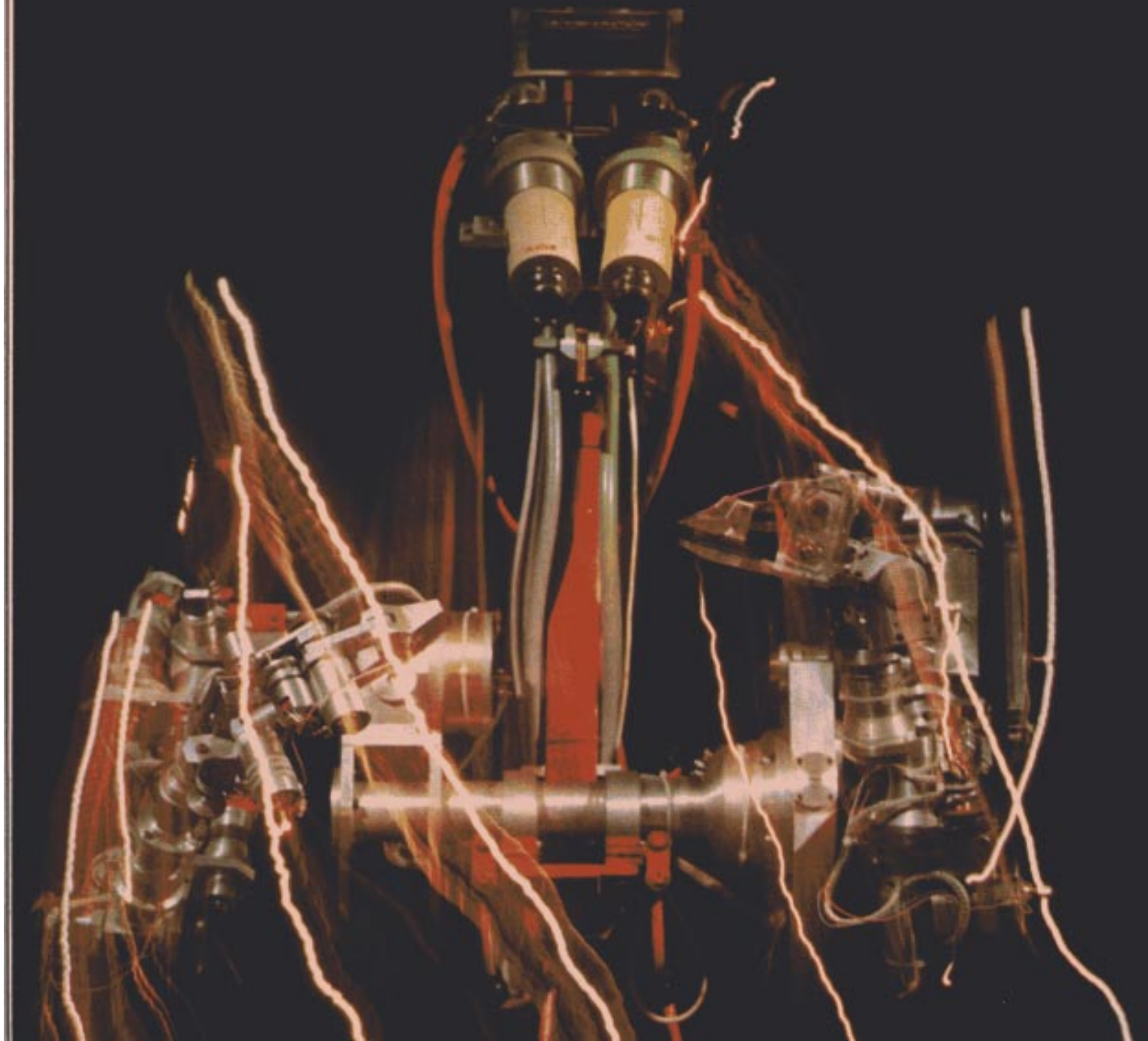


Spätestens das dramatische Geschehen um die Mission von Apollo 13 hat die Frage aktualisiert, ob nicht Roboter gefährliche Festaufträge durchführen können als leblose leistungsfähige Sklaven von größtmöglicher Vielseitigkeit, die von einem wissenschaftlichen „Meister“ ferngesteuert werden:

Syntelmann – und die mögliche



Hans Kleinwächter

Konsequenzen



Syntelmann in Aktion: Sieben Motoren in jedem Arm des Maschinensklaven ahmen die Bewegungen des menschlichen Meisters millimetergenau nach. Der Meister blickt durch die „Augen“ der Stereofernsehkamera im Kopfteil der Maschine und kann sie so über Funk oder Draht aus großer Entfernung steuern. Die Greifarme agieren bereits so feinfühlig, daß sie ein Streichholz entzünden, eine Kerze anzünden und nachher den Docht ausdrücken können. Für diese Bewegungsstudien, die Syntelmann links bei einer Armbewegung mit Körperhub und -drehung und rechts bei einer ausladenden Armbewegung zeigen, sind Lämpchen an den wichtigsten Gelenken befestigt.

