ausgestattet sein. Der Roboter im Weltraum und der Operator auf der Erde sowie ihre elektronischen Datenverarbeitungsanlagen werden sich jeweils in dem für sie bequemsten Kode miteinander verständigen.

Immer rascher verbessert der Mensch die mechanischen und intellektuellen Möglichkeiten der Roboter. Er erhöht ihre Autonomie und die Kompliziertheit der Programme, die mit ihrer Hilfe bewältigt werden sollen. Er berät heute schon die Kriterien und allgemeinen Prinzipien, nach denen ein universeller Roboter der Zukunft handeln wird.

Den Gegenstand dieser Überlegungen kann man – allerdings nur angenähert – am Beispiel eines logischen Problems erläutern, das dem Problem vom Affen und den Bananen analog ist.

Gehen wir davon aus, wir hätten dem Roboter beigebracht, »auf den Einfall zu kommen«, daß er bestimmte Hilfswerkzeuge verwenden muß. Wir haben ihm außerdem beigebracht, zweistufige logische Probleme zu lösen (um die Bananen zu erreichen, muß man zunächst auf einen

Stuhl klettern). Doch sobald es zur Realisierung der gefundenen logischen Lösungen kommt, steht der Roboter plötzlich vor einer nicht abzählbaren Menge von Varianten. Daraus erwächst aber das Problem, eine Variante auszuwählen, die in der einen oder anderen Beziehung optimal ist. Anders gesagt: Der Roboter, der »begriffen« hat, daß man eine Rampe an die Plattform heranbringen muß, kann diese Rampe stoßen oder umdrehen; er kann sie auf sehr unterschiedliche Art und Weise aufstellen. Welches Verfahren muß er wählen? An welche »Strategie« soll er sich halten?

Wenn es wirklich ein echter Roboter ist, der die Fähigkeit besitzt, logische Probleme nicht nur im »Geiste«, sondern in der Tat zu lösen, dann muß er sich – außer an die allgemeinen Lösungsprinzipien – auch an bestimmte allgemeine Verhaltensprinzipien bei der praktischen Realisierung dieser Lösungen halten. Der Roboter soll ja nicht nur »denken«, sondern auch arbeiten und handeln. Und wahrscheinlich ist es so, daß der Roboter um so allgemeinere Prinzipien in seinen Handlungen anwenden muß, je umfangreicher seine funktionalen Möglichkeiten werden. Welche Prinzipien sind das? Welche Seiten seiner Tätigkeit müssen sie betreffen? Worin sollen sie zum Ausdruck kommen?

Leider gibt es diese Roboter heute noch nicht. Es gibt also noch keine Beispiele, mit denen alle diese Fragen mittelbar oder unmittelbar beantwortet werden könnten. Was also sollen wir tun? Am einfachsten dürfte es sein – wenn wir schon kein reales Beispiel haben –, uns ein allgemeines Prinzip vorzustellen, nach dem jeder künftige Roboter handeln muß. Wir müssen versuchen, ein zumindest auf den ersten Blick vernünftiges Verhaltensprinzip für den Roboter zu finden. Ein solches Prinzip wäre das der optimalen Zweckmäßigkeit. Wir müßten dann unsere Vorstellungen exakt formulieren und sie in konkrete Vorschriften gießen, die, wie wir meinen, auf Prinzipien basieren, die für alle Wechselfälle im »Leben« des Roboters geeignet sind. Dann können wir uns ausmalen, wie der Roboter handeln wird, indem er diese Prinzipien und Vorschriften anwendet, wenn er ohne »Vorsagen« seine Arbeit verrichtet.

»akzent« – die neue Taschenbuchreihe
mit vielseitiger Thematik:
Mensch und Gesellschaft,
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft
und Technik. – Lebendiges Wissen
für jedermann, anregend und aktuell,
konkret und bildhaft.

Weitere Bände:

Aus dem Tagebuch der Erde
Der Sternhimmel
Tiere im Winterschlaf
Mathe mit Pfiff
Sind wir allein im Weltall?
Die Erfindung des Haustieres
Vom Wasser- zum Landleben
Tiere und Pflanzen der Vorzeit
