



KfK 2571
Januar 1978

Industrie-Roboter mit Sensoren und Objekterkennungs-Systemen

Ein Überblick

G. W. Köhler
Reaktorbetrieb und Technik/Ingenieur-Technik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Reaktorbetrieb und Technik / Ingenieur-Technik

KfK 2571

INDUSTRIE-ROBOTER

MIT SENSOREN UND OBJEKTERKENNUNGS-SYSTEMEN

EIN ÜBERBLICK

G.W. Köhler

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

Zusammenfassung

Es werden die bisherige Entwicklung und der erreichte Stand auf dem Gebiet der Industrie-Roboter mit Sensoren und Objekterkennungs-System dargelegt. Geräte dieser Art ermöglichen eine flexible Automatisierung an vielen Arbeitsplätzen, wo sich Industrie-Roboter der 1. Generation, die abgesehen von einer Verkettung mit anderen Maschinen nicht auf Veränderungen ihrer Umgebung selbständig reagieren können, aufgrund der herrschenden Randbedingungen nicht eignen. Eine eingeführte Klassifizierung erleichtert den Überblick in Anbetracht der bereits zahlreichen vorgestellten technischen Lösungen. Anhand von Beispielen werden die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten aufgezeigt. Infolge des derzeitigen Entwicklungsstandes der erforderlichen Komponenten besteht aus Wirtschaftlichkeitsgründen ein Trend zu speziellen Bauformen für einige bestimmte Zwecke und vereinfachten Objekterkennungs-Systemen mit eingeschränkten Anwendungsbereichen. Es wird eine zeitgemäße Definition, des in verschiedenem Zusammenhang gebrauchten Begriffes "Roboter" vorgeschlagen und angegeben, welche Fähigkeiten und Komponenten eine als "Roboter" zu bezeichnende Maschine mindestens besitzen sollte. Abschließend wird auf einige mögliche Entwicklungs-Richtungen zur Reduzierung des Aufwandes und Beschleunigung von Erkennungsvorgängen hingewiesen.

INDUSTRIAL ROBOTS

WITH SENSORS AND OBJECT RECOGNITION SYSTEMS

Abstract

The previous development and the present status of industrial robots equipped with sensors and object recognition systems are described. This type of equipment allows flexible automation of many work stations in which industrial robots of the first generation, which are unable to react to changes in their respective environments automatically, apart from their being linked to other machines, could not be used because of the prevailing boundary conditions. A classification system facilitates an overview of the large number of technical solutions now available. The manifold possibilities of application of this equipment are demonstrated by a number of examples. As a result of the present state of development of the components required, and in view also of economic reasons, there is a trend towards special designs for a small number of specific purposes and towards stripped-down object recognition systems with limited applications. A fitting description is offered of the term "robot", which is now being used in various contexts, and an indication is made of the capabilities and components a machine to be called robot should have as a minimum. Finally, reference is made to some potential lines of development serving to reduce expenditure and accelerate recognition processes.

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	Seite
1. <u>Einleitung</u>	1
2. <u>Industrie-Roboter mit Sensoren</u> (2. Generation)	3
2.1. Allgemeines	3
2.2. Tast- und Näherungssensoren	5
2.3. Kraft-Sensoren	7
2.4. Arme mit Sensoren verschiedener Art	11
2.5. Optische Sensoren	12
2.6. Optisch-taktiler Sensor-System	15
3. <u>Industrie-Roboter mit Objekterkennungssystem</u> (3. Generation)	16
3.1. Allgemeines	16
3.2. Hochentwickelte Objekterkennungssysteme	19
3.3. Objekterkennungssysteme mit mittleren Fähigkeiten	23
3.4. Einfache Objekterkennungssysteme	27
3.4.1. Mit optischem Sensor	27
3.4.2. Mit Näherungs-Sensoren	30
3.4.3. Mit Tast-Sensoren	31
4. <u>Welche Sensor-Art ist für Industrie-Roboter optimal?</u>	33
5. <u>Sonstige Roboter</u>	34
6. <u>Zusatzeinrichtungen mit Sensoren für Industrie- Roboter</u>	37
7. <u>Das allgemeine Schema eines Roboters</u>	39
8. <u>Abschließende Bemerkungen</u>	43
<u>Literatur-Hinweise</u>	45
<u>Tabelle: Industrie-Roboter und Experimental- Manipulatoren mit Objekterkennungssystemen</u>	46

VERZEICHNIS DER BILDER

- Bild 1: Industrie-Roboter "Unimate 2000" (1. Generation)
- Bild 2: Montage-Roboter "HI-T-Hand Expert 2"
- Bild 3: Blockschaltbild des "HI-T-Hand Expert 2"
- Bild 4: Montage-Roboter SIGMA/MTG
- Bild 5: Aufbau des Greifer-Gelenkes vom SIGMA/MTG
- Bild 6: Objekterkennung durch Analyse eines Linienbildes
- Bild 7: Objekterkennung durch Analyse eines Fleckenbildes
- Bild 8: System zur Montage von Kollektor-Bürsten und Bürsten-Haltern
- Bild 9: Roboter "Freddy"
- Bild 10: Industrie-Roboter mit Sichtsystem in den UDSSR
- Bild 11: Industrie-Roboter mit 2 Fernsehkameras
- Bild 12: Objekterkennungssystem mittlerer Fähigkeit von Mitsubishi
- Bild 13: Montage-Roboter "SIRCH"
- Bild 14: Objekterkennungssystem mittlerer Fähigkeit vom Stanford Research Institute (SRI)
- Bild 15: Beispiel eines Entscheidungsbaumes des Objekterkennungssystems vom SRI
- Bild 16: "Unimate 2000" mit einfachem Objekterkennungssystem vom SRI
- Bild 17: Prinzip eines inkohärent-optischen Korrelators
- Bild 18: Korrelator vom IITB zur Positionsbestimmung und Klassifikation kreisförmiger Muster
- Bild 19: Korrelator vom IITB verkettet mit Industrie-Roboter "Nachi 1000"
- Bild 20: Einfaches Objekterkennungssystem von IITB mit Fernsehkamera

- Bild 21: Industrie-Roboter mit einfachem Objekterkennungssystem vom IITB
- Bild 22: Vorpositionier- und Erkennungsgerät verkettet mit Industrie-Roboter PPI-PM 12 von IBP Pietzsch
- Bild 23: Industrie-Roboter "HI-T-Hand"
- Bild 24: Experimental-Roboter-Fahrzeug "Shakey"
- Bild 25: Funktions-Schema des "Shakey"
- Bild 26: Allgemeines Schema eines Roboters

1. Einleitung

Die allermeisten der bisher im Einsatz befindlichen Industrie-Roboter (Manipulatoren für die Produktion mit freiprogrammierbarer Steuerung) fahren bekanntlich die vorgegebenen Punkte nacheinander an oder Bahnen ab und besitzen abgesehen von einer Anzahl Ein- und Ausgängen zur Verknüpfung z.B. mit Werkzeugmaschinen keine Einrichtungen, um den Arbeitsablauf in einem bestimmten Rahmen unterschiedlichen auftretenden Situationen selbsttätig anpassen zu können. Um diesen Mangel zu beseitigen und weitere Anwendungs-Gebiete zu erschließen, wurden und werden weltweit, insbesondere in den USA und Japan, in den letzten Jahren auch in der BRD, erhebliche Anstrengungen unternommen, Industrie-Roboter mit Sensoren und Objekterkennungssystemen (2. bzw. 3. Generation) zu entwickeln.

Mit diesen ergänzenden Einrichtungen sollen vor allem Aufgaben gelöst werden wie:

- Kontrolle, ob Werkstück anwesend ist
- "Dosieren" von ausgeübten Kräften und Drehmomenten
- Hilfe beim Positionieren
- Bestimmung von Ort und Lage der Werkstücke
- Unterscheidung verschiedenartiger Werkstücke.

Eine Reihe von Industrie-Robotern mit speziell entwickelten Sensoren verschiedener Art ist bereits in der Produktion im Einsatz oder als Demonstrations-Geräte zu bewerten, während sich andere und Geräte mit Objekterkennungssystemen noch im Prototyp- oder Experimentier-Stadium befinden.

So wie der Mensch in der Regel am Arbeitsplatz außer der manuellen Tätigkeit auch Kontroll- und ggf. Korrekturfunktionen ausübt, sind bei mit Industrie-Robotern ausgerüsteten Fertigungsanlagen zur Gewährleistung einer möglichst hohen Verfügbarkeit und gleichbleibenden Qualität außerdem Sensoren und automatische Einrichtungen wünschenswert, z.B. für:

- Überwachung des Arbeitsablaufes, wesentlicher Maschinen-Zustände und der Werkzeuge sowie Detektion und Anzeige von Fehlerstellen
- Qualitätskontrolle der Werkstücke
- Behebung bzw. Ausgleich geringfügiger Mängel.

Auf derartige zusätzliche Einrichtungen soll in diesem Rahmen jedoch nicht näher eingegangen werden. Objekterkennungssysteme bieten sich aber auch für Sichtkontrollen an.

2. Industrie-Roboter mit Sensoren (2. Generation)

2.1. Allgemeines

Nach ihrer Funktionsweise kann man die bisher speziell für Industrie-Roboter entwickelten Sensoren grob in drei Kategorien einteilen:

- Tast- und Näherungs-Sensoren
- Kraft- und Drehmoment-Messer
- Optische Sensoren.

Diese Sensoren haben die Aufgabe Meßgrößen am Manipulator bzw. aus der Umgebung aufzunehmen und der Programm-Steuerung zuzuführen, die aufgrund dieser Informationen Entscheidungen trifft bzw. Korrekturen vornimmt.

Außer den oben angeführten Kategorien wäre es auch möglich, wenn Zustände mit der Erzeugung spezifischer Geräusche verbunden sind, diese aufzunehmen und mit analysierenden Methoden Steuersignale zu gewinnen.

Sonst in der Technik übliche Sensoren werden bei Industrie-Robotern ebenfalls verwendet (wie Endschalter und Lichtschranken) oder kommen zum Teil in Frage.

Die Häufigkeit der Sensor-Signale an die Programm-Steuerung ist je nach Aufgabe sehr unterschiedlich, je nachdem, ob z.B. ein Programm-Wechsel veranlaßt, die Greifkraft begrenzt oder die Drehmomente sämtlicher Arm-Antriebe geregelt werden.

Von der Anordnung her kann man in den Manipulator eingebaute Sensoren von solchen, die an anderer Stelle angebracht oder in einem peripheren Gerät installiert sind, unterscheiden.

Während bei den letzteren meist ein hochentwickelter Industrie-Roboter der 1. Generation durch Sensoren in seinen Fähigkeiten erweitert wird, trifft man bei den ersteren in der Regel speziell entwickelte kinematische Systeme an.

Da sich die Entwicklung erst am Anfang befindet, haben sich noch nicht bestimmte Bauweisen für Industrie-Roboter der 2. Generation und ihre Sensoren als üblich herausgebildet. Bemerkenswert ist, daß es sich überwiegend auf spezielle Anwendungsfälle zugeschnittene Lösungen handelt. Dies ist, wenn die Sensoren Zusatz-Einrichtungen sind oder sich in leicht austauschbaren Komponenten befinden, wohl kaum ein Nachteil, jedoch wo dies zu Sondergeräten führt eine Abkehr vom Prinzip eines vielseitig einsetzbaren Gerätes!

Von herausragender Bedeutung ist das weite bisher so gut wie noch nicht für Industrie-Roboter erschlossene Gebiet der Montage. Es hat sich gezeigt, daß man für das meist erforderliche genaue Positionieren, Ausrichten und Bewegen von Teilen zueinander zusätzlich mit Sensoren arbeitende Einrichtungen benötigt, sowie Kraft- bzw. Drehmoment-Rückmeldungen oder -Begrenzungen, um zu verhindern, daß Werkstücke bei eventuell nicht reibungslosem Arbeitsablauf beschädigt werden. Die Arbeitsweise eines derartigen voll ausgebildeten Gerätes der 2. Generation ist - im Gegensatz zu denen der 1. Generation, die ja über keine "Sinnes"-Funktionen verfügen - etwa mit der eines Blinden zu vergleichen.

An Hand ausgeführter Beispiele werden im folgenden Hauptmerkmale und Anwendungsmöglichkeiten von Sensoren aufgezeigt:

2.2. Tast- und Näherungssensoren

Bei der Firma General Motors in Lordstown, USA, werden auf einer Schweißstraße, die mit 22 Industrie-Robotern des bekannten Typs Unimate 2000 (Bild 1), der Firma Unimation Inc., USA, ausgerüstet ist, drei Karosserietypen hergestellt. Vor der ersten Station wird mit Endschaltern abgefragt, welcher Typ sich auf dem Fördermittel befindet. Die Signale werden der zentralen Steuerung zur Programm-Auswahl zugeleitet.

Bei der Firma VW werden ebenfalls, um die entsprechenden Programme auszuwählen, auf einer mit dem Typ "Robby", von VW, bestückten Straße die Karosserien durch einen biegsamen Berührungssensor abgetastet.

Für Gesenkschmieden gibt es für den Typ "Unimate" einen Greifer mit einem Tast-Sensor zur Kontrolle der Werkstück-Anwesenheit.

Zum Aufstapeln und Abheben von Werkstücken in bzw. aus Magazinen wurde bei der Firma Daimler-Benz ein Industrie-Roboter am Arm mit einem induktiven Näherungs-Sensor versehen, um die Hubbewegung zu begrenzen und der jeweiligen Höhe des Werkstückes anzupassen.

Ein schon etwas anspruchsvolleres Problem ist das ausreichend genaue Positionieren eines Schweißgerätes an Blechteilen mit unterschiedlichem Verzug. Bei einem in den USA praktizierten Verfahren wird durch Abtasten der Kontur ein Stück vor dem Lichtbogen die tatsächliche Lage der auszuführenden Schweißnaht (Istwerte) ermittelt, gespeichert, mit den programmierten Sollwerten verglichen und die Abweichungen so korregiert, daß der Brenner nach Zurücklegen der Vorlaufstrecke des Tasters jeweils an der richtigen Stelle des Werkstückes positioniert wird.

Ein ähnliches System gibt es für den Industrie-Roboter "KUKA-NACHI 4500".

Für das Auftragen von z.B. Silikon-Dichtungsmaterial in Bahnen auf Teilen mittlerer Größe und Kompliziertheit wurde von der Firma Robotics, Inc. in Ballston Lake, N.Y., USA, u.a. eine Methode realisiert, bei der die Form des Teiles mit mechanischen Nocken, die auf Potentiometer wirken, abgetastet wird. Die Signale werden als Korrektur-Werte bzw. Zusatz-Befehle der mit einem Rechner ausgerüsteten Bahnsteuerung zugeführt (siehe weiter Abschnitt 2.5).

Werden einem Industrie-Roboter Teile z.B. auf einem Förderband oder Paletten zugeführt, so ist ihre Übernahme-Position nicht genau festgelegt, wie z.B. bei einem Magazin, sondern schwankt in einem bestimmten Bereich. Um unter diesen Bedingungen ein Teil aufnehmen zu können, sind zusätzliche Einrichtungen für eine adaptive Positionierung des Greifers erforderlich. Das Automation Research Laboratory der Universität Kyoto in Japan hat einen 3-Backen-Greifer für stehende zylindrische Teile entwickelt, der an den Spitzen je einen Näherungsfühler besitzt, aus dem ein Luftstrahl austritt. Der Greifer wird zum Fassen nach unten bewegt und stoppt in geringem Abstand über einem Objekt, wenn mindestens einer der Fühler "Berührung" meldet. Dann bewegt sich die Achse des Greifers auf die Achse des zylindrischen Objektes zu, wobei die erforderliche Richtung aus den Sensor-Signalen ermittelt wird. Gleichzeitig öffnen sich die Backen stufenweise bis gerade keiner der Luftstrahlen mehr das Objekt trifft. Damit ist die Position sowie die erforderliche Weite erreicht und das Teil kann gegriffen werden.

Ein anderer für die Beschickung von Glühöfen ebenfalls in Japan entwickelter Greifer besitzt in den Innenflächen der Backen zwei Mikroschalter. Diese geben bei Brührung Signale, die zur Korrektur der Greifer-Position verwendet werden.

Bei einem vom Stanford Research Institute in USA entwickelten Verfahren werden zum Einsetzen von Schrauben die Lagen der Gewindebohrungen abgetastet.