Die Menschen erdachten die Maschine, um sich die Arbeit zu erleichtern, sie wirksamer auszuführen und auf größere Entfernung auszudehnen. Die Maschine entstammt aus der Beobachtung der Natur, häufig als Nachahmung des menschlichen Körpers. So diente die Keule des Steinzeitmenschen zur Verlängerung seines Armes, geboren aus dem Wunsche, sich räumlich von der Gefahrenzone zu entfernen und härtere Schläge als mit der unbewaffneten Faust ausführen zu können. Die meisten unserer Werkzeuge, eine Untergruppe der Maschinen, wie die Schaufel, die Zange, der Schraubenschlüssel und andere mehr, sind als zweckmäßige, spezielle Nachbildung einer der vielen möglichen Formen der Hand entstanden.

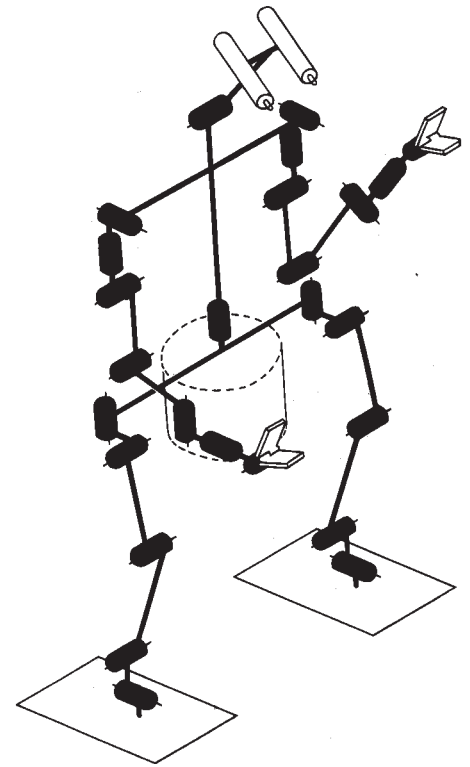
Der besseren Wirksamkeit dieser Werkzeuge steht aber die erheblich größere Vielseitigkeit der menschlichen Hand gegenüber.

Die ständig zunehmende Aktivität des Menschen in lebensfeindlicher Umwelt und insbesondere die neuen Techniken in der Atomenergie, in der Raumfahrt und der Tiefseeforschung legen es nahe, Maschinen zu bauen, die nicht nur unempfindlich gegen die vorliegenden Umweltsbedingungen, sondern auch möglichst vielseitig verwendbar sind.

Da alle von uns geschaffenen Bauten und Einrichtungen, wie Türen, Treppen, Leitern, Luken oder Schalter, letzten Endes der Form des menschlichen Körpers angepaßt sind, haben menschenähnliche Maschinen (Anthropomorphe Maschinen, kurz AM) die größte Vielseitigkeit. Die Ähnlichkeit ist dabei nur im Hinblick auf die Beweglichkeit und funktionell gemeint. Die menschenähnlichen Maschinen stellen daher eine extreme Vereinfachung des arbeitenden menschlichen Körpers dar, den ja die Natur mit einer verschwenderischen Anzahl von Bewegungsmöglichkeiten und den dazu benötigten Kommando- und Rückmeldeeinrichtungen versehen hat. Zur Feststellung der Mindestzahl

Links: Eine Skelettstudie Syntelmans. Der „Kopf“ besteht im wesentlichen aus den beiden Kameras der Stereofernsehanlage und den entsprechenden Übertragungseinrichtungen; der Hals kann motorisch geneigt und der ganze Oberkörper gedreht werden. Alle Gelenke, die jeweils von einem eigenen Antriebsmotor bewegt werden, sind rot hervorgehoben. Jeder Arm enthält sieben, jedes Bein fünf Motoren. In der Körpermitte wird ein Kleincomputer den Schwerpunkt des Geräts stets so auslenken, damit ein sicheres Gehen möglich wird.

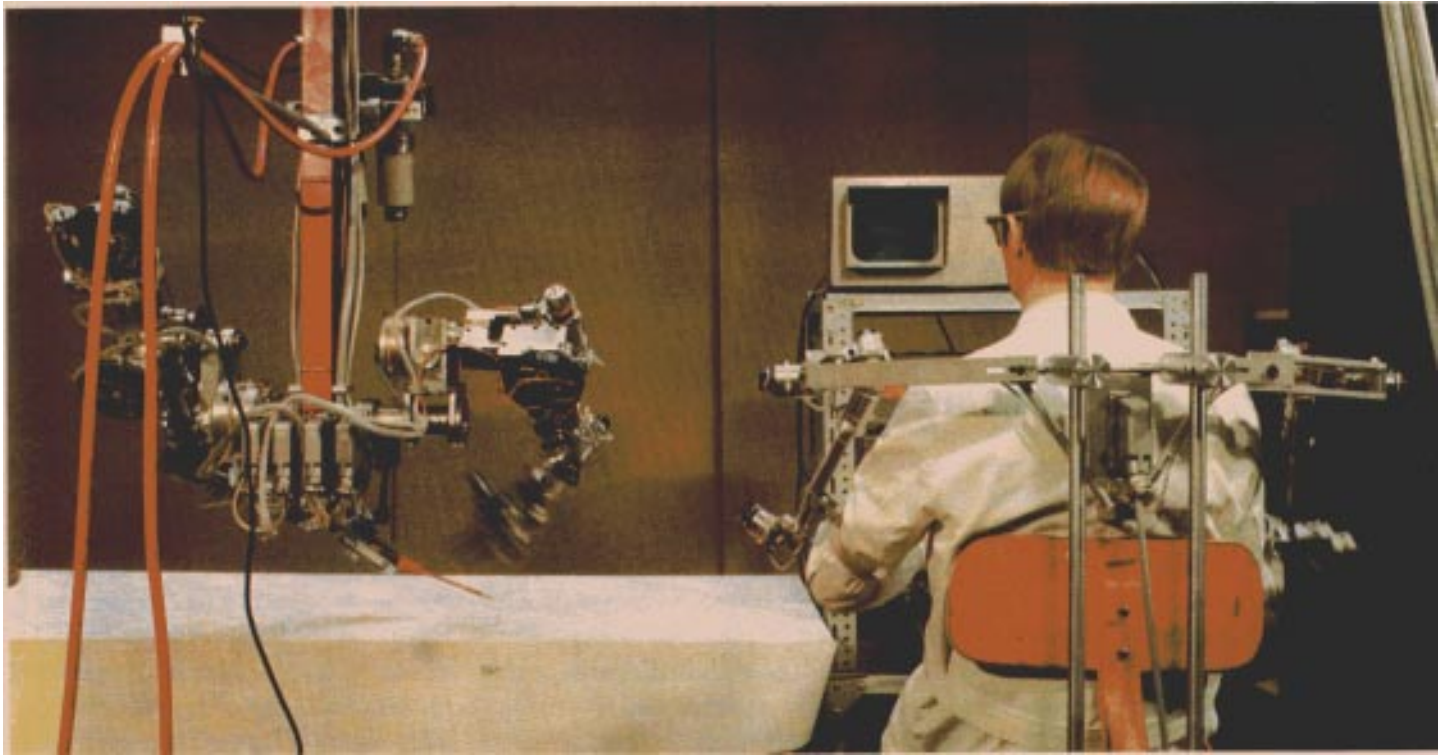
Rechts: Syntelmann im gegenwärtigen Entwicklungsstadium besteht aus „Kopf“, Oberkörper und Armpaar. Der Meister rechts, der ein Außenskelett trägt, das jede seiner Bewegungen exakt registriert und auf Syntelmann überträgt, steuert die Maschine über den Bildschirm des Stereofernsehgeräts.



der Gelenke eines Maschinenarmes muß man die kleinste Anzahl von einander unabhängiger Bewegungsmöglichkeiten, Freiheitsgrade genannt, erkennen, die eine beliebige räumliche Lage eines aus einer Zange bestehenden Handtorsos gewährleisten. Es sind dies mindestens sieben Freiheitsgrade, denn für die allgemeine Lage des Handkörpers benötigt man Einstellungen nach Höhe, Breite und Tiefe seines Schwerpunktes und außerdem noch seine Nick-, Gier- und Rollwinkel. Dazu kommt noch ein zangenförmiger Daumen-Finger-Ersatz mit einem weiteren Freiheitsgrad.

Die einfachste menschenähnliche Maschine, ein möglichst vielseitig verwendbares Werkzeug, muß als Arbeitsapparat, wie der Mensch, zwei Arme haben, die sich in ihren Funktionen sinnvoll ergänzen. Dies allein erfordert schon vierzehn Freiheitsgrade und somit vierzehn unabhängige Antriebsaggregate. Dazu braucht man noch einen Fortbewegungsapparat, der in seiner vielseitigsten Form aus zwei Beinen mit zusammen zehn motorisch bewegten