2.3. Kraft-Sensoren

Vom IBM Watson Research Center in USA wurde für die Montage kleiner Teile ein Gerät mit einer Zange gebaut, bei der beide Backen Dehnungsmeßstreifen zur Greifkraft-Kontrolle besitzen. Außerdem ist ein Berührungssensor vorhanden, um die Werkstück-Anwesenheit überwachen zu können.

Ebenfalls zur Messung der Greifkräfte hat man an der Waseda-Universität in Tokio Kraftsensoren in die Gelenke eines Greifers eingebaut.

An der Nagya Universität in Japan wurden mehrere Möglichkeiten für eine adaptive Greifkraft-Regelung zur Handhabung empfindlicher Gegenstände untersucht. Bei einer Methode sind im Greifer ein Druck- und ein Gleitsensor angebracht. Die Stromstärke des Greiferantriebes wird stufenweise soweit erhöht, bis das Gleitsignal verschwindet und damit die Kraft auf die zum Halten des jeweiligen Objektes erforderliche Höhe angewachsen ist. Als Gleitsensoren wurden ein oszillierender Stift oder eine Gummirolle verwendet. Eine spätere Ausführung besitzt je 9 Drucksensoren pro Greiferbacke in einer elastischen Substanz eingebettet. Bei dieser Bauweise, die sich von den drei am brauchbarsten erwies, wird das Gleiten während des Zugreifens durch Änderung der Druckverteilung festgestellt. Nach einer anderen Methode mißt ein Dehnungsmeßstreifen am Arm dessen Verbiegung, woraus das Gewicht des gegriffenen Gegenstandes ermittelt wird.

Von der Firma M.A.N., Neue Technologie in München wurde ein adaptives Greifsystem

entwickelt, das als Basis auch das Wägungs-Prinzip verwendet. In einer der beiden Greifbacken sind als Meßgrößenaufnehmer Feder-Potentiometer für das Gewicht des Objektes und die ausgeübte Greifkraft eingebaut. Beide Werte werden einem Regler zugeführt, der nach einem Vergleich die Stellgröße für einen elektrischen Schrittmotor liefert. Um überhöhte Greifkräfte zu vermeiden ist außerdem ein Gleitsensor auf einer Backe vorhanden, der mit dem Gegenstand mechanisch oder magnetisch in Kontakt ist und die Bestimmung des Reibungskoeffizienten ermöglicht.

In den meisten Fällen dürften jedoch das Gewicht und der Reibwert bekannt oder zu ermitteln sein, so daß eine Kraft-Vorwahl ausreicht.

Montage-Vorgänge erfordern oft eine besonders hohe Positioniergenauigkeit. Es ist wenig sinnvoll, dies durch extrem genaues Steuern und hohe Präzision in der Bauweise erreichen zu wollen. Eine beispielhafte Lösung stellen die Geräte der HI-T-Hand-Expert-Serie der japanischen Firma Hitachi dar (Bild 2 und 3), bei denen das Fügen, z.B. ein Bolzen von ca. 25 mm \emptyset in eine Bohrung mit einem Spiel von nur 20 μm , ähnlich abläuft wie bei einem Arbeiter. Das kinematische System ist spezieller Bauart und besitzt (beim Haupt-Roboter) drei Freiheitsgrade außer der Greifbewegung. Der Greifer ist an gekreuzten mit Dehnungsmeßstreifen versehenen Blattfedern aufgehängt, so daß abhängig von der Belastung Positions-Abweichungen in Richtung der drei Koordinaten-Achsen gemessen werden können. Zu Beginn der Fügeoperation wird der Bolzen gegen das Teil mit der Bohrung gedrückt und erfährt dabei infolge des Versatzes und der elastischen Greifer-Aufhängung eine Verkantung. In der darauf folgenden Suchphase wird der Bolzen in der X-Y-Ebene in Richtung der Bohrungs-Achse bewegt und bei Erreichen der Bohrungs-Position durch die Federn ein

kleines Stück in die Bohrung geschoben. Der Bolzen bleibt jedoch gegenüber der Längsachse der Bohrung noch geringfügig verkantet. Beim Fügen in Z-Richtung wird die Achsen-Richtung des Bolzens aufgrund der Positions-Abweichungs-Signale in den X- und Y-Richtungen durch sehr kleine überlagerte Querbewegungen korrigiert und die Kraft in Z-Richtung begrenzt, um ein Verklemmen zu verhindern. Der Roboter führte Fügeoperationen der erwähnten Art schneller und geschickter als als Personal. Ein Rechner ist nicht vorhanden.

Vom Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart wurden ausgedehnte Versuche mit für kleine rotationssymmetrische Werkstücke geeigneten einfachen Füge-
maschinen durchgeführt, die eine festverdrahtete Steuerung besitzen. Sie weisen ebenfalls drei Freiheitsgrade auf. Zur Steuerung des Fügevorganges wird der Kippwinkel herangezogen und die Fügekraft gemessen. Die nötigen Korrektur-Bewegungen werden bei der neueren Ausführung mit einem Kreuztisch ausgeführt.

Eine wesentlich höher entwickelte Lösung stellt der Industrieroboter "SIGMA/MTG" (Bild 4) der italienischen Firma Olivetti dar, der z.B. für die Montage von Schreibmaschinen-Komponenten bereits an 12 verschiedenen Arbeitsplätzen eingesetzt wird. Gegenüber dem Typ HI-T-Hand-Expert besitzt dieser zwei unabhängige "Arme" und einen Rechner. Zum Programmieren dient die anwendungsorientierte Sprache SIGLA. Ein kinematisches System hat ebenfalls drei Freiheitsgrade und einen senkrechten Greifer, der in den X-, Y- und Z-Richtungen in der Handwurzel elastisch gelagert ist (Bild 5). Die Verschiebungen werden mit Wegaufnehmern gemessen. Die Wege sind ein Maß für die ausgeübten Kräfte. In vielen Fällen dienen die Sensoren jedoch dazu, Positionen und Abweichungen davon zu ermitteln. Die Arbeitsgeschwindigkeit ist zwei- bis dreimal so schnell wie bei einem Arbeiter.

Es ist anzunehmen, daß sich für das Montieren kleiner Teile eine spezielle Bauform nach Art der oben geschilderten Geräte durchsetzen wird.

Das Problem, einen Bolzen in eine Bohrung zu fügen, wurde vom Charles Stark Draper Laboratory in Cambridge, Mass., USA, mit einem Industrie-Roboter vom Typ Unimate 2000 (Bild 1), ausgerüstet mit einem Rechner PDP-11 und ergänzt durch einen Meßtisch, gelöst. Auf dem Tisch, der eine Kraft- und Drehmoment-Meßeinrichtung mit acht Dehnungsmeßstreifen besitzt, befindet sich das Teil mit der Bohrung. Als Verbesserung wird der Arm des Industrie-Roboters mit einer entsprechenden Meßeinheit ausgestattet. Damit ist für mittlere Teile ein vielseitig einsetzbares Gerät mit Kraft- und Momenten-Kontrolle geschaffen unter Verwendung vieler bereits bewährter Komponenten! Als Vorstufe wurde von obiger Institution zusammen mit dem Massachusetts Institute of Technology in USA eine Sensor-Anordnung entwickelt und getestet, die eine Kräfte- und Momenten-Messung für alle sechs Freiheitsgrade gestattet. Sie ist zwischen der Greifzange und dem Handgelenk angeordnet und besteht aus acht Elementen. Die Zange ist an vier kreuzförmig angeordneten mit je vier Silikon-Dehnungsmeßelementen am Umfang versehenen Federstäben in einem Ring gelagert. Die Stäbe sind entweder in Buchsen verschiebbar oder in federnden kleinen Scheiben befestigt. Der Ring ist mit dem Handgelenk verbunden. Verwendet wurde für diese Versuche, in deren Verlauf zuerst zahlreiche Steuer-Methoden (Fernbedienung nach verschiedenen Verfahren, halbautomatischer rechnergestützter Betrieb und Arbeiten nach Programmen) untersucht und verglichen wurden, der Slave-Arm eines elektrischen Master-Slave-Manipulators vom Typ ANL E2.

Vom IPA wurde ebenfalls eine Sensor-Anordnung für sechs Freiheitsgrade entwickelt, die mit Dehnungsmeßstreifen arbeitet und am Arm eines Industrie-Roboters angebracht werden kann. Die Signale werden mit einem Klein-Rechner verarbeitet. Mit Hilfe dieses Systems können Aufgaben wie z.B. Entgraten oder Gußputzen auch in Klein- und Mittelserien automatisiert werden.

2.4. Arme mit Sensoren verschiedener Art

Vom Electrotechnical Laboratory in Tokio und der Mitsubishi-Electric Corp. in Amagasaki, Japan, wurde ein Arm bemerkenswerter Bauweise entwickelt, der für jeden der sieben Freiheitsgrade außer Positions- und Geschwindigkeits-Gebern eine Regelung des Drehmomentes und der Steifigkeit besitzt. Er verfügt über eine 3-Finger-Zange mit zwei Freiheitsgraden und einen Rechner. Die Position wird dadurch geregelt, daß jede Antriebseinheit ein Moment aufbringt, das gerade so groß ist, daß der Fehler der tatsächlichen Position gegenüber der festgelegten eliminiert werden kann. Die Antriebseinheiten sind in einem Gehäuse oberhalb der Bewegung Schulter-Drehen angeordnet und die Kraftübertragungen zu den einzelnen Gliedern erfolgen im Arm durch Drahtseile. Mit den beiden letztgenannten Eigenschaften ist das Gerät elektrischen Master-Slave-Manipulatoren ähnlich. Pro Arm-Bewegung sind jedoch zwei getrennte Antriebseinheiten vorhanden, die je einen Elektromotor mit Getriebe sowie eine magnetische Kupplung und Bremse mit kontinuierlich veränderbarem Moment besitzen und die auf je eines der beiden Seiltrume arbeiten. Hierdurch läßt sich die Vorspannung aller Drahtseile im Arm unabhängig variieren. Mit diesem Gerät können Arbeiten wie z.B. Einschlagen eines Nagels mit einem Hammer, Trommeln, Schieben eines Objektes über einen Tisch oder Drehen einer Kurbel ausgeführt werden. Durch den 7. Freiheitsgrad werden u.a. sehr "fließende" Bewegungen erreicht.

Das Mechanical Engineering Laboratory und die Waseda Universität in Tokio haben einen "MELARM" genannten Manipulator entwickelt mit zwei Armen in anthropomorpher Bauweise, die koordiniert arbeiten können und mit einem Klein-Rechner versehen sind. Jeder Arm hat sieben Freiheitsgrade und einen Greifer. Für jede Bewegung ist ein Kraft-Sensor vorhanden und der Greifer besitzt viele Berührungs- und Druck-Sensoren. Es ist auch die Steuerung von Hand mit Master-Armen oder Bedienungshebeln möglich.

2.5. Optische Sensoren

Mit optischen Sensoren, wie Lichtempfängern (z.T. mit Lichtquelle) und Fernsehkameras, lassen sich recht verschiedenartige Aufgaben lösen.

Zum Palettieren von Kartons mit Flaschen wurde von der Firma RETAB, Lidingsö in Schweden, für den Industrie-Roboter IRC-30 ein System realisiert, das aus einem Hubtisch, einem Spezial-Greifer, der Klein-Rechner-Steuerung RC-7000 und einer Meßeinrichtung besteht. Die Palette, auf der die Kartons gestapelt werden, steht auf dem Tisch, der nach jeder Schicht ein Stück absenkt und dessen Höhe auch mit vom Rechner des Industrie-Roboters gesteuert wird. Die Meßeinrichtung besteht aus einer Lichtquelle (Laser) und einem Empfänger auf der gegenüberliegenden Seite des Tisches. Die Abwärts-Bewegung des Tisches wird gestoppt, sobald der Lichtstrahl den Empfänger trifft. Die Positioniergenauigkeit beträgt $+0, -1,5$ mm und liegt damit im Rahmen von der hochentwickelter Industrie-Roboter der 1. Generation.

Die GTE Laboratories in USA (GTE: General Telephone and Electronics Corp.) haben ein System zur Werkstück-Übergabe an ein bewegtes Fördermittel gebaut, das bereits seit zwei Jahren in Betrieb ist. Es besteht im wesentlichen aus einem Industrie-Roboter "Versatran" und einem Klein-Rechner PDP-11. Es werden Bildröhren von einem getakteten Band genommen und an einen Hängeförderer übergeben. Die Lage der mit einem reflektierenden Klebeband versehenen Werkstückträger am Hängeförderer wird folgendermaßen bestimmt: Eine Lichtquelle sendet Impulse aus, die, wenn sie von einem Werkstückträger reflektiert werden, ein Photodetektor empfängt. Der Industrie-Roboter ist fahrbar. Der Rechner ermittelt den Ort der Übergabe und die Geschwindigkeit dabei. Die Programmierung erfolgt durch die speziell entwickelte Sprache ALFA.

Von der Nagoya Universität in Japan wurde eine Einrichtung z.B. zur Führung der Elektrode eines Schweiß-Roboters entlang einer gewölbten Platte geschaffen, um eine höhere Genauigkeit als mit einem mechanischen Taster zu erzielen: Gebündelte Lichtimpulse (Xenon-Blitzlichtlampe oder für hohe Genauigkeit He-Ne-Gas-Laser) werden auf einen synchronisiert mit der Frequenz der Quelle rotierenden Spiegel mit im Dreieck angeordneten Flächen geworfen, die kurzzeitig einen Punkt der Platten-Oberfläche beleuchten. Reflektiertes Licht wird von einem im Abstand (Meßbasis) z.B. unterhalb des Spiegels befindlichen Empfänger (Photo-Transistor) mit bestimmter Richtung erfaßt. Die Entfernungsermittlung erfolgt durch Laufzeit-Messung.

Ebenfalls machten die GTE Laboratories Experimente mit einem "Video-Target Locator" genannten Gerät, das mit einer Fernsehkamera arbeitet. Es kann die Anwesenheit von Objekten feststellen, die mit einer Reihe von 5 bis 10 Paaren von abwechselnd schwarzen und weißen Quadraten versehen sind sowie deren vertikale Position und Entfernung bestimmen. In der Praxis dürfte es allerdings zu umständlich bzw. z.T. kaum möglich sein, Werkstücke derartig zu markieren.

Das Tokyo Institute of Technology hat ein System mit zwei Fernsehkameras zum Feststellen, ob ein Objekt vorhanden ist und zur Entfernungs-Messung entwickelt.

Vom Nagoya Municipal Industrial Research Institute in Japan stammt ein Sensor zur Farben-Unterscheidung. Er besteht aus drei SnO_2/Si -Photodioden, die mit roten, grünen bzw. blauen Filter-Schichten überzogen sind.

An der Universität von Surrey in Groß-Britannien wurde ein Arm mit vier Freiheitsgraden entwickelt, der durch einen Suchkopf gesteuert wird. Am Handgelenk befinden sich je zwei Photodioden für die Koordinaten X und Y. Das Bild eines Objektes, das gegenüber dem Untergrund entweder hell oder dunkel sein muß, erscheint auf den Photodioden als Fleck. Die Dioden liefern den Ablagen vom Zentrum entsprechende Signale an einen Mikroprozessor. Der Arm wird so gesteuert, daß die Signale zu Null werden, und die Lichtintensität wird zur Steuerung der Annäherung (Z-Koordinate) verwendet. Es können auch bewegte Objekte verfolgt werden.

Die Firma Robotics in USA hat zum Auftragen von Material in Bahnen (vgl. Abschnitt 2.2) auch ein Kopierverfahren mit einem optischen Linien-Verfolgungssystem herausgebracht, für Fälle, bei denen sich die Bahnen-Form häufig ändert. Ein Kopf mit einer photoelektrischen Zelle tastet die Form auf einer Zeichnung ab und gibt ihre Signale an die mit einem Rechner ausgerüstete Bahnsteuerung des Industrie-Roboters.

2.6. Optisch-taktiler Sensor-System

Die japanische Firma Yasukawa in Tokio hat zum Lichtbogen-schweißen den Industrie-Roboter "Motoman" mit Klein-Rechner und einer kombinierten Sensor-Einrichtung zum Positionieren u.a. realisiert. Es werden z.B. an Rohre geheftete Flansche mit diesem Gerät fertiggeschweißt. Die Werkstücke werden mit Wagen antransportiert und mit Hilfe einer Fernsehkamera, die sich seitlich am Industrie-Roboter befindet, grob positioniert. Am Greifer ist ein Berührungss-Sensor installiert. Durch Anfahren des Flansches an mehreren Punkten wird die genaue Lage, Richtung und Größe des Flansches festgestellt. Dann wird das Schweißgerät mit Hilfe der Fernsehkamera an der zu schweißenden Naht positioniert.