Gelenken besteht. Neben diesen Arbeits- und Fortbewegungsapparaten benötigt man zur sinnvollen Fernbedienung der AM-Systeme eine Kommandoübertragung und die Rückmeldungen der Stellungen aller Gelenkglieder, samt ihrer augenblicklichen Bewegungsgeschwindigkeiten. Diese Rückmeldungen entsprechen dem Gliederstellungsempfinden des menschlichen Körpers und dem räumlichen Gesichtssinn des Augenpaars. Bei der menschenähnlichen Maschine verwendet man für die Rückmeldung der Gelenkstellungen meistens elektronische Winkelabgriffe an allen Gelenken und ein Stereo-Fernaugenpaar für die Rückmeldung des räumlichen Bildes an die Bedienungsperson. Zu diesem doppelten Lagerrückmeldesystem kommen noch Sensoren, welche die Reaktionskräfte und Drehmomente messen, die beim Arbeiten und beim Zusammentreffen mit Hindernissen auftreten. Weitere Sensoren melden zum Beispiel die Temperatur der Umgebung und der Antriebsmotoren oder die Rauheit von Oberflächen durch Schwingungsmessung



beim Entlanggleiten der Maschinenhand.

Durch Verwendung von Sensoren für radioaktive Strahlen, Magnetfelder und andere können die natürlichen Sinne des Menschen noch erheblich erweitert werden.

Die große Anzahl der motorischen Kommandos und der von der Maschine zurückkommenden Meldungen kann von der Bedienungsperson nur dann verarbeitet werden, wenn sie sinnvoll und entsprechend seiner Anatomie angepaßt sind. Deshalb sind an allen Gliedern der Arme der Bedienungsperson Gelenksetten, Exoskelett (Außenskelett) genannt, mit elektronischen Winkelabgriffen befestigt, welche ihre Stellungen mit denen der Maschine zu vergleichen gestatten. Die elektronisch gesteuerten Antriebsmotoren der menschenähnlichen Maschine sorgen dafür, daß ihre Arme und Beine ständig dieselbe Haltung einnehmen wie die Bedienungsperson. Dank der gleichlaufenden Bewegung der menschenähnlichen Maschine mit den Gliedern der Bedienungsperson kann sie trotz

der großen Anzahl ihrer Antriebsmotoren ohne Lernprozeß gesteuert werden.

Da außerdem die Manipulation der Maschine durch Übertragung aller Bewegungskommandos und Rückmeldungen, einschließlich der räumlichen Bildinformation, auch über große Entfernungen möglich ist, benannten wir unser System Syntelmann, als Abkürzung für Synchron-Tele-Manipulator. Erst später erfuhren wir, daß der Vater der Teleoperatoren, V. R. C. Goertz im Argonne National Laboratory, das System der von Menschen ferngesteuerten Maschinenarme generell „Master-Slave“-System (Meister-Sklaven-System) getauft hatte.

Deshalb wollen wir jetzt unter Syntelmann speziell einen von Menschen ferngesteuerten Maschinenmenschen mit zwei Armen und zwei Beinen verstehen.

Die menschenähnliche Gestalt des Syntelmann ist nicht, wie bei den Robotern der zwanziger Jahre, eine durch die beschränkte Phantasie der Zukunftsdichter willkürlich gewählte Form, sondern sie ist im Hin-

blick auf eine bequeme Handhabung zwangsläufig gegeben.

Die gleichlaufende Übertragung aller wesentlichen Gelenkstellungen des Meisters auf den gleichgestalteten Maschinensklaven ermöglicht es, ohne zusätzlichen Lernprozeß und damit ohne „Koordinaten-Transformation“ die vielgliedrige Maschine zu bewegen. Im Gegensatz zu dem Phantasiegebilde der Roboter ist der Syntelmann ein zwar kompliziertes, aber bei dem Stand der heutigen Technik realisierbares Gerät, das im Zusammenwirken mit dem Menschen keine eigene Befehlszentrale braucht, sondern letzten Endes vom Gehirn des Meisters gesteuert wird. Dort werden die zahlreichen Rückmeldungen der Stellung, der Kräfte und anderes mehr der Maschine ausgewertet und die Entscheidungen über die Weiterbewegung gefaßt. Mensch und Sklavenmaschine stehen somit in einer kybernetischen Wechselwirkung.

Der Meister betrachtet über sein Stereo-Fernsehgerät den Arbeitsraum und empfindet die darin räumlich sichtbaren Hände des

„Sklaven“ als seine eigenen, denn sie folgen allen von ihm gewünschten Bewegungen. Somit ist in den natürlichen Wirkungskreis zwischen dem arbeitenden Menschen und seinem Arbeitsobjekt die menschenähnliche Maschine mit ihrem Kommandoempfangs- und Rückmeldesystem unbewußt eingegliedert.

Will man mit derselben AM abwechselnd schwere, von Menschenkraft gerade noch zu bewältigende oder noch größere Lasten heben und dann wieder Gegenstände von der Zerbrechlichkeit eines rohen Hühneries manipulieren, so braucht man an der Handzange Kraftmesser, die in dem ganzen Kraftbereich eindeutig Werte rückmelden. Während für große Kräfte die Stromstärke der elektrischen Antriebsmotoren oder der Flüssigkeitsdruck der Hydraulikmotoren ein ausreichendes Maß für die Greifkraft ist, muß bei kleinen Reaktionskräften wegen der unvermeidlichen Getriebereibung ein besonderer Kraftsensor benutzt werden.

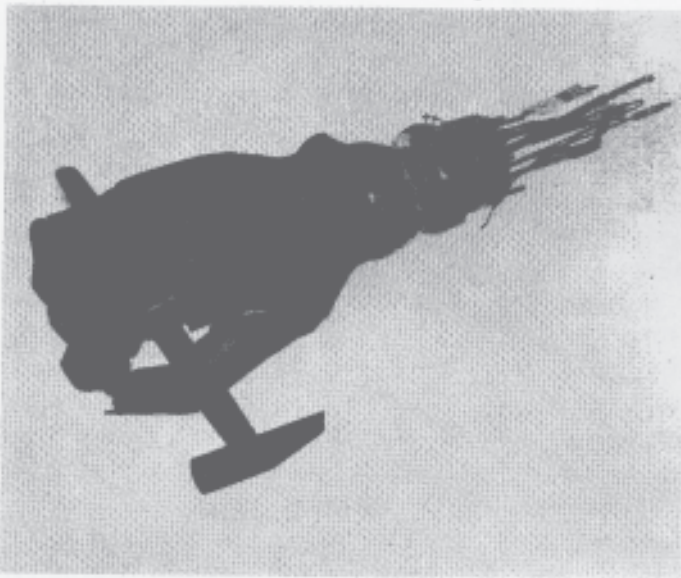
Die Muskeln als äußerst zweckmä-

ßige Antriebsmotoren der menschlichen Gliederkette bewegen diese durch willkürlich steuerbare Kontraktionen. Dabei liefern biophysikalische Prozesse, die wir bis heute noch nicht nachzubilden imstande sind, die notwendigen Energiequellen. Die für eine AM verwendeten Elektromotoren ergeben jedoch nur dann ein niedriges Leistungsgewicht, wenn sie klein sind und dafür entsprechend schnell rotieren. Da aber alle Schwenkbewegungen der menschlichen Gliederkette, mit Ausnahme der schnellen Bewegung von Hochleistungs-Akrobaten, wie beispielsweise bei den gefürchteten Kinnhaken des Muhamed Ali (Cassius Clay), nur mit verhältnismäßig kleinen Geschwindigkeiten erfolgen, benötigen alle elektrischen Antriebe Übersetzungsgetriebe mit sehr hoher Übersetzung und gutem Wirkungsgrad. Ein geniales Getriebe, das wir dafür fanden, das Harmonic-Drive-Getriebe, stammt von einer US-Schuhmacher-Firma, was die technologische Überlegenheit selbst der US-Schuhmacher zeigt!

Die Zukunft der Entwicklung solcher Maschinen gehört jedoch sicherlich den Fluidik-Antrieben, bei denen Druckgas oder Druckflüssigkeit als Antriebsmittel benutzt wird. Deshalb haben wir uns eine Art Fluidik-Muskel einfallen lassen, der potentielle Druckenergie des Antriebsmittels unmittelbar in mechanische Drehungsarbeit umwandelt, unter Vermeidung üblicher Gleitkolben.

Eine gemeinsame Schwäche aller Telemanipulatoren, die zur Zeit meistens zu Arbeiten in radioaktiv heißen Zellen der Kernenergie-technik benutzt werden, ist ihre nur mit einem Freiheitsgrad ausgerüstete Handzange. Es ist unzweckmäßig, daß man für das Heranbringen und Orientieren des Handkörpers eine Kette von sechs motorisierten Gliedern braucht und für die eigentliche Manipulation einen höchst unvollkommenen Handersatz, nämlich die Zange mit nur einem Freiheitsgrad, an diese Kette anschließt.

Da aber die große Überlegenheit des Menschen über die Tiere nicht nur



Leider nur „Entwicklungsmodell“ blieb die von W. Koennecke entwickelte mechanische Hand mit vierzehn über Kettenzüge bewegten Gelenken. Sie gehört zu einem Kunstkraftarm und wird über die Muskel des Oberarmstumpfes eines Amputierten betrieben.



J. R. Allen vom Los-Amigos-Hospital in Los Angeles baute diese Konthese: eine motorisch angetriebene Arm-Hand-Konstruktion, die an die Arme Gelähmter angeschlossen und durch einen Vielschalter mit der Zungenspitze in ihren Funktionen gesteuert wird.

auf der Leistungsfähigkeit seines Gehirns, sondern auch seiner Hände basiert, werden zukünftig vielseitige AM-Hände mit differenzierterem Aufbau als bei den heutigen Telemanipulatoren konstruiert werden.