3. Industrie-Roboter mit Objekterkennungssystem (3. Generation)

3.1. Allgemeines

In der zweiten Hälfte der sechziger Jahre begann man mit der Entwicklung von "Hand-Auge"-Systemen, die den vielfach gewünschten automatischen "Griff in die Kiste" ermöglichen sollten, d.h. bei Anlieferung von Werkstücken in ungeordnetem Zustand oder mit nicht exakt definierter Position und Lage Beschaffung der fehlenden Informationen, um das Fertigungssystem in ein solches zu überführen, bei dem wieder alle Parameter bekannt sind.

Diese Probleme verlangen nach Lösungen, deren Flexibilität denen von Industrie-Robotern äquivalent ist, weil herkömmliche mechanische Ordnungseinrichtungen nur in geringem Maße anpassungsfähig sind. Da einfache Ordnungsaufgaben, bei denen Werkstücke nur in einem Freiheitsgrad geordnet werden müssen, sehr selten sind, lassen sich flexible Ordnungseinrichtungen nur mit komplexen Komponenten realisieren. Ein erfolgversprechender Weg sind Objekterkennungssysteme.

Bei derartigen hochentwickelten Geräten wird die vor dem Arm befindliche Szene mit einer Fernsehkamera punktuell abgetastet, die erhaltenen Signale in einem oder mehreren Digital-Rechnern verarbeitet, die gewonnenen Informationen mit gespeicherten verglichen und schließlich, abgesehen von der Ermittlung der Position, entschieden um welchen Typ der "bekannten" Werkstücke es sich handelt, und in welcher Lage er sich befindet. Die Fähigkeit, eine Szene zu analysieren und Objekte darin zu erkennen, wurde auch als "künstliche Intelligenz" bezeichnet.

Pionier-Arbeit leisteten u.a. zwei Institutionen in den USA. Dabei wurde das Problem grundsätzlich gelöst. Es zeigte sich jedoch, daß zur Anwendung in der Produktion die Kosten für die Rechenanlagen viel zu hoch und durch den Verarbeitungsumfang bedingt die Geschwindigkeit des Erkennungsvorganges viel zu gering waren. In vielen Fällen ist eine Verarbeitungszeit von nicht mehr als 0,1s erforderlich.

Am Stanford Research Institute ging man noch einen entscheidenden Schritt weiter. Im Rahmen eines Forschungsprogrammes wurden Experimental-Geräte, es handelte sich hierbei wegen der besseren Eignung für das Vorhaben um Fahrzeuge, entwickelt, die nicht nur die Eigenschaft besaßen, auf Befehle in sehr allgemeiner Form selbständig zu handeln, sondern auch ihre Umgebung zu erkunden und damit ein gewisses Maß an Lernfähigkeit aufwiesen (siehe weiter Abschnitt 5). Auf Handhabungsgeräte übertragen, würde dies zu Industrie-Robotern der 4. Generation führen, die in der Lage sind, selbständig ihre Arbeitsweise zu optimieren und bei Veränderungen zu adaptieren. Da bei der Produktion die Umgebung künstlich und damit bekannt ist, der Arbeitsablauf aus Rationalisierungsgründen detailliert geplant wird, und die Eigenschaften z.B. der zu handhabenden Objekte gespeichert werden können, besteht von daher gesehen auf diesem Gebiet wohl kaum ein Bedürfnis nach so weitgehenden Fähigkeiten, von den Kosten einmal abgesehen. Andererseits könnten in einer automatischen Fertigungsanlage Geräte, die nicht nur Störungen erkennen, sondern selbständig in der Lage sind, diese bis zu einem gewissen Grade zu überbrücken, Ausfallzeiten verringern. Für die Erkundung des Mondes mit unbemannten Geräten wären wegen des Zeitverzuges bei der Signal-Übertragung autonome Geräte sehr vorteilhaft und für Missionen auf entfernteren Himmelskörpern praktisch unerlässlich.

Bei der an die ersten amerikanischen Geräte anschließenden Entwicklung gelang stufenweise eine entscheidende Reduktion der zu verarbeitenden Datenmengen, und man orientierte sich mehr und mehr an praktischen Aufgabenstellungen. Der Weg führte dabei über Geräte mit bereits deutlich eingeschränkten Fähigkeiten, bei denen man sich z.B. mit dem "Griff auf den Tisch" nach bereits vereinzelt Teilen begnügte, bis hin zu solchen mit einem einfachen Erkennungssystem, die nur einen sehr begrenzten Anwendungsbereich aufweisen oder spezielle Lösungen darstellen. Anstelle von Fernsehkameras werden teilweise Foto-Diodenarrays, optische Korrelatoren sowie Anordnungen mit einer Anzahl von Näherungs- und Tastsensoren verwendet. Die Grenze zwischen einfachen Erkennungssystemen und höher entwickelten Sensoren (vgl. z.B. Abschn. 2.6) ist daher nicht scharf ausgeprägt.

Das Erkennen von Werkstücken hängt, abgesehen vom erforderlichen Kontrast gegenüber der Umgebung bei Verwendung optischer Verfahren, ausschließlich von der Unterscheidbarkeit ab. Die Anbringung eines funktionell nicht benötigten Merkmales, z.B. eines Loches, kann die Erkennung ggf. wesentlich erleichtern oder u.U. erst ermöglichen. Das bedeutet, daß es vorteilhaft sein kann, bereits bei der Konstruktion eines Produktes die Verwendung eines bestimmten Objekterkennungssystems zu berücksichtigen.

3.2. Hochentwickelte Objekterkennungs-Systeme

Bei Systemen dieser Klasse, mit denen die Entwicklung begann, wird mit Hilfe spezieller Rechner-Programme die durch eine Fernsehkamera aufgenommene Szene analysiert, um die für die weiteren Aktionen erforderlichen Informationen zu gewinnen. Die verschiedenen Geräte weisen natürlich erhebliche Unterschiede auf. Nach einer Vorverarbeitung wird meist ein Linienbild oder ein Fleckenbild analysiert.

Bei dem Erkennungssystem des Roboter-Fahrzeuges "Shakey" (Bild 24), das vom Stanford Research Institute in den USA entwickelt wurde und das als Beispiel dienen möge, sind beide Methoden realisiert worden. Das System kann einfache Objekte, wie Quader und Keile in beliebiger Lage erkennen, auch wenn ein kleiner Teil des Objektes verdeckt oder nicht im Bild ist.

Die Objekterkennung durch Analyse eines Linienbildes (Bild 6) läuft im wesentlichen folgendermaßen ab: Zuerst wird im Rahmen einer Vorverarbeitung aus dem aufgenommenen Bild mit einem Analog/Digital-Wandler ein Bild produziert, das aus 120x120 Bildzellen mit 16 verschiedenen hellen Graustufen besteht. Anschließend erfolgt eine weitere Reduzierung zu einem Helligkeitsgradienten-(Linien-)Bild.

Das eigentliche Objekterkennungs-Programm arbeitet auf zwei Ebenen: Ein Szenen-Analyse-Programm, das als Entscheidungsbaum aufgebaut ist, erforscht die Bild-Szene durch Tests mit Hilfe einer Anzahl von Unterprogrammen. Es stellt zunächst eine Hypothese recht allgemeiner Art über den Inhalt des Bildes auf, die im Verlauf der Analyse immer präziser wird. Das Ergebnis jedes Testes wird gegenüber den Ergebnissen vorhergehender Tests und den gespeicherten Informationen

abgeschätzt und der Grad der Wahrscheinlichkeit mit Zahlen von 0 bis 100 bewertet. Danach wird entschieden, welche Art von Test als nächster und wo dieser im Bild durchgeführt werden soll. Als Sicherung gegen falsche Entscheidungen werden in jeder Phase mehrere alternative Pfade bis zu verschiedener Tiefe durchlaufen und die weiteren Etappen der Erforschung gehen jeweils von der wahrscheinlichsten Hypothese aus. Liegen genügend Test-Ergebnisse vor, wird entschieden, um welchen Objekt-Typ es sich handelt. Dieser Prozess wird ggf. so oft wiederholt, bis keine Objekte mehr in der Szene gefunden werden können.

Die meisten dem Analyse-Programm zur Verfügung stehenden Unterprogramme führen eine Art Schablonen-Vergleich durch, der aus der Berechnung des durchschnittlichen Helligkeits-Gradienten zwischen zwei spezifizierten Bildpunkten besteht, um die Wahrscheinlichkeit einer Geraden zwischen den beiden Punkten zu bestimmen. Es sind Unterprogramme vorhanden zum Auffinden von Linien, Abzweigungen und Endpunkten von Linien auf dem Boden, zur Winkel-Messung, Ermittlung der Position eines Objektes u.a.m.

Bei dem für das Roboter-Fahrzeug "Shakey" etwas später entwickelten Verfahren, das ein Fleckenbild analysiert (Bild 7), wird zunächst ebenfalls ein Bild bestehend aus 120x120 Bildzellen mit 16 verschiedenen hellen Graustufen hergestellt. Dann werden Flecken konstanter Intensität aus dem Bild herausgesucht und mit kurzen senkrechten und waagerechten Linien ungeschrieben bzw. verbunden. Das Analyse-Programm wendet mehrere heuristisch arbeitende Unterprogramme an, die die Flecken z.T. mit senkrechten und waagerechten Linien zu größeren Gebieten vereinigen oder eliminieren. Es werden Umriß-Linien festgelegt, ein Objekt aus der Szene herausgeschält und schließlich identifiziert.

Aufgrund der mit diesen Systemen gemachten Erfahrungen ist man der Auffassung, daß Farbfernsehen gegenüber anderen Möglichkeiten wie z.B. Stereo-Fernsehen die größte Verbesserung der Sehfähigkeit verspricht.

Ähnliche Objekterkennungs-Systeme wie das vom Stanford Research Institute entwickelten mit einem Manipulator versehen die Stanford University und das Massachusetts Institute of Technology (siehe Tabelle Nr. 16 u. 17). Später kombinierte das Stanford Research Institute ein verbessertes System, das beliebige Formen erkennen kann, mit einem Industrie-Roboter "Unimate 2000" (Bild 1, Tab. Nr. 15). Bei Geräten mit einem Erkennungssystem muß dieses zusätzlich programmiert werden. Um diesen Vorgang gegenüber anderen Verfahren, z.B. Eingabe über einen Befehlsfernreiber, entscheidend zu beschleunigen, besitzt eine frühe japanische Entwicklung, der Typ HIVIP M:K1 der Firma Hitachi (Tab. Nr. 9), eine zweite Fernseh-Kamera, mit der in einer Zeichnung drei Ansichten eines Objektes abgetastet werden können. Der Rechner verarbeitet diese Informationen zur Erkennung der drei-dimensionalen Form.

Ebenfalls von der Firma Hitachi wurde ein Gerät entwickelt, das Teile stapeln kann, die auf einem Band mit Geschwindigkeiten bis zu 1 m/s gefördert werden. Es führt das Stapeln und Orientieren aus, während die Teile in Bewegung sind. Das System kann 32 Muster erkennen. Die Dauer für die Handhabung eines Teiles beträgt 16 s. Wenn schnelle Antriebe verwendet werden, soll eine Verkürzung bis auf 1 s möglich sein (Tab. Nr. 8).

Vom Electrotechnical Laboratory in Tokio wurde ein System gebaut, das zwar recht langsam ist, aber über eine ständige optische Kontrolle der Arbeitsvorgänge verfügt (Tab. Nr. 12).

Die japanische Firma Mitsubishi stellte ein System vor, bei dem ein von Schrittmotoren angetriebener Arm Kollektor-Bürsten und Bürsten-Halter in einer einfachen Montage-Maschine positioniert (Bild 8). Eine in die Handwurzel eingebaute Fernseh-Kamera kann im Konturbild gradlinig begrenzte Objekte erkennen. Dazu gehört ferner ein Hilfs-Arm, der die Bürsten auf einer Zuführ-Schiene bewegt. Ein Klein-Rechner steuert das komplette System. Die Arbeiten dauern jedoch noch ca. 12-mal länger als beim manueller Ausführung (Tab. Nr. 6).

An der Universität von Edinburgh in Großbritannien wurde das Gerät "Freddy" (Bild 9) realisiert, das zwei große Backen, zwei Fernseh-Kameras und einen beweglichen Tisch besitzt. Es kann ca. 10 beliebige Teile identifizieren, sie aus einem Haufen beliebiger Teile greifen und sie zu einfachen Baugruppen montieren (Tab. Nr. 4)

Außerdem entwickelte man an der Universität Edinburgh ein optisches Abtastsystem, das ohne "Vorkenntnisse" die Form drei-dimensionaler Objekte erfaßt. Durch Korrelation zweier stereoskopischer Fernseh-Kontur-Bilder wird iterativ ein formbeschreibendes Netz über das Objekt gelegt.

Schließlich wurde auch vom Institut für Luftfahrt in Leningrad ein Gerät (Bild 10) dieser Klasse gebaut (Tab. Nr. 18).

3.3. Objekterkennungs-Systeme mit mittleren Fähigkeiten

Für viele Zwecke reicht bei entsprechender Anordnung der Komponenten ein Identifizieren von zwei-dimensionalen Formen aus. Dies gestattet eine entscheidende Reduzierung der zu verarbeitenden Daten. Andererseits ist damit aber auch eine erhebliche Einschränkung bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten verbunden.

Von der japanischen Firma Mitsubishi wurde ein System gebaut, das über einen Manipulator mit Schrittmotoren und pneumatischer Zange, einen Klein-Rechner sowie zwei Fernsehkameras verfügt, von denen eine als Übersichts-Kamera und die andere zum Erkennen dient (Bild 11).

Aus den aufgenommenen Fernsehbildern werden von einem Analog/Digital-Wandler Binärbilder mit 96x96 Bildzellen produziert, die für die Auswertung zwischengespeichert werden (Bild 12). Die Hell-dunkel-Schwelle kann von Hand eingestellt werden.

Mit der senkrecht angeordneten Übersichts-Kamera erfolgt zunächst eine Szenen-Analyse und die Ermittlung der Zahl der am Arbeitsplatz vorhandenen Objekte sowie deren Positionen. Gemäß den im Programm enthaltenen Kriterien wird ein Objekt ausgewählt und der Greifer über diesem grob positioniert.

Nach der Auswertung von mehreren nacheinander mit der zweiten, in der Mittelachse des Greifers angeordneten Fernsehkamera aufgenommenen Bildern wird der Greifer genau über den Mittelpunkt des Objektes gesteuert. Dann wird der Greifer mit der Fernsehkamera zur Aufnahme weiterer Bilder in Rotation versetzt und danach die Gestalt des Objektes und dessen Winkel-Lage ermittelt. Wird das Objekt als ein spezifiziertes erkannt, greift der Manipulator das Objekt und bringt es an seinen Bestimmungsort, der auch beweglich sein kann (Tab. Nr. 7).

Die Vergleichsbilder für die Gestalt-Erkennung und die Orientierung zum Greifen werden durch "Zeigen" der Objekte eingegeben und die Bestimmungsorte durch Anfahren programmiert. Das System ist in der Lage 20 verschiedene Figuren und 20 japanische Schriftzeichen zu erkennen.

An der Universität von Nottingham in Großbritannien wurde der Montage-Roboter "SIRCH" (Bild 13) entwickelt, der durch Auswertung von erzeugten Binärbildern beliebig geformte ebene, auf einer Leuchtfläche liegende Gegenstände erkennen und deren Position ermitteln kann. Er wählt einen von drei verschiedenen Greifern aus, der zur Handhabung des jeweiligen Objektes geeignet ist. Das Programmieren erfolgt ebenfalls durch "Zeigen" des Werkstückes über die Fernsehkamera. Bemerkenswert sind durchgeführte Verbesserungen, die es ermöglichen, auch Teile begrenzt zu handhaben, die vorher noch nicht im Rechner gespeichert wurden (Tab. Nr. 5)!

Am Stanford Research Institute wurden Experimente mit einem Objekterkennungssystem durchgeführt, das aus einer von oben blickenden Fernsehkamera und einem Rechner vom Typ PDP-10 besteht. Dazu gehören ein Förderband, auf dem sich die zu identifizierenden Teile befinden, und spezielle Beleuchtungs-Einrichtungen, um für starke Kontraste zwischen den Werkstücken und dem Untergrund zu sorgen. Klare Bilder sind entscheidend für die Zuverlässigkeit der Erkennung und Reduzierung des Aufwandes.

Man begnügt sich bei diesem System auch mit der Auswertung von zwei-dimensionalen Binärbildern. Aus einem aufgenommenen Bild wird zunächst mit einem Hochgeschwindigkeits-Analog/Digital-Wandler ein Bild bestehend aus 120x120 Zellen sowie mit 32 Helligkeitsstufen hergestellt und zwischengespeichert (Bild 14). Durch Vergleich einer Zeile auf einmal mit einer festgelegten Schwelle erfolgt eine Klassifizierung jeder Bildzelle entweder

als hell oder dunkel sowie dabei eine "Zusammenhangs-Analyse", die die Umrisse einzelner Objekte und Löcher in den Objekten aus dem Bild isoliert sowie deren Anordnung zueinander ergibt. Gleichzeitig werden die Koordinaten der Umriß-Punkte festgestellt und gespeichert, die Flächen-Momente um die beiden Achsen sowie das kleinste umbeschriebene Rechteck jeder Figur ermittelt. Zur Bestimmung der Position und Orientierung eines Objektes sowie Erkennung der Gestalt werden eine Reihe von Eigenschaften der Figur berechnet. Da ein Objekt auf einer Unterlage mehrere stabile Lagen einnehmen kann, die verschiedene Bilder ergeben, wird jede Lage so bearbeitet, als handele es sich um ein unterschiedliches Objekt.

Zur Erkennung eines Objektes wendet man die Methode "Geringste Abweichung" von entsprechenden gespeicherten Objekt-Daten an. Hierbei werden z.B. vier Eigenschaften, die Fläche sowie der minimale, maximale und durchschnittliche Abstand der Umrißpunkte vom Mittelpunkt der Figur ermittelt. Die Abweichungen gegenüber den "bekannten" Objekten werden berechnet als Summe der Quadrate der Differenzen der vier gemessenen Eigenschaften gegenüber den gespeicherten. Das unbekannte Teil wird als der Typ klassifiziert, von dessen Daten es am wenigsten abweicht. Überschreitet die Abweichung eine einstellbare Schwelle, wird das Objekt als nicht erkennbar eingestuft. Im Durchschnitt werden für die Erkennung eines Teiles 2 s benötigt. Das Programmieren erfolgt durch "Zeigen".

Ein Nachteil der Methode "Geringste Abweichung" besteht darin, daß die zu berechnenden Eigenschaften sorgfältig ausgewählt werden müssen, um mit einem Minimum eine zutreffende Klassifizierung zu erreichen.

Um dies zu eliminieren, wurde als Alternative eine Methode verwendet, die mit einem sich automatisch entwickelnden binären Entscheidungsbaum arbeitet. Für den Beginn wird diejenige Eigenschaft des zu erkennenden Objektes ausgewählt, die die

größte Abweichung gegenüber den entsprechenden gespeicherten Daten aufweist. Die Eigenschaften werden in den Entscheidungspunkten mit Schwellen-Werten verglichen. Es können folgende Eigenschaften berechnet werden:

X_1 = Umfang der Figur

X_2 = Wurzel der Fläche

X_3 = Summe der Loch-Flächen

X_4, X_5, X_6 = minimaler, maximaler bzw. durchschnittlicher Abstand der Umrißpunkte vom Mittelpunkt

X_7 = Kompaktheit (X_1/X_2).

Bild 15 zeigt ein Beispiel für einen Entscheidungsbaum nach obiger Methode. Die Zahl der Eigenschaften, die zur Erkennung von Werkstücken berechnet werden müssen, schwankt zwischen 2 und 4 und beträgt im Durchschnitt 2,7. Für einen Erkennungsvorgang sind durchschnittlich nur 1,8 s erforderlich. Die Fehlerrate ist jedoch bei schlechter Bildqualität etwas höher, weil ein Teil nicht als unerkennbar eingestuft werden kann.

Um die Erkennungszeit wesentlich herabzusetzen und den Aufwand zu verringern, wurde das System später modifiziert (vgl. Abschnitt 3.4.1).

3.4. Einfache Objekterkennungs-Systeme

In dieser Klasse sind Systeme anzutreffen, bei denen man z.T. versucht mit vergleichsweise geringem Aufwand an jene mit mittleren Fähigkeiten heranzureichen und diese bezüglich der Geschwindigkeit noch erheblich zu übertreffen sowie solche mit geringen Erkennungs-Leistungen.

3.4.1. Mit optischem Sensor

Von der japanischen Firma Kawasaki wurde ein Industrie-Roboter vom Typ "Unimate" aus eigener Produktion mit einem System bestehend aus einer Industrie-Fernsehkamera und einem Klein-Rechner ausgerüstet, mit dem runde Teile und solche mit runden Löchern erkannt werden können. Ausgewertet wird ein Binärbild, wobei zur Berechnung von Eigenschaften und zur Entscheidung die Fläche, Loch-Zahl, -Flächen, -Abstände u.a. herangezogen werden. Infolge der Beschränkung des Anwendungsbereiches ist eine vergleichsweise geringe Speicher-Kapazität ausreichend und wird eine so hohe Erkennungs-Geschwindigkeit erreicht, daß keine Verzögerung im Arbeitsablauf auftritt (Tab. Nr. 11).

Das Stanford Research Institute in den USA stellte ein System vor, bei dem mit geringem Aufwand ungeordnete ferritische Werkstücke aufgenommen werden können. Ein mit einem Magnet-Greifer ausgerüsteter "Unimate 2000" (Bild 16) holt zunächst blind die Teile z.B. aus einer Kiste. Durch Ermittlung des Gewichtes wird festgestellt, ob ein Teil oder eventuell zwei oder keines am Greifer hängen. Sind es zwei, wirft der Roboter durch schnelles Schwenken ein Teil wieder in die Kiste ab. Dann wird das Teil unter einer Fotodioden-Anordnung hindurchbefördert, die Lage erkannt und ohne Verzögerung abhängig von der Lage an einen vorherbestimmten Platz abgelegt. Der verwendete Rechner ist ebenfalls vom Typ PDP-10. Die Programmierung erfolgt durch "Zeigen". An dem gleichen Industrie-Roboter wurde auch das akustische Programmieren demonstriert. Das System erkennt 50 geprüchene Befehle (Tab. Nr. 14).

Auch vom Stanford Research Institute wurde ein weiteres Objekterkennungssystem entwickelt, daß gegenüber dem in Abschnitt 3.3 geschilderten vereinfacht ist und bezüglich der Geschwindigkeit eine erhebliche Verbesserung aufweist (Erkennungsdauer ca. 0,5 s). Statt der Fernsehkamera wird eine lineare Fotodioden-Anordnung, wie bei dem oben geschilderten System, verwendet, die an einem Bügel quer über einem Förderband angeordnet ist, das mit einer Geschwindigkeit von 250 mm/s läuft. Die Dioden liefern entlang des Bügels 128 1-bit-Informationen alle 5 ms. Die für die Umwandlung des Fernsehbildes in ein Binärbild benötigte Zeit, die den überwiegenden Teil an der gesamten Dauer des Erkennungsvorganges ausmacht, entfällt hierdurch. Da es außerdem nicht erforderlich ist, das Bild zwischenzuspeichern, genügt ein Klein-Rechner vom Typ PDP-11/40. Mit dem gleichen System wurden auch Sichtkontrollen auf Vollständigkeit der Kontakte an Glühbirnen-Sockeln durchgeführt.

Vom Institut für Informationsverarbeitung in Technik und Biologie (IITB) in Karlsruhe wurde eine einfache Erkennungseinrichtung, ein inkohärent-optischer Korrelator, realisiert, der runde bewegte Werkstücke erkennen sowie deren Position ermitteln kann. Es ist kein Rechner sondern nur eine einfache elektronische Entscheidungslogik nötig. In einem inkohärent-optischen Korrelator werden Werkstück-Ansichten mit transparenten Abbildern (sog. Masken) verglichen (Bild 17).

Bei dem Korrelator von IITB (Bild 18) wird ein Werkstück, wenn es im Auffassungsbereich erscheint, durch das Objektiv auf einer rotierenden Scheibe abgebildet, die dem zu erkennenden Werkstück entsprechende Masken besitzt. Zu einem bestimmten Zeitpunkt kommt eine Maske mit dem Bild des Werkstückes zur Deckung, wenn es sich um eines vom zu erkennenden Typ handelt. Das durch die Maske tretende Licht wird an einem Fotorezeptor gesammelt und die Position des Kreismittelpunktes über den Drehwinkel der Scheibe ermittelt.

Das gleiche Prinzip kann auch zur Lagebestimmung von beliebig geformten Werkstücken mit Bohrungen verwendet werden.

Die Anpassung an verschiedene Werkstücke erfolgt durch Auswechseln der Masken.

Am Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart wurde der Korrelator mit einem Industrie-Roboter versuchsweise verkettet (Bild 19), wobei die Werkstücke auf einem Förderband antransportiert werden (Tab. Nr. 2).

Ebenfalls das IITB entwickelte ein System für zwei-dimensionale Erkennung kleinerer Teile und deren Positionsbestimmung, das aus einer Fernsehkamera mit einem Mikroprozessor und einem Förderband besteht (Bild 20). Es ist für Werkstücke geeignet, die, wenn sie gegen einen Anschlag geführt werden, eine geringe Anzahl diskreter Lagen einnehmen. Die Betrachtung erfolgt im Durchlicht.

Gemessen und ausgewertet werden die Schwarz-weiß-Übergänge in maximal fünf Zeilen des Fernsehbildes. Die Höhe der Zeilen wird so gewählt, daß sie sich mit charakteristischen Stellen der Werkstücke decken (Bild 21). Hierdurch wird nicht nur eine drastische Reduzierung des Aufwandes, sondern auch das Erkennen in nicht mehr als 70 ms (!) erreicht.

Aufgrund des erreichten Leistungs-Niveaus kommt dieser Methode richtungsweisende Bedeutung zu. Das Programmieren erfolgt durch Zeigen der Werkstücke in den möglichen Lagen. Dieses System wurde zu Vorfürzwecken ebenfalls vom IPA mit einem verfügbaren Industrie-Roboter verkettet (Tab. Nr. 1). Für Werkstücke, die sich nicht definiert gegen einen Anschlag führen lassen, ist ein ähnliches System in der Entwicklung.

3.4.2. Mit Näherungs-Sensoren

Im Bemühen um eine möglichst einfache Lösung der Probleme Identifizierung und Positions-Bestimmung wurde von der IBP Pietzsch GmbH in Ettlingen bei Karlsruhe ein Vorpositionier- und Erkennungsgerät für kleinere Teile entwickelt, das von seiner Konzeption her eine Klasse für sich darstellt. Es besitzt eine V-förmige Rinne zur Vorpositionierung, die in Quer- richtung unter einer der Flächen (bei der älteren Ausführung unter beiden) eine Zeile von 10 induktiven Näherungsinitiatoren besitzt, an denen die Werkstücke mit einem Bandförderer vor- beitransportiert werden. Durch mehrfaches Abfragen in fest- legbaren Abständen entsteht ein zwei-dimensionales Rasterbild, das mit einprogrammierten Referenzbildern verglichen wird.

Die Werkstücke werden nach ihrer Geometrie sowie Lage erkannt und mit Lämpchen am Bedienungspult dargestellt. Sie laufen gegen einen Anschlag, wo sie dann gegriffen werden können. Stimmt das aufgenommene Bild mit keinem Referenzbild überein, verhindert eine Weiche, daß das Werkstück gegen den Anschlag geführt wird. Programmiert wird durch einmaliges Vorbeiführen der Werkstücke an den Sensoren in den Lagen, die sie einnehmen können.

Versuchsweise wurde dieses Gerät ebenfalls mit einem Industrie- Roboter verkettet (Bild 22, Tab. Nr. 3). Als Ergänzung befindet sich eine davor anzuordnende Einrichtung zum Vereinzeln von Teilen in der Entwicklung.

3.4.3. Mit Tast-Sensoren

Um gegenüber Erkennungs-Systemen, die Fernsehkameras verwenden, den Aufwand zu senken, wurden auch Geräte mit Tast-Sensor-Anordnungen an der Greifzange gebaut. Bei derartigen Lösungen, die nach Art eines Blinden arbeiten, muß, wenn keine zusätzlichen Vorrichtungen zum Vereinzeln und Positionieren vorhanden sind, die Arbeitsgeschwindigkeit zwangsläufig gering im Vergleich zu Systemen sein, die die Situation erst rasch erfassen und dann z.B. zugreifen. Als Ergänzung anderer Sensoren oder bei vom Manipulator getrennter Installation können Tast-Sensor-Anordnungen für bestimmte Fälle jedoch vorteilhaft sein.

Von der Universität in Tokio wurde ein Gerät entwickelt, daß auf den Innenflächen jeder der beiden Greifzangen-Backen nicht weniger als 80 matrixförmig angeordnete verschiebbare Sensor-Nadeln besitzt, mit denen die Berührung eines Gegenstandes festgestellt wird. Die jeweilige Öffnungsweite der Zange wird mit einem Potentiometer gemessen. Durch Verarbeitung der Sensor-Signale in einem Klein-Rechner kann die Gestalt eines gegriffenen Objektes erkannt werden (Tab. Nr. 13).

Die Firma Hitachi in Japan hat ihren Manipulator "HI-T-Hand" im Hinblick auf Verpackungsarbeiten gebaut. Er kann mit seiner Greifzange verschiedenartige Gegenstände unterscheiden und deren Lage feststellen (Bild 23). Eine gewünschte Anordnung der Objekte läßt sich eingeben und das System wählt selbständig die Reihenfolge der Arbeitsschritte sowie Wege. Die Greifzange besitzt 14 Berührungssensoren an fünf Seiten der beiden Backen und auf den Innenflächen vier Drucksensoren sowie Sensoren zum Erfassen von Tangential-Kräften. Außerdem verfügt jeder Freiheitsgrad des Armes über einen Kraft-Sensor.

Die Programme sind hierarchisch in drei Ebenen aufgebaut:

- 10 elementare Bewegungs-Programme, wie gradlinige Bewegung des Greifers, Öffnen und Schließen u.a.
- Programme, die Bewegungs-Programme zu Funktionen verbinden wie Berühren, Drücken, Positionieren u.a.
- Überwachungs-Programme, die Arbeits-Methoden auswählen und die Vorgehensweise festlegen

(Tab. Nr. 10).

4. Welche Sensor-Art ist für Industrie-Roboter optimal?

Bei der Vielzahl angebotener Lösungen erhebt sich natürlich die Frage, welches Grund-Prinzip für möglichst viele Anwendungen beim heutigen technischen Stand das aussichtsreichste sein dürfte. Davon abgesehen bietet manches andere Verfahren für speziellere Fälle seine Vorzüge.

Die Firma Westinghouse Electric Corp. in den USA führte hierzu eine Untersuchung am Beispiel einer Handhabungsaufgabe durch, und zwar der Automatisierung des Umladens von Fernsehbildschirmen verschiedener Form von einem Conveyor an zwei Hängeförderer durch einen Industrie-Roboter bei einer vorhandenen Anlage.

Es wurden drei Alternativ-Lösungen verglichen, die alle die Anforderungen erfüllen:

1. Ein Objekterkennungssystem mit vier Fernsehkameras, das in die hochentwickelte Klasse einzustufen wäre
2. eine Anzahl Berührungs- und Näherungs-Sensoren sowie Positions-Melder
3. ein einfaches optisches Erkennungssystem mit zwei Fotodioden-Anordnungen und zwei Positions-Meldern.

Das Ergebnis sah wie folgt aus:

Lösung 1 mit Fernsehkameras ist sehr flexibel aber teuer. Verzichtet man auf kostspielige Sichtsysteme, müssen nicht nur der Industrie-Roboter sondern auch die Haltevorrichtungen für die Werkstücke sehr genau positioniert werden, was teuer ist. Außerdem sind größere Umbauten nötig. Die günstigste Kombination zwischen Arbeitsgeschwindigkeit und Kosten ergab sich für das einfache Erkennungssystem bei ausreichender Flexibilität. Dies bestätigt die Richtigkeit des Entwicklungstrends bei den Systemen mit Erkennungsfähigkeit in den letzten Jahren.