W. Koennecke hatte nach Kriegsende eine solche vielseitige mechanische Hand entwickelt in der Annahme, daß die deutsche Nachkriegsregierung seine Aktivität im Hinblick auf die große Zahl von Kriegsinvaliden ausreichend fördern würde. Der von ihm damals realisierte Kraftkunstarm war mit einer Fünffingerhand mit vierzehn Gelenken ausgerüstet, die über Kettenzüge sich kraftschlüssig an zu erfassende Gegenstände anlegte. Der Antrieb erfolgte rein mechanisch über den Oberarmstumpf.

Im Los-Amigos-Hospital in Los Angeles baut der Biotechniker J. R. Allen in kleinen Serien spezielle Konthesen. Das sind motorisch angetriebene Arm-Hand-Konstruktionen, die an die gelähmten Arme von Kinderlähmungs- oder Querschnittsgelähmten angeschlossen



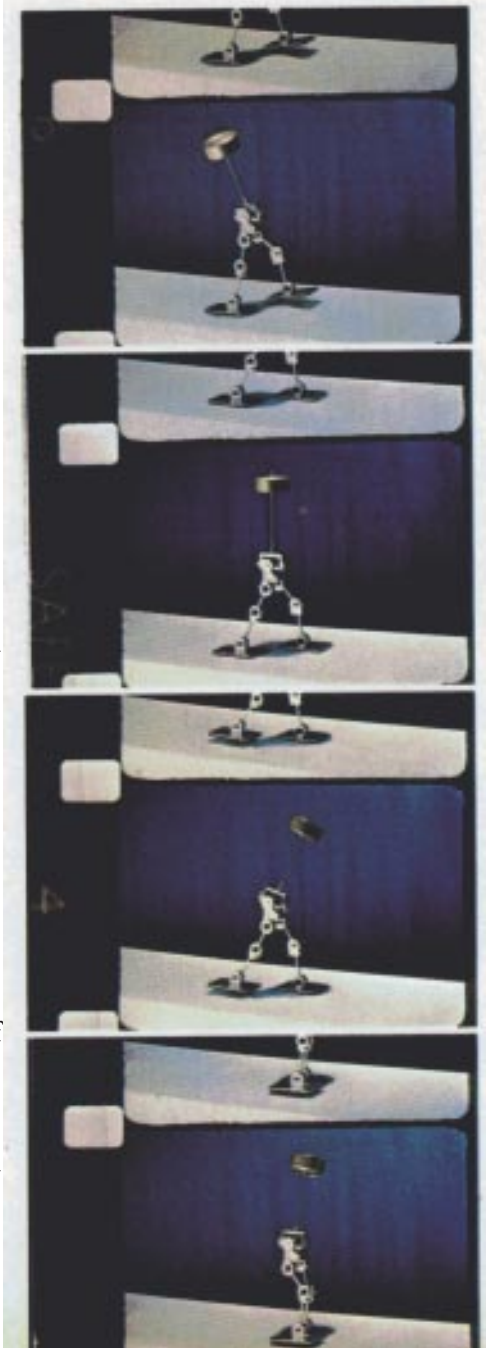
Die von R. Mosher entwickelte und in der Firma General Electric gebaute Laufmaschine. Der Meister steuert das „Maschinentier“ (200 PS-Motor) mit Händen und Füßen.