5. Sonstige Roboter

Von der Waseda-Universität in Tokio wurde der Roboter "Wabot-1" mit menschenähnlicher Gestalt entwickelt, der als reines Experimentier-Gerät und Nachfahre früherer Bemühungen, Roboter zu bauen, einzustufen ist. Das Gerät besitzt zwei Arme, zwei Beine, zwei Fernsehkameras und einen Klein-Rechner. Die aufgenommenen Graubilder werden in Binärbilder verwandelt, und es ist die Bestimmung der Richtung sowie Entfernung von Objekten möglich. Über ein Mikrofon können gesprochene Befehle aufgenommen und mit einem Synthesizer in Sprache geantwortet werden, wenn z.B. der Befehl nicht verstanden wurde oder seine Ausführung unmöglich ist.

Es liegt nahe, die Möglichkeiten einer programmierbaren Steuerung und von Sensoren auch für mobile Geräte, z.B. für Transportaufgaben, zu nutzen:

Die japanische Firma Shibaura Electric Co., Ltd. hat dreirädrige Fahrzeuge vom Typ "Robot Cart" für die Verwendung in Werkshallen und Büros gebaut, die 800 bis 1000 mm lang und 500 mm breit sind. Die Position wird durch Sensoren erfaßt und die Steuerung umfaßt einen Rechner. Die Version A besitzt eine rotierende Lampe, die einen Lichtstrahl mit 50 Hz aussendet. Position und Fahrrichtung werden durch zwei ortsfeste Servo-Einheiten gemessen. Zur Befehlsübertragung wird ein Kabel verwendet.

Die verbesserte Version B hat einen rotierenden Sensor, der die Winkel von drei Lichtquellen verschiedener Frequenzen mißt. Informationsübermittlung und Befehlsgebung zum bzw. vom Rechner erfolgen über Funk, wodurch ein großer Aktionsradius gegeben ist.

Von der japanischen Firma Hitachi wurde ein sechs-rädriges Fahrzeug gebaut, das entlang eines auf dem Boden angebrachten Leitbandes fährt. Es besitzt an seiner Unterseite einen optischen Detektor, der auf das unterschiedliche Reflexionsvermögen des Bandes gegenüber dem Boden anspricht.

Die Firma Android Elektronik KG in München hat einen acht-rädrigen Dienstleistungs-Roboter vorgeschlagen, der unter sich Geräte zur Bodenbearbeitung, wie Fußbodenreinigung, Straßenkehren oder Rasenmähen, aufnehmen kann. Das autonome Gerät soll nach einer eingegebenen Strategie die Aufgabe lösen, Bodenflächen wegmäßig optimal einmal abzufahren, ohne an Hindernisse zu stoßen. Hierfür sind ein als opto-elektronisches Orientierungs-System bezeichneter Gerätesatz, der sich in Entwicklung befindet, sowie für den Nahbereich ringsum Ultraschall-Entfernungsmesser und mechanische Berührungssensoren vorgesehen. Es liegt auf der Hand, daß ein derartiges Orientierungssystem auch für eine Anzahl weiterer Anwendungen in Frage kommt. Ferngesteuerte Geräte z.B. könnten mehr oder weniger autonom gemacht werden, so daß nur allgemein gehaltene Befehle gegeben werden müßten.

Vom Tokyo Institute of Technology wurde einer der exotischsten Roboter, der "Arm-1", gebaut, der eine netzförmige Struktur besitzt. Er kann sich auf geneigten und unebenen Oberflächen bewegen und an diesen haften. In jedem der 7x5 Knoten ist ein Gelenk-Element mit einem Antrieb und einem Saugteller sowie Berührungssensor auf der Unterseite angeordnet. Die Fortbewegung erfolgt durch Kriechen. Als Verwendung hat man z.B. das Schweißen im Schiffsbau im Auge.

Das vom Stanford Research Institute in den USA entwickelte Experimental-Roboter-Fahrzeug "Shakey" (Bild 24), kann sich in Laborräumen bewegen, Raumgrenzen, einfache Objekte und Türöffnungen erkennen sowie selbständig nach sehr allgemein gehaltenen Befehlen handeln. Außerdem verfügt es über einen

gewissen Grad an Lernfähigkeit. Das Fahrzeug ist mit einer Fernsehkamera, einem Entfernungsmesser (mit Lichtstrahl arbeitend) und Berührungssensoren (Drahtschleifen ringsum) ausgerüstet. Die Rechner (PDP-10 und -15) sind ortsfest; Informations- und Befehls-Übertragung erfolgen über Funk. Kommandos werden über einen Fernschreiber im Klartext gegeben.

Das System besitzt ein gespeichertes Modell vom Zustand des Fahrzeuges und der Umgebung bzw. kann sich dieses aufbauen. Es plant von der Zielsetzung ausgehend Aktionen bis herunter zu einzelnen Handlungen und prüft dabei gleichzeitig die Ausführbarkeit. Stellt das Fahrzeug auf seinem Wege Objekte fest, die noch nicht "bekannt" sind, so werden diese nach Identifikation und Bestimmung ihrer Position im internen Modell nachgetragen und ggf. der Aktionsplan korregiert (Bild 25). Typische Aufgaben, die das Fahrzeug ausführen kann, sind z.B.:

- Einsammeln mehrerer verstreuter Objekte, wobei keine Informationen gegeben werden, wo die Objekte zu finden und auf welchem Wege sie herbeizuschaffen sind
- Stoßen einer Kiste von einer niedrigen Plattform auf den Fußboden, wobei lediglich der Zusatzbefehl gegeben wird, daß das Fahrzeug eine Rampe benutzen soll, um auf die Plattform zu gelangen.

Im Jet Propulsion Laboratory der NASA ist ein Roboter-Fahrzeug in der Entwicklung, das für einen Flug zum Mars 1985 vorgesehen ist. Es wird mit einem schweren und einem leichten Manipulator, zwei Fernsehkameras, einem Laser-Entfernungsmesser und einem Bord-Rechner ausgerüstet werden, der ein begrenztes selbständiges Handeln ermöglicht. Bei unvorhergesehenen Situationen, die nicht bewältigt werden können, soll auch die Fernsteuerung möglich sein.

6. Zusatz-Einrichtungen mit Sensoren für Industrie-Roboter

Die Universität von Rhode Island in den USA entwickelte den Industrie-Roboter URI Mk. II mit einem Rechner, der optisch programmiert wird. Hierfür dient ein Gerät mit zwei Backen ähnlich wie bei einer Greifzange, an deren Enden sich zwei Lampen befinden. Das Programmiergerät wird in einer horizontalen Ebene an Stellen gehalten, die der Greifer später anfahren soll. Eine senkrechte Fernsehkamera ermittelt die jeweilige Position und Orientierung in der Ebene. Die vertikale Bewegung des Manipulators besitzt als Ergänzung einen Kraft-Begrenzungsschalter um z.B. die Arbeitsfläche "fühlen" zu können. Für die Programmierung im Raum sind drei Lampen und zwei Stereo-Fernsehkameras notwendig.

Ferner wird ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem das Vormachen mit der freien Hand erfolgt, über die ein schwarzer Handschuh gezogen wird, der mit Leuchtdioden an den Fingerspitzen und am Handrücken versehen ist.

Die Firma Westinghouse in den USA hat einen Industrie-Roboter zum Lichtbogenschweißen entwickelt, der einen Klein-Rechner besitzt und mit einem Programmier-Vorsatzgerät beim Vormachen von Hand geführt werden kann. Das Vorsatzgerät besitzt die gleichen Freiheitsgrade wie der Manipulator, jedoch mit sehr kleinen Verfahrwegen (z.B. $\pm 1,25$ mm bei den Translationsbewegungen) und gesonderte Positionsgeber. Erfolgt eine kleine Auslenkung, so gibt der Rechner Befehle, die Abweichung auszugleichen, wodurch der Manipulator nachläuft.

Die Dow Chemical Company in USA hat für die Verwendung von Industrie-Robotern in Heißen Zellen eine Zusatz-Einheit mit 80 Ein- und 40 Ausgängen entwickelt zur Verkettung mit den zu bedienenden Geräten und zur Kontrolle der Arbeitsabläufe, um bei Pannen die Geräte und den Roboter vor Beschädigung zu

schützen. Die Kontrolleinrichtung arbeitet opto-elektronisch und ist so aufgebaut, daß sich möglichst wenige Komponenten, die ihrerseits ausfallen könnten, in der Zelle befinden. Am Industrie-Roboter ist leicht auswechselbar eine Fernsehkamera und eine Lampe angebracht. An den Geräten befinden sich für jede Verriegelung nur ein oder zwei Spiegel. Das Licht fällt zunächst auf einen kugelförmigen Spiegel und von dort auf einen flachen Spiegel, der z.B. an einem Ofen so angebracht ist, daß eine Lichtschranke entsteht, mit der festgestellt werden kann, ob der Ofen geöffnet ist. Von dem flachen Spiegel wird das Licht in die Fernsehkamera reflektiert, und auf einem Monitor erscheint ein Lichtfleck. An der Scheibe des Bildschirms sind foto-elektrische Sensoren angebracht. Der Roboter wird so programmiert, daß er die Lichtflecken nacheinander mit bestimmten Fotozellen zur Deckung bringt. Kann eine Fotozelle den zugehörigen Lichtfleck nicht erfassen, wird der Roboter ausgeschaltet.

7. Das allgemeine Schema eines Roboters

Früher und z.T. noch heute nennt man ferngesteuerte Geräte, insbesondere solche mit menschenähnlicher Gestalt zur Schau-
stellung, auch "Roboter". Abgesehen von der nun mal üblichen
Bezeichnung "Industrie-Roboter", sollte man jedoch unter
"Roboter" in Zukunft nur Maschinen verstehen, die Arbeiten
geistiger und physischer Art bis zu einem gewissen Grad selbst-
ständig ausführen.

Es existiert weder eine Definition, welche Eigenschaften ein
Roboter mindestens besitzen muß, noch eine ausgeprägte Grenze
z.B. gegenüber Automaten mit Sensoren oder ferngesteuerten
rechnergestützten Geräten. Ab welcher Stufe man ein Gerät als
Roboter bezeichnet, ist daher bis zum gewissen Grade eine
Ermessenssache und wird sicher auch in Zukunft vom jeweiligen
technischen Stand beeinflußt werden.

Es wird wohl niemand einen einfachen Industrie-Roboter der
1. Generation "Roboter" nennen. Bei hochentwickelten Typen
der 1. Generation mit Klein-Rechner kann man in Anbetracht
der vielen Möglichkeiten jedoch schon in Zweifel geraten. Für
Geräte der 3. Generation mit einem Objekterkennungssystem ist
diese Bezeichnung wohl bereits berechtigt.

Als Anwendungsgebiete kommen für Roboter grundsätzlich die
gleichen wie für Automaten und ferngesteuerte Geräte infrage,
z.B. in der Produktion, in nicht oder nur schwer zugänglichen
Umgebungen oder für Missionen mit großem Risiko.

Voraussetzung für eine Verwendung von Robotern ist natürlich,
daß sich der zwangsläufig hohe Aufwand in irgendeiner Form,
z.B. im Hinblick auf die Forschungsergebnisse, Produktivität
oder Kostenwirksamkeit, lohnt.

Infolge des erreichten Preis-Niveaus und der Begrenztheit der zur Verfügung stehenden Mittel tendiert man allerdings auf einigen Gebieten wieder mehr zu einfacheren Lösungen.

Es ist anzunehmen, daß Roboter in den nächsten Jahren in der Produktion bedingt durch ihre Kosten nur langsam und zunächst nur solche mit einfachen Objekterkennungssystemen Eingang finden werden. Einige wenige sind zur Erkundung auf Himmelskörpern zu erwarten. Das Haupt-Anwendungsgebiet wird voraussichtlich das militärische Flugwesen sein (z.B. komplexe Lenkwaffen, Kampfflugkörper).

Das Schema Bild 26 zeigt die wichtigsten Untersysteme, die ein Roboter besitzen kann. Ein für einen bestimmten Zweck gebautes Gerät, wird demgegenüber, von Experimenten abgesehen, mit einer entsprechenden Auswahl ausgestattet sein. Nach der eingangs gegebenen, zwar etwas vagen Definition, muß ein Roboter bestimmte Kategorien von Untersystemen aufweisen, die durch weitere ergänzt werden können.

Ein Roboter muß für die "geistige" Leistung, für das bis zu einem bestimmten Grad selbständige Handeln bzw. die selbständige Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen oder Erscheinungen in seiner Umgebung, ein oder mehrere hoch entwickelte Sensoren (Sichtgeräte im weitesten Sinne) und einen Rechner besitzen, in dem eine zwangsläufig große Informationsmenge verarbeitet und daraus Aktionen oder Reaktionen abgeleitet werden. Das Niveau muß mindestens etwa dem eines Objekterkennungssystems entsprechen, wobei der Zweck auch ein anderer, z.B. die Navigation nach anzutreffenden Merkmalen der Umgebung sein kann.

Höhere "Intelligenz"-Stufen sind die Fähigkeiten:

- Aktionsabläufe oder spätere Phasen selbständig zu planen

- gestellte Probleme grundsätzlich zu lösen, d.h. Zwischenziele festzulegen, und ggf. die günstigste Alternative für die Aktionsplanung auszuwählen
- Aktionsabläufe auf Ausführbarkeit und ob die Informationen ausreichen zu prüfen
- die Ausführung eines Planes ständig zu kontrollieren und ggf. den Plan zu ändern
- die Arbeits- bzw. Verarbeitungsweise aufgrund von Sensor-Informationen zu korregieren
- interne Modelle und Bewegungs-Programme aufgrund von Erkennung bzw. vorangegangenen Aktionen zu ergänzen.

Als "Sicht"-Sensoren kommen außer Fernsehkameras je nach Verwendung des Roboters z.B. auch Radar-, Wärmebild-, Lasersuch- oder Sonar-Geräte in Frage. Dazu muß ein Roboter Einrichtungen haben, um physische Effekte vollbringen zu können. Hierbei kann es sich um Komponenten sehr unterschiedlicher Art, wie z.B. Arme, Werkzeuge, Waffen oder Gefechtsköpfe handeln.

Ergänzend kann ein Roboter je nach Zweck eine Reihe weiterer Untersysteme und Ergänzungen besitzen wie:

- Zur Ortsveränderung z.B. ein Fahrwerk, Schreitwerk oder einen Flugkörper
- Schwenken und Neigen der kompletten Effektoren
- eine Energiequelle
- spezielle Sensoren wie z.B. Strahlen- und Temperatur-Meßgeräte sowie Radar-, Laser- und Infrarot-Quellenmeldegeräte
- ein Erkennungsgerät, das auf Anfrage die Identität des Roboters meldet

- Stabilisierungs-, Punkthalte- und Objektverfolgungs-Einrichtungen für die beweglichen Sensoren und Effektoren
- bestimmte Such-Bewegungen der Sensoren
- Nachführung der Effektoren den beweglichen Sensoren und umgekehrt
- Scheinwerfer
- elektronische Störgeräte.

Bei den Instruktionen, die einem Roboter vom Personal gegeben werden, kann es sich außer um Informationen über Eigenschaften von Objekten und deren Positionen oder neue Programme auch um ein Trainieren oder Übersteuern handeln, in Situationen für deren Bewältigung die Fähigkeiten des Roboters nicht ausreichen.

Gründe, weswegen man bei Geräten Roboter-Eigenschaften anstrebt, sind gegenüber Automaten ein hohes Maß an Flexibilität zur Erweiterung des Anwendungsbereiches und gegenüber ferngesteuerten Geräten ein bestimmter Grad von Autonomie. Letztere kann nötig oder vorteilhaft sein wegen der Laufzeit der Signale, um die Kontaktzeiten kurz zu halten, viele Geräte gleichzeitig einsetzen zu können, Störmöglichkeiten zu vermindern oder Personal zu sparen.

Ein weiteres Gebiet sind unterstützende Einrichtungen, die bemannten Fahrzeugen zur Leistungssteigerung ebenfalls einen Roboter-Charakter verleihen. Bei Systemen für die Zielauffassung und den Waffeneinsatz besteht insbesondere für einsitzige Kampfflugzeuge die Entwicklungstendenz hin zu solchen, die zwei bis vier verschiedene Sensoren besitzen und in der automatischen Betriebsweise nicht nur Ziele verfolgen sowie Waffen auslösen und Lenken sondern schließlich auch noch automatisch auffassen.

8. Abschließende Bemerkungen

Wie aufgezeigt wurde, standen am Anfang Geräte mit hochentwickelten Objekterkennungssystemen und die bisherige Entwicklung führte wegen der hohen Kosten und langen Rechenzeiten zu einfachen schnellen Erkennungssystemen und Sensor-Einrichtungen, deren Anwendungsbereich jedoch stark eingeschränkt ist oder die speziell auf bestimmte Probleme zugeschnitten sind. Die gegenwärtige Situation ist noch durch ein Suchen nach wirtschaftlichen Lösungen gekennzeichnet, wie die Vielzahl sehr unterschiedlicher Systeme deutlich macht.

Es ist anzunehmen, daß für eine Reihe von Aufgaben, die mit ausreichender Häufigkeit vorkommen, z.B. die Montage von kleinen und mittleren Teilen, Handhabung von flachen oder zylindrischen Werkstücken oder Lichtbogenschweißen, sich allmählich bestimmte Bauformen herausbilden und durchsetzen werden. Einerseits ist es nicht sinnvoll, der früheren Vorstellung von einem Roboter folgend, universelle Industrie-Roboter der 3. Generation anzustreben, da deren Eigenschaften an einzelnen Arbeitsplätzen jeweils nur teilweise ausgenutzt würden, und man von Maschinen bekanntlich immer eine möglichst hohe Leistung bei bestimmten Aufgaben verlangt, was zu einer gewissen Spezialisierung zwingt. Andererseits können die Beschränkungen, die die heutigen Systeme besitzen, auf die Dauer nicht befriedigen, da sie im Widerspruch zu den berechtigten Forderungen nach hoher Flexibilität und einem großen Anwendungsbereich stehen. Außerdem werden u.a. diese Eigenschaften von Befürwortern der Industrie-Roboter-Technologie als Vorteile ins Feld geführt.

Die Tendenz zu Kleinrechner-Steuerungen in den letzten Jahren bei hochentwickelten Industrie-Robotern der 1. Generation begünstigt die Einführung komplexer Sensoren, da für die umfangreiche Signalverarbeitung in diesem Falle kein zusätz-

licher Rechner vorgesehen werden muß, sondern alle im Rahmen des Gesamtsystems zu bewältigenden Steuerfunktionen von einem Rechner mit etwas erweiterter Kapazität übernommen werden können.

Welche Aussichten bestehen nun für die Realisierbarkeit leistungsgesteigerter wirtschaftlicher Lösungen? Die Prognosen von verschiedenen Herstellern elektronischer Bauelemente sind dahingehend übereinstimmend, daß weiter eine drastische Kosten-Verringerung erwartet wird. Während 1965 je Funktion ca. 1 DM aufgewendet werden mußte - etwa auf diesem Stand waren die ersten Objekterkennungssysteme - rechnet man für 1985 vielfach nur noch mit 1/10 bis 1/100 Pfennig.

Als Wege zur Beschleunigung und Reduzierung des Aufwandes eines Erkennungsvorganges kommen in Frage:

- Die Entwicklung von Algorithmen, die die relevanten Teile von Szenen auffinden und nur diese analysieren
- Gleichzeitige Bearbeitung vieler Teile einer Szene und verstärkte hierarchische Organisation des Erkennungs-Prozesses
- Supraleitende Logik-u.Speicher-Elemente (Entwicklung von IBM).

Welche Bedeutung der Entwicklung von Objekterkennungssystemen zukommt, geht eindrucksvoll aus einer Studie von G. Herrmann am IPA in Stuttgart hervor. Danach eignen sich wegen des derzeitigen geringen Automatisierungsgrades von 915 untersuchten Arbeitsplätzen nur 2% für den Industrie-Roboter-Einsatz.

Nach einer Automatisierung der Funktionen Spannen der Werkstücke sowie insbesondere Ordnen und Kontrolle, wofür sich Objekterkennungssysteme anbieten, könnten dagegen an 35% der Arbeitsplätze Industrie-Roboter verwendet werden!

Wenn auch erste Anstrengungen in der BRD bereits ermutigende Resultate geliefert haben, so wäre doch in Anbetracht der sich abzeichnenden technischen Möglichkeiten und des zu erwartenden Nutzens eine erhebliche Intensivierung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wünschenswert.

LITERATUR-HINWEISE

1. Proceedings of the 2nd Internat. Symposium on Industrial Robots, 16.-18. May, 1972, IIT Research Institute, Chicago, USA
2. Referate des 3. internat. Symposiums über Industrie-Roboter, 29.-31. Mai 1973, Zürich/Schweiz; Veranstalter: Robotronics&Technics AG, Aarau/Schweiz
3. Proceedings of the 4th Internat. Symposium on Industrial Robots, 19.-21. November 1974, Tokyo, Japan Industrial Robot Association
4. Proceedings of the 5th Internat. Symposium on Industrial Robots, 22.-24. Sept. 1975, IIT Research Institute, Chicago, USA
5. Proceedings of the 2nd Conference on Industrial Robot Technology, 27.-29. März 1974, an der Universität von Birmingham, GB
6. Proceedings of the 3rd Conference on Industrial Robot Technology and the 6th Internat. Symposium on Industrial Robots, 24.-26. März 1976, an der Universität von Nottingham, GB
7. First CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Band 1 und 2, 5.-8. Sept. 1973, in Udine, Italien
8. Referate Nr. 31 und 32 Erfahrungsaustausch Industrie-Roboter, 21.-23. Jan. 1975, am Institut für Produktionstechnik und Automatisierung der Universität Stuttgart
9. "Montage- und Handhabungstechnik", Hefte 1 bis 3, 1976, Krausskopf-Verlag, Mainz
10. Fachteil "Montage- und Handhabungstechnik" in "Fördern und Heben", Hefte 13/1976 und 4/1977, Krausskopf-Verlag, Mainz
11. G.W. Köhler, Bericht "Manipulatoren, Automaten und Roboter", veröffentlicht in VDI-Nachrichten Nr. 14/1976
12. G.W. Köhler, Bericht "Fernbedienungsgeräte", veröffentlicht in VDI-Nachrichten Nr. 15 bis 22/1977
13. G.W. Köhler, Bericht "Industrie-Roboter der 1. Generation", wird veröffentlicht in VDI-Nachrichten 1978.

Tabelle: Industrie-Roboter und Experimental-Manipulatoren mit Objekterkennungssystem

Lfd. Nr.	Land	Erste Veröff.	Entwicklungs-Stelle	Bezeichn.	Sensoren	Rechner und Speicher	Manipulator	Bemerkungen
1	BRD	1977	IITB und IPA	•	Fernseh-Kamera	Mikro-Prozessor 1,5 K	PPI-PM12	2d-Erkennung von Teilen, die an Anschlag diskrete Lagen einnehmen, Förderband, Erkennungsdauer 0,07 s
2	BRD	1976	IITB und IPA	•	Inkohärent-optischer Korrelator	Entscheidungs-Logik	Nachi 1000 *)	2d-Erkennung von runden Teilen *) Japanischer Typ
3	BRD	1976	IBP Pietzsch	•	Anordnung induktiv. Näherungs.-Sens.	Vergleichs-Elektronik	PPI-PM12	Gesonderte 2d-Erkennungseinrichtung mit Förderband
4	GB	vor 1973	Universität von Edinburgh	Freddy	2 FS-Kameras	I CL 4130 Honeywell 8 K	2 große Greif-Backen und Tisch	Dauer eines Vorganges 60-120 s, hat etwas "Gefühl", Tisch in X-Y-Ebene beweglich
5	GB	1972	Universität von Nottingham	SIRCH	FS-Kamera	DDP 516 12 K	5 Fg. und 3 versch. Greifer	Für Montage, erkennt beliebige 2d-Formen, Dauer eines Vorganges 6-8 s
6	Jap.	1976	Mitsubishi Co.	•	FS-Kamera	PDP 8/1 6 bis 8 K	7 Fg.	Positioniert Kollektor-Bürsten u. Bürsten-Halter in Montage-Maschine, Handhabungsdauer pro Teil 20-30 s

Lfd. Nr.	Land	Erste Veröff.	Entwicklungs-Stelle	Bezeichn.	Sensoren	Rechner und Speicher	Manipulator	Bemerkungen
7	Jap.	1971	Mitsubishi Co.	•	2 FS-Kameras	PDP 8/I 4 K, 8 K(1972)	5 Fg.	Eine Kamera zur Szenenanalyse u.Grob-Positionierung, zweite in Mittelachse d.Greifers f. Fein-Positionierung u.Erkennung. 2d-System,1972 verbessertes 2. Gerät
8	Jap.	vor 1975	Hitachi Ltd.	•	FS-Kamera	32 K	•	Stapelt Teile, die auf Band gefördert werden, Dauer 16 s pro Vorgang
9	Jap.	1970	Hitachi Ltd.	HIVIP MK1	2 FS-Kameras	HITAC 7250 32 Kernspeicher	Arm mit 6 Fg. und Hand	Eine Kamera analysiert Zeichnungen von Objekten, die mit der zweiten in Szene gesucht werden
10	Jap.	1972	Hitachi Ltd.	HI-T-Hand	14 Berührungs-Sens.*)	HITAC 7250	6 Fg. und Hand	*) ferner 4 Druck-Sensoren, Sensoren f.Tangential-Kräfte u.6 Kraft-Sensoren im Arm
11	Jap.	1974	Kawasaki Heavy Industries Ltd.	•	Fs-Kamera	Nova-1200 3K	Kawasaki-Unimate	2d-Erkennung von runden Teilen und solchen mit Löchern, sehr hohe Erkennungsgeschwindigk.
12	Jap.	vor 1975	Electrotechnical.Lab. (ETL), Tokyo	•	FS-Kamera	4 Progr. mit 32K	•	Arbeitet mit Schlitzprojektoren. Erkennt einfache prismatische Teile, Dauer pro Vorgang 80 s

Lfd. Nr.	Land	Erste Veröff.	Entwicklungs-Stelle	Bezeichn.	Sensoren	Rechner und Speicher	Manipulator	Bemerkungen
13	Jap.	1974	University Tokyo	.	2x80 Berühr. Sens.	Klein-Rechner 8192-16 bit-Worte	3 Fg.	Sensoren auf Innenflächen der Greifer-Backen
14	USA	1975	Stanford Research Institute (SRI)	.	Lineare Foto-Dioden-Anordnung	PDP 10	Unimate 2000 mit Magnet-Greifer	Gesonderte 2d-Erkennungs-Einrichtung mit Förderband; Kontrolle, ob Teil am Greifer
15	USA	vor 1975	SRI	.	FS-Kamera	PDP 10 16K Random 1200K Bulk	Unimate 2000	Erkennt beliebige Formen, Objektverfolgungs-Einrichtung
16	USA	1968	Stanford University	.	FS-Kamera	PDP 6 PDP 10	Arm mit 6 Freiheitsgraden (Fg) und Hand	
17	USA	1968	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	MAC	FS-Kamera u. taktile Sensoren	TX-0 8K Kernspeicher	10 Fg., davon 4 Gelenke; später Arm m. 6 Fg.	Programmiersprache PLANNER; parallel System entwickelt, das Sprache versteht, jedoch nicht in MAC integriert
18	UDSSR	1973	Institut für Luftfahrt Leningrad	.	Sicht-System	.	Arm mit 3 Gelenken und Greifer	

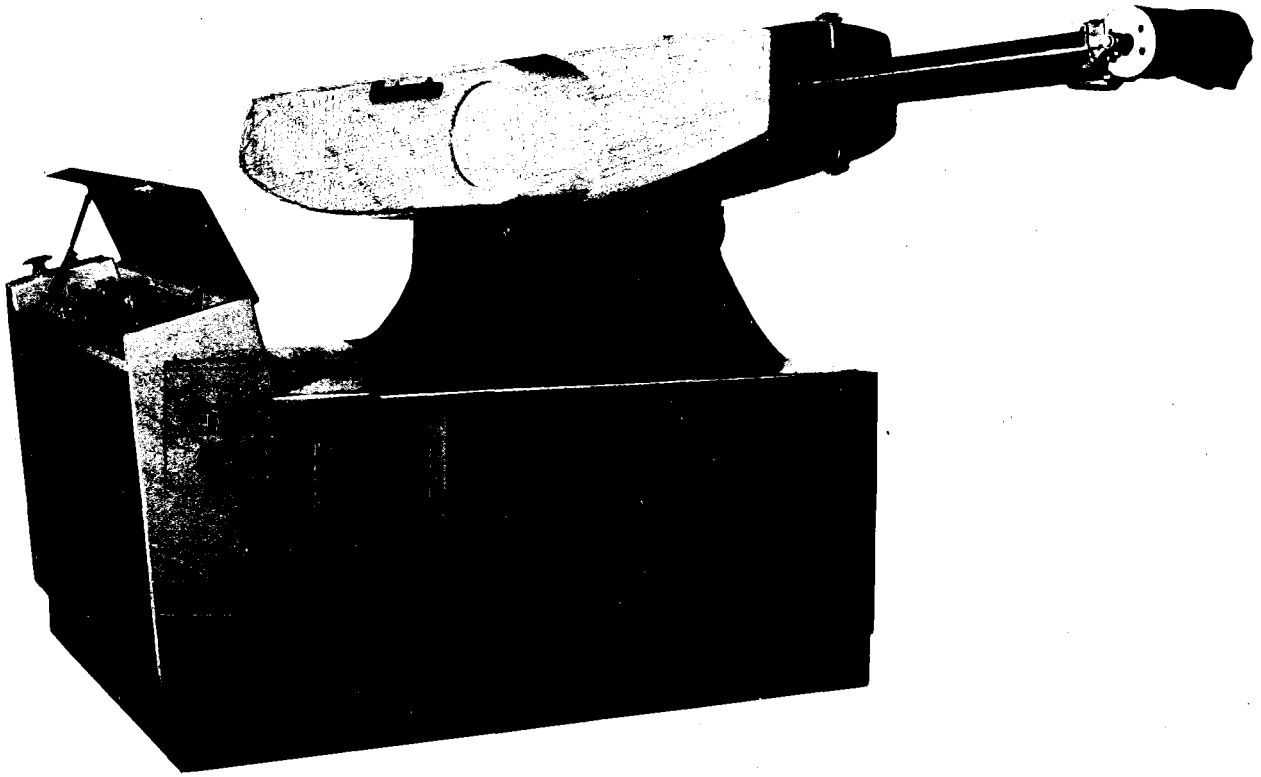


Foto: Unimation Inc., USA

Bild 1: "Unimate 2000", Industrie-Roboter der 1. Generation, der mehrfach durch verschiedene Sensoren oder Objekterkennungs-Systeme zu einem Gerät der 2. oder 3. Generation erweitert wurde (im Bild ohne Greifer)