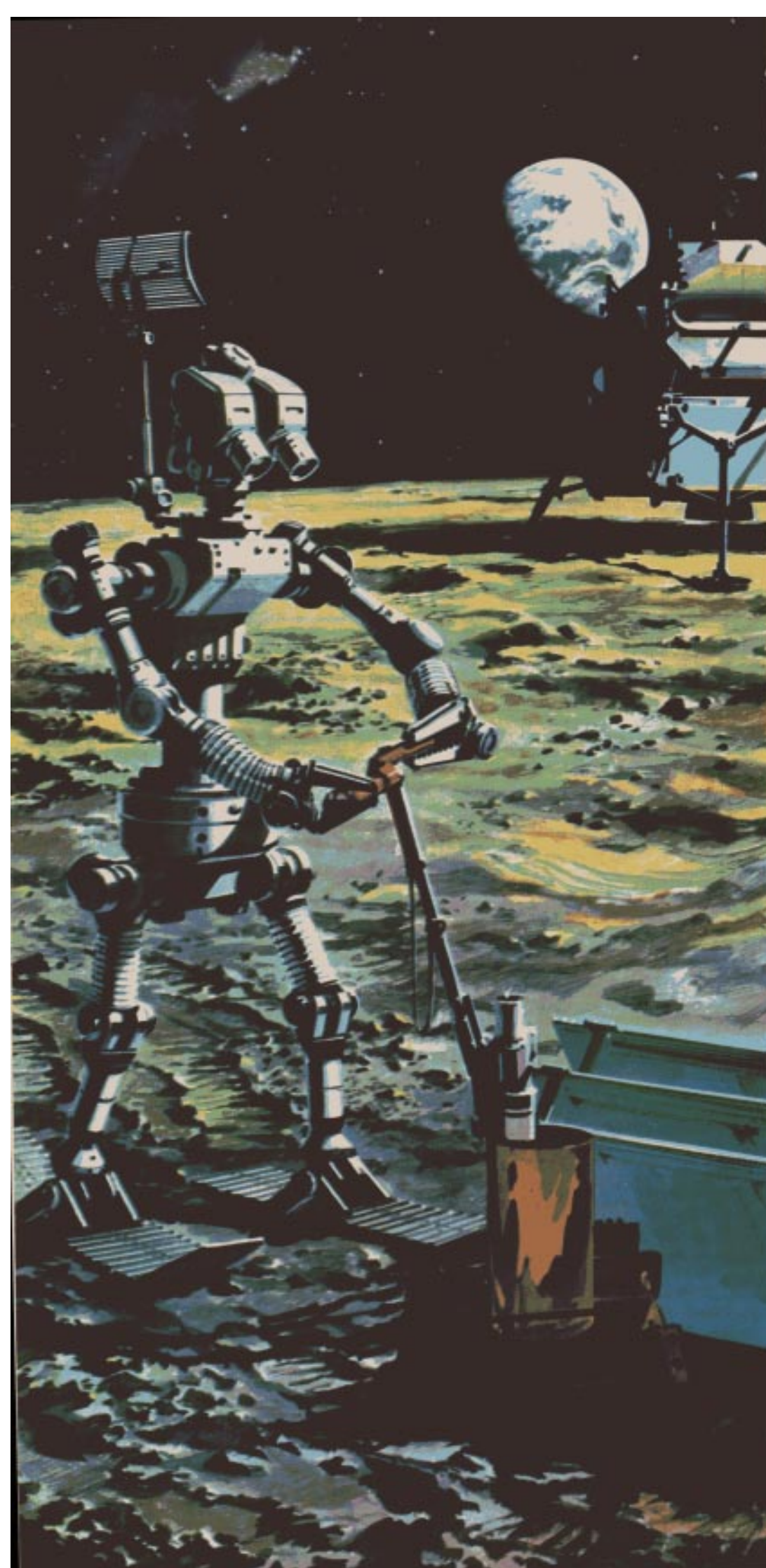
werden und die durch einen von der Zungenspitze betätigten Vielfach-Schalter gesteuert werden (siehe Bild). Auch die in letzter Zeit viel diskutierten sogenannten „myoelektrischen Prothesen“, deren Antriebsmotoren durch die elektrischen Aktionsströme nicht benutzter Muskeln gesteuert werden, gehören zu den AM. Da die zungengesteuerten Prothesen eine gleichzeitige Steuerung mehrerer Freiheitsgrade nicht gestatten und die myoelektrische Steuerung auch nur wenige Kommandos gleichzeitig und nur sehr grob liefert, haben wir den Versuch unternommen, mit Hilfe von sieben Freiheitsgraden eines Beines den künstlichen, motorisch bewegbaren Arm eines armlos angenommenen „Meisters“ zu steuern. Nach einem mehrstündigen Lernprozeß war er in der Lage, mit seinem Maschinenarm eine Flasche zu erfassen und willkürlich zu manipulieren. Dies ist nicht weiter verwunderlich, wenn man an jene Künstler denkt, die mit Füßen Bilder malen.

Mit dem heutigen Stand der Entwicklung könnten für armlose Invaliden stationäre Arbeitsplätze mit je zwei Maschinenarmen geschaffen werden, die von dem davor sitzenden Invaliden mit den Beinen kraftvoll und präzise gesteuert werden. Umgekehrt erscheint es möglich, einen Beinlosen auf zwei Maschinenbeinen gehen zu lassen, die er durch seine Armglieder steuert. Die Beine des Menschen sind, wenn man von denen der Fußballer absieht, keine Arbeits-, sondern eine Transportmaschine, die die arbeitende Hand an den Arbeitsplatz „herantransportiert“. Demzufolge gelten für die Steuerung der Maschinenbeine andere Bedingungen als für den Maschinenarm. Bei der zweibeinigen Laufmaschine des Syntelmann genügt es nicht, lediglich die Winkel des „Meister-Bein-Exoskeletts“ auf den Sklaven zu übertragen, sondern man muß zusätzlich noch dafür sorgen, daß der Schwerpunkt oder genauer gesehen die resultierende



Ein Laufmaschinen-Modell demonstriert im Trickfilm, von dem wir hier einige Ausschnitte zeigen, wie schwierig das Gehen für eine menschenähnliche Maschine sein wird, die sich ja auf recht unterschiedlichem Gelände bewegen soll. Da der menschliche Meister aus diesen Gründen nur die Beinbewegungen steuern, nicht aber das Gleichgewicht einhalten kann, soll das ein bescheidenes Maschinengehirn übernehmen: Der Schwerpunkt des Geräts muß während des Gehens eine Zickzackbewegung ausführen.