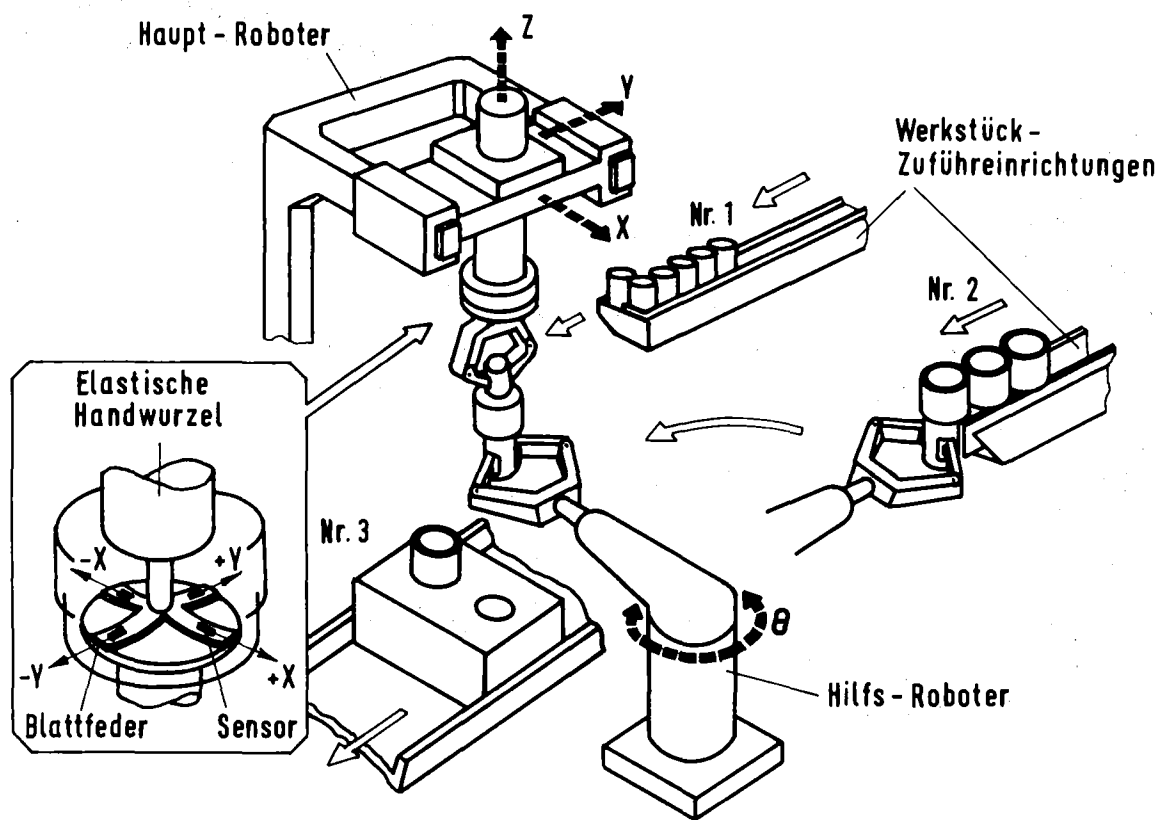


Bild 2 : Montage-Roboter „HI-T-Hand Expert-2“ der Firma Hitachi, mit Sensoren

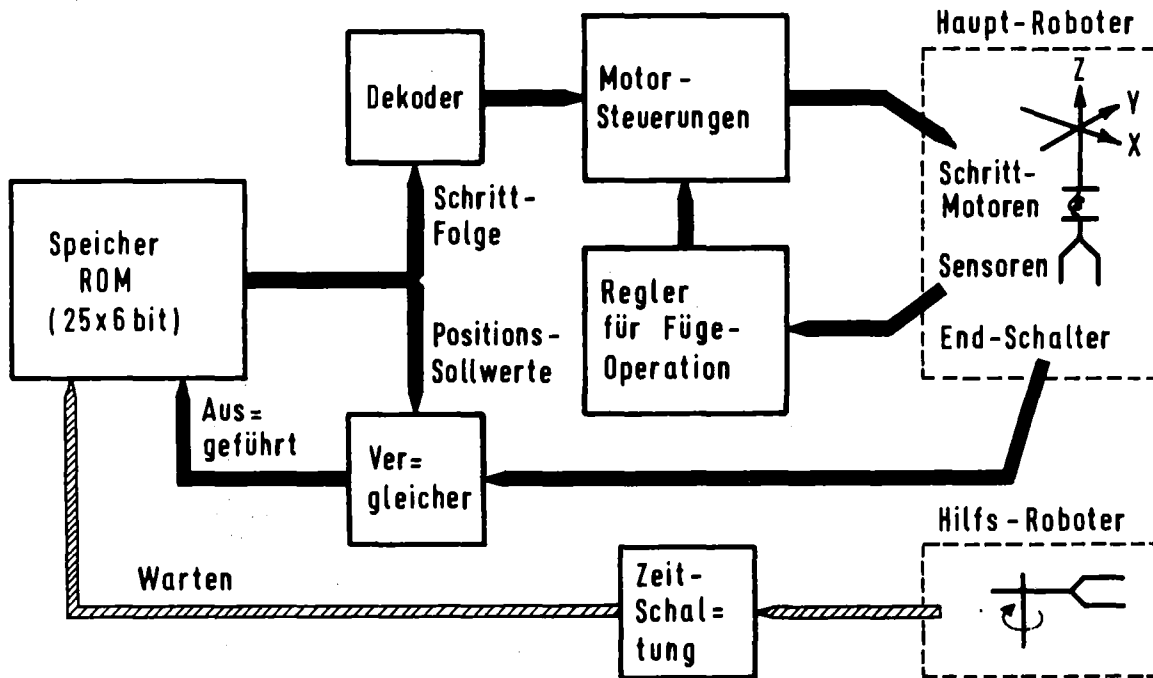


Bild 3 : Vereinfachtes Blockschaltbild des Montage-Roboters
 „HI-T-Hand Expert-2“

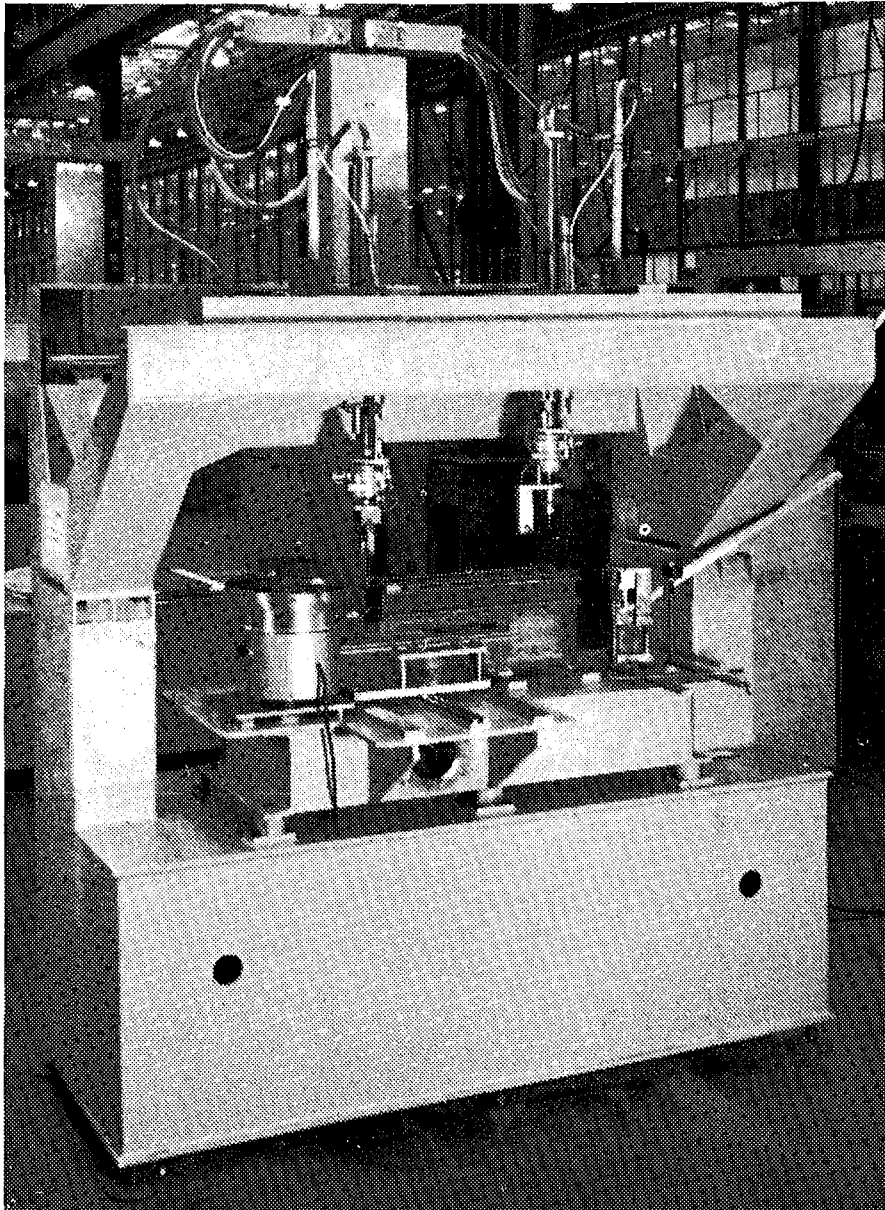


Foto: Olivetti & Cie. S.p.A., Italien

Bild 4: Montage-Roboter "SIGMA/MTG", mit 2 Greifern,
rechnergesteuert

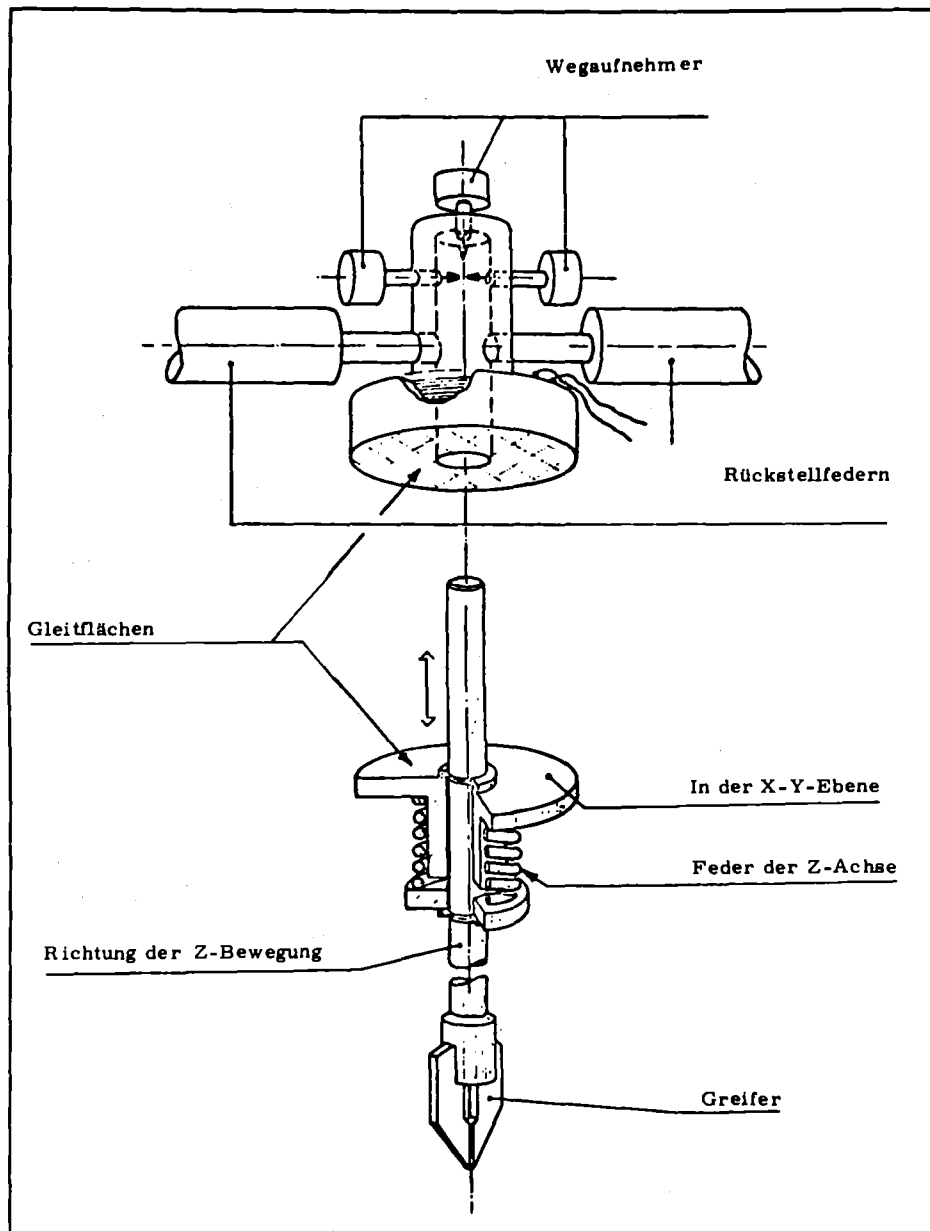


Bild 5: Aufbau des Greifer-Gelenkes des Montage-Roboters "SIGMA/MTG"