Schwer- und Trägheitskraft stets durch die Standfläche eines oder beider Füße geht.

In unserer Abbildung auf Seite 653 wird dies an einem statischen Laufmaschinen-Modell demonstriert. Der Schwerpunkt dieses Modells liegt praktisch im Mittelpunkt des als schwere Scheibe ausgeführten Oberkörpers. Bei vertikaler Beleuchtung stellt der Mittelpunkt des Schattens dieser Scheibe die Lage des Schwerpunktes über der Standfläche der Füße dar.

Damit Syntelmann auf zwei Beinen schreiten kann, muß der Schwerpunkt eine Zickzackbewegung ausführen, in der wir den charakteristischen Gang eines Seemannes wiedererkennen. Man sieht daran, daß man zum Gehen nicht nur zwei Beine, sondern auch den Kopf zur Erhaltung des Gleichgewichtes braucht. Während die Winkel der Glieder der Maschinenbeine vom Gehirn des Meisters kommandiert werden, muß die Bewegung des Maschinen-Schwerpunktes zur Entlastung des Meisters durch ein eigenes, bescheidenes Maschinengehirn, einen Computer, gesteuert werden, das aus Kräftermessungen an den Fußgelenken die Schwerpunktlage ermittelt und steuert.

Wie ernst in den USA das Problem der Laufmaschine genommen wird, zeigt die berühmte Vierbein-Laufmaschine von R. Mosher in der Firma General Electric, in dessen „Körper“ der Meister mit Händen und Füßen die Vorder- und Hinterbeine eines vierbeinigen Maschinentieres über Hydraulikmotoren von insgesamt 200 Pferdestärken betätigt. Große Bedeutung werden die AM auch bei der Eroberung des Weltreiches erlangen. Allerdings ergibt der große Energiebedarf für das Übermitteln der vielen Informationen und Kommandos sowie die vergleichsweise lange Laufzeit der elektromagnetischen Signale zusätzliche Schwierigkeiten, die man nur durch den Einsatz eigener Elektronikgehirne im Sklavensystem überwindet.

Der auf der Erde oder in der geschützten Raumkapsel befindliche Meister wird dabei nur grundsätzliche Entscheidungen dem Sklaven mitteilen, der sie mittels seines eigenen Elektronikgehirns detailliert ausführt. Im Lichte dieser Feststellung ist das mit 100 Milliarden Mark durchgeführte Apollo-Mondlandeprogramm wirtschaftlich als Fehlprogrammierung zu betrachten, denn bei rechtzeitiger Planung von Mond-AM hätten diese die Manipulationen der Astronauten wahrscheinlich nicht nur früher, sondern auch billiger und sicherlich ohne Menschenopfer durchführen können.

Auf der Teleoperator-Tagung im Frühjahr 1969 in Denver, auf der auch ein Film über Syntelmann sowie seine Anwendung für Arm- und Beinlose gezeigt wurde, stellte man fest, daß die größte Bedeutung vielseitiger AM nicht in Raumfahrt, Tiefsee, Atomtechnik, Feuerwerkstechnik und Kunstgliederbau, sondern in ihrem Einsatz in der Massenproduktion liegt.

Bei dem Trend der Menschen, sich immer mehr von unangenehmen Routearbeiten zu befreien, verspricht die AM, den manuell arbeitenden Menschen bei der Massenproduktion ablösen zu können. Für routinemäßig, sich periodisch wiederholende Manipulationen soll dabei der Meister nicht direkt die AM steuern, sondern lediglich eine bestimmte, in sich geschlossene Modellbewegung ausführen, die in einem elektrischen Speicher festgehalten wird. Von diesem Speicher aus wird dann die AM so lange Tag und Nacht zu einer stets sich wiederholenden Tätigkeit gezwungen, bis der Fabrikationsablauf durch Eingabe einer neuen Modellbewegung geändert wird.

Eine neue Ära wird dann beginnen, wenn AM darauf programmiert werden können, weitere AM selbst herzustellen. Dies wird zweifellos zu einer humanen Form der „Sklaverei“ führen.

Noch eine Zukunftsvision: Syntelmann auf dem Mond, von seinem Meister in der Steuerzentrale auf der Erde gesteuert. Der Maschinensklave agiert buchstäblich als ein „Doppelgänger“ des Meisters