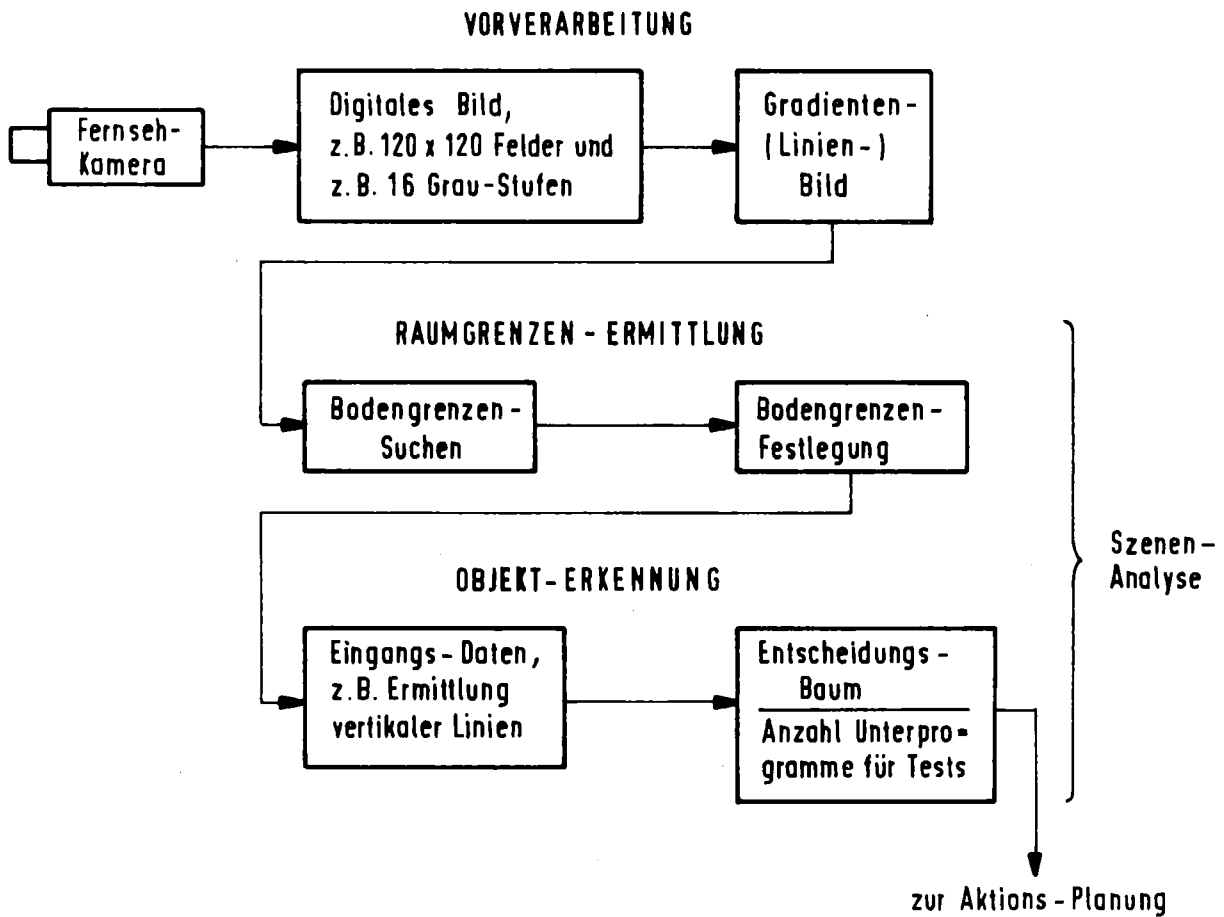


Bild 6 : Objekterkennung durch Analyse eines Linienbildes

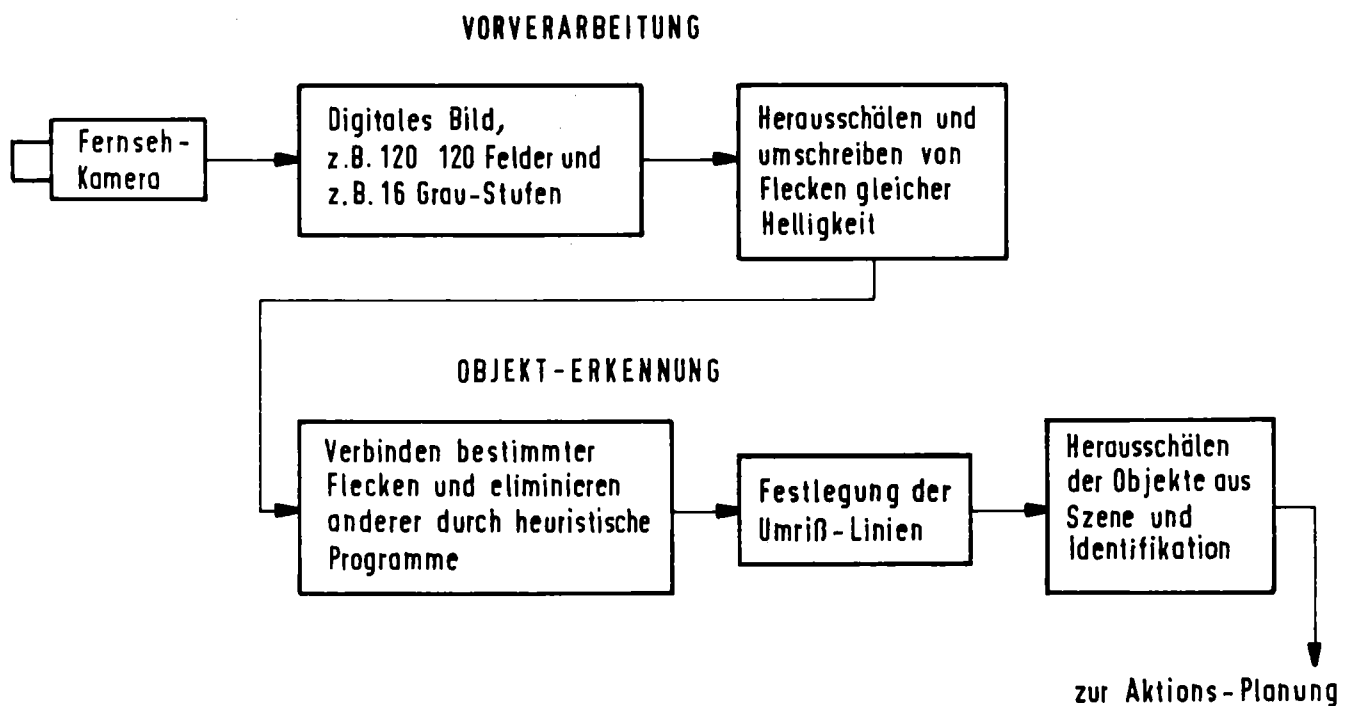


Bild 7 : Objekterkennung durch Analyse eines Flecken-Bildes

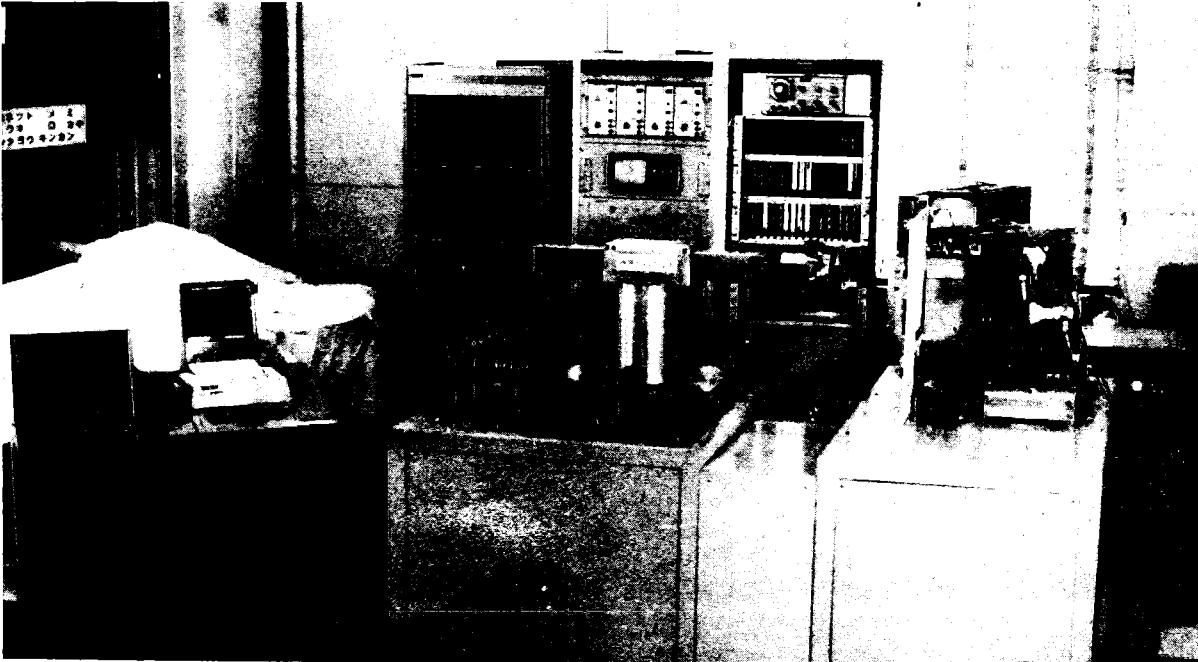


Foto: Mitsubishi Heavy Ind., Japan

Bild 8: System zur Montage von Kollektor-Bürsten und Bürsten-Haltern der Firma Mitsubishi;
in Bildmitte Roboter-Arm mit Fernsehkamera in Handwurzel, rechts Hilfsarm

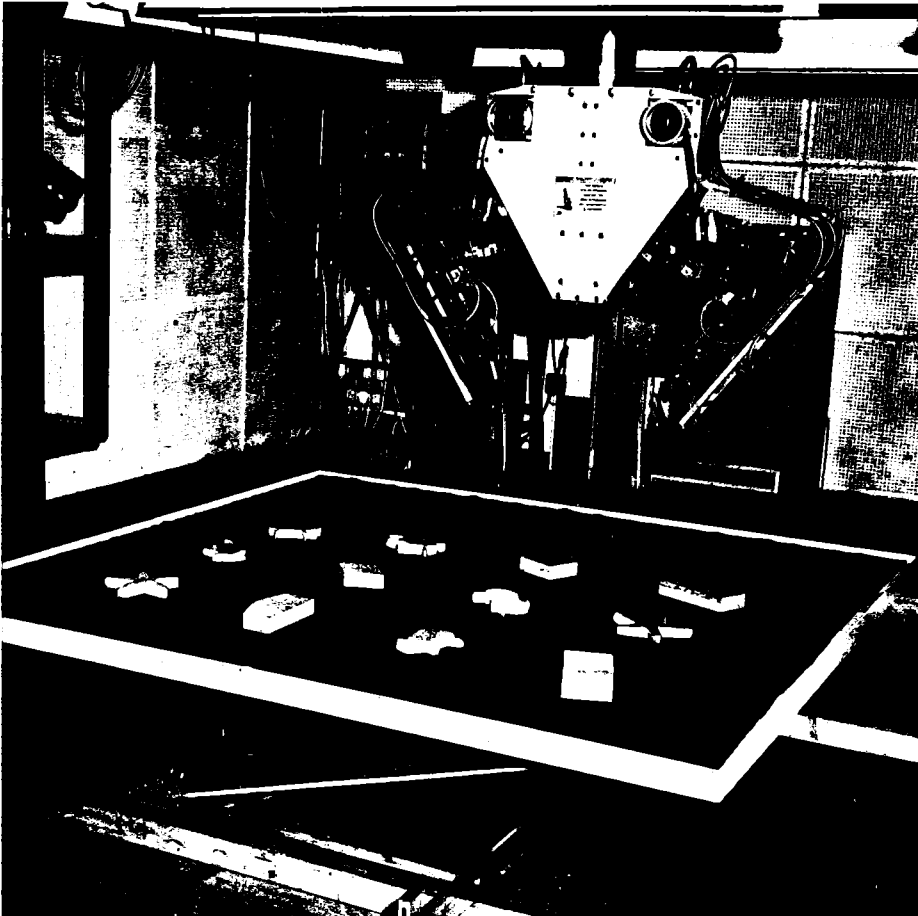


Foto: W.B. Heginbotham, GB

Bild 9: Roboter "Freddy" der Universität in
Edinburgh

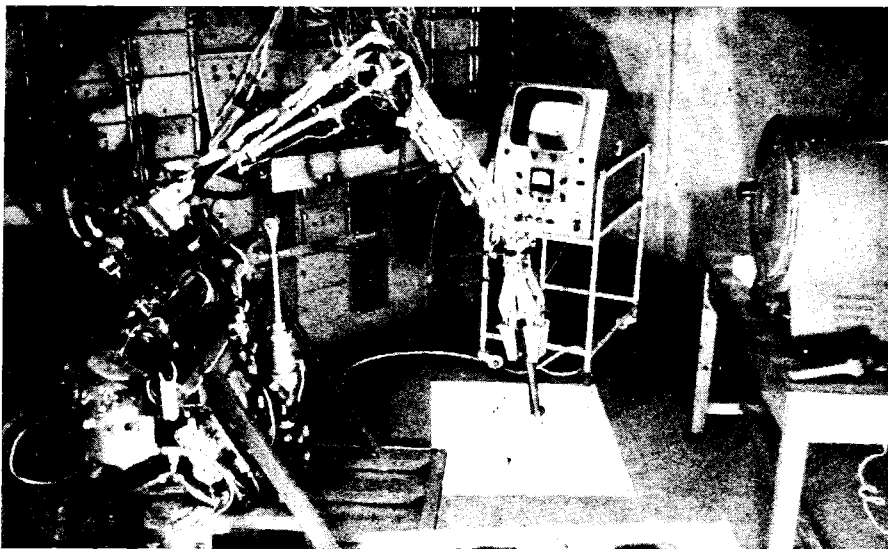


Foto: Institut der Luftfahrt in Leningrad

Bild 10: Industrie-Roboter mit Sichtsystem in
der UDSSR

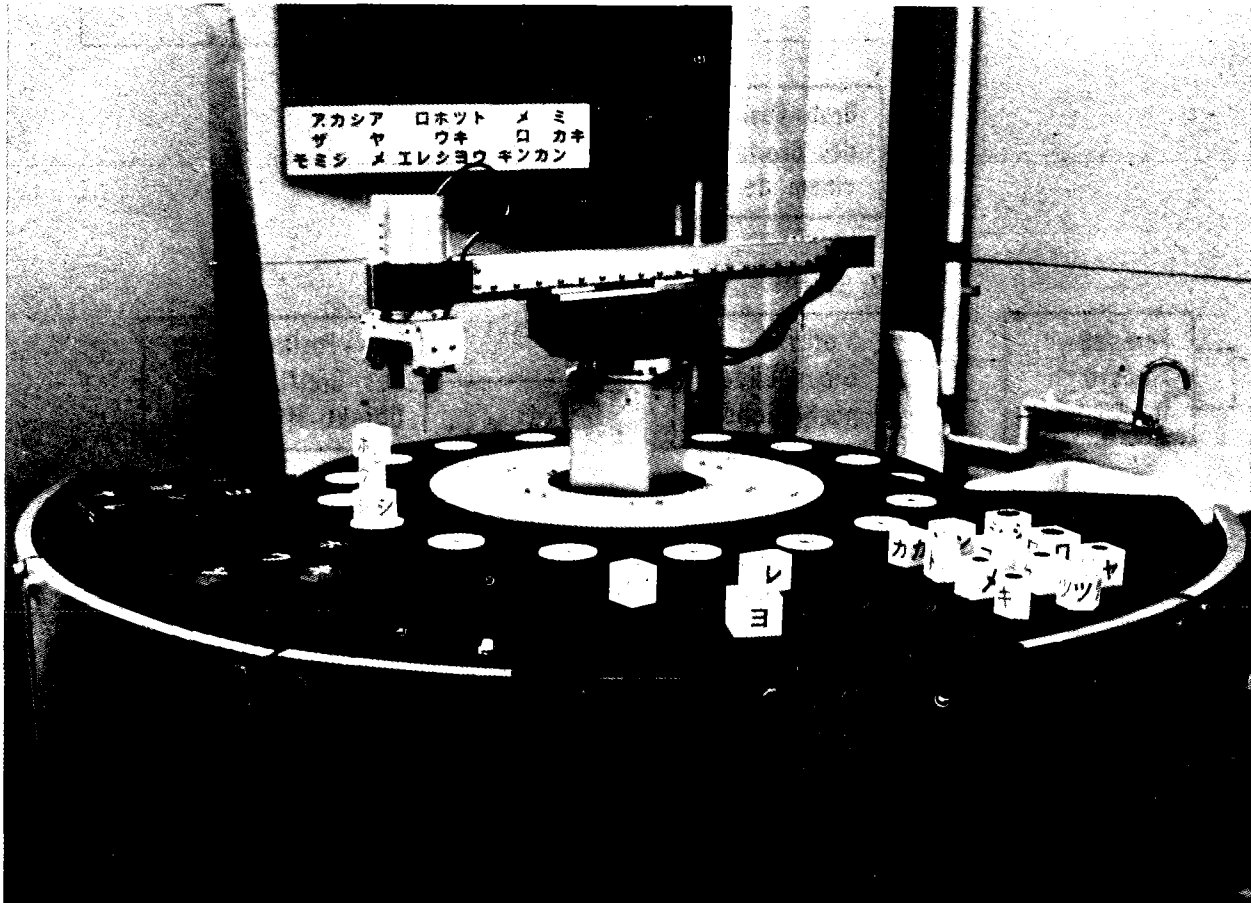


Foto: Mitsubishi Heavy Ind., Japan

Bild 11: Industrie-Roboter mit 2 Fernsehkameras der Firma Mitsubishi, zweites Modell; Übersichtskamera oberhalb am Mast, im Bild nicht sichtbar, Kamera zum Erkennen im Greifer

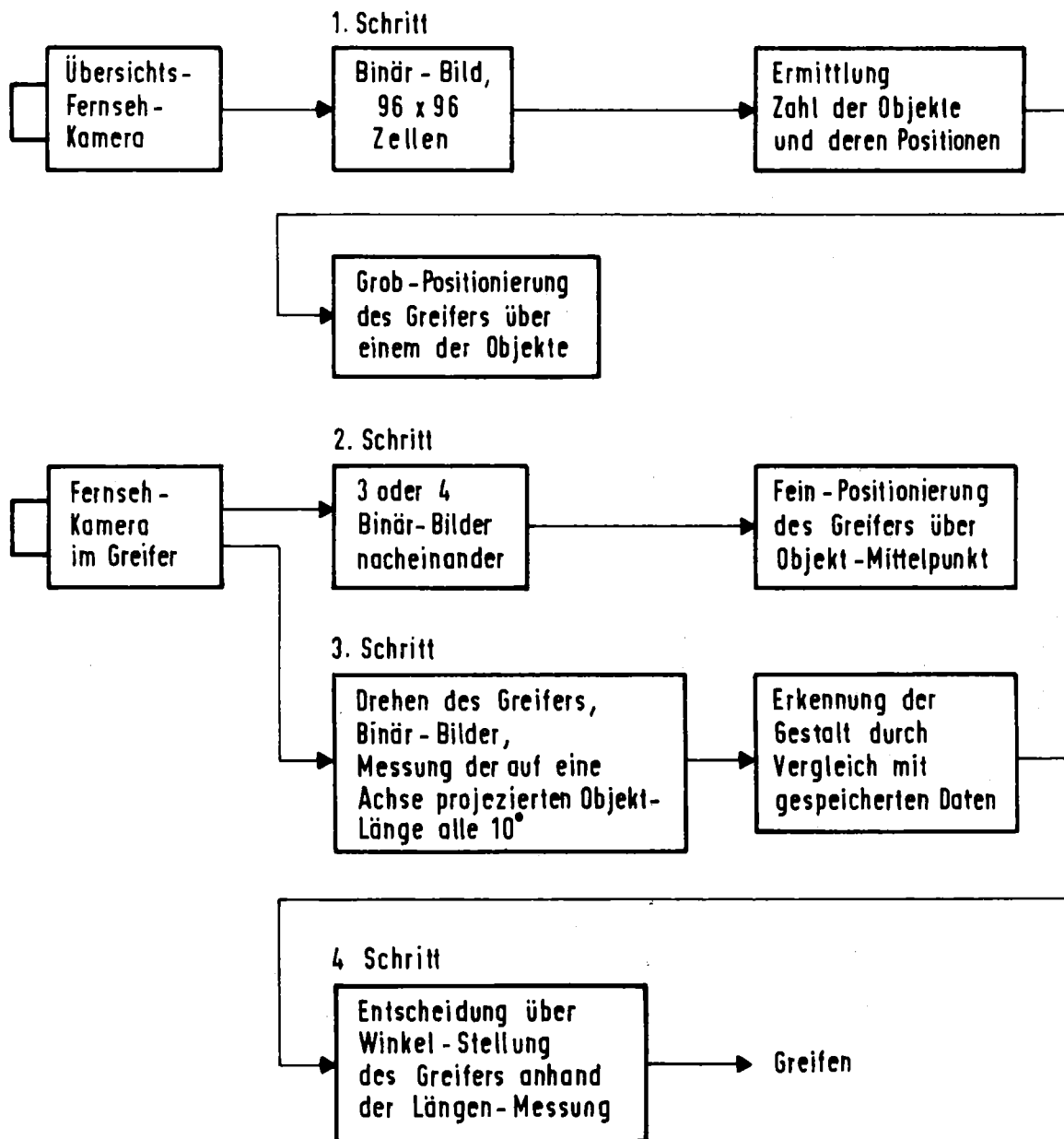


Bild 12 : Objekterkennungssystem mittlerer Fähigkeit von Mitsubishi

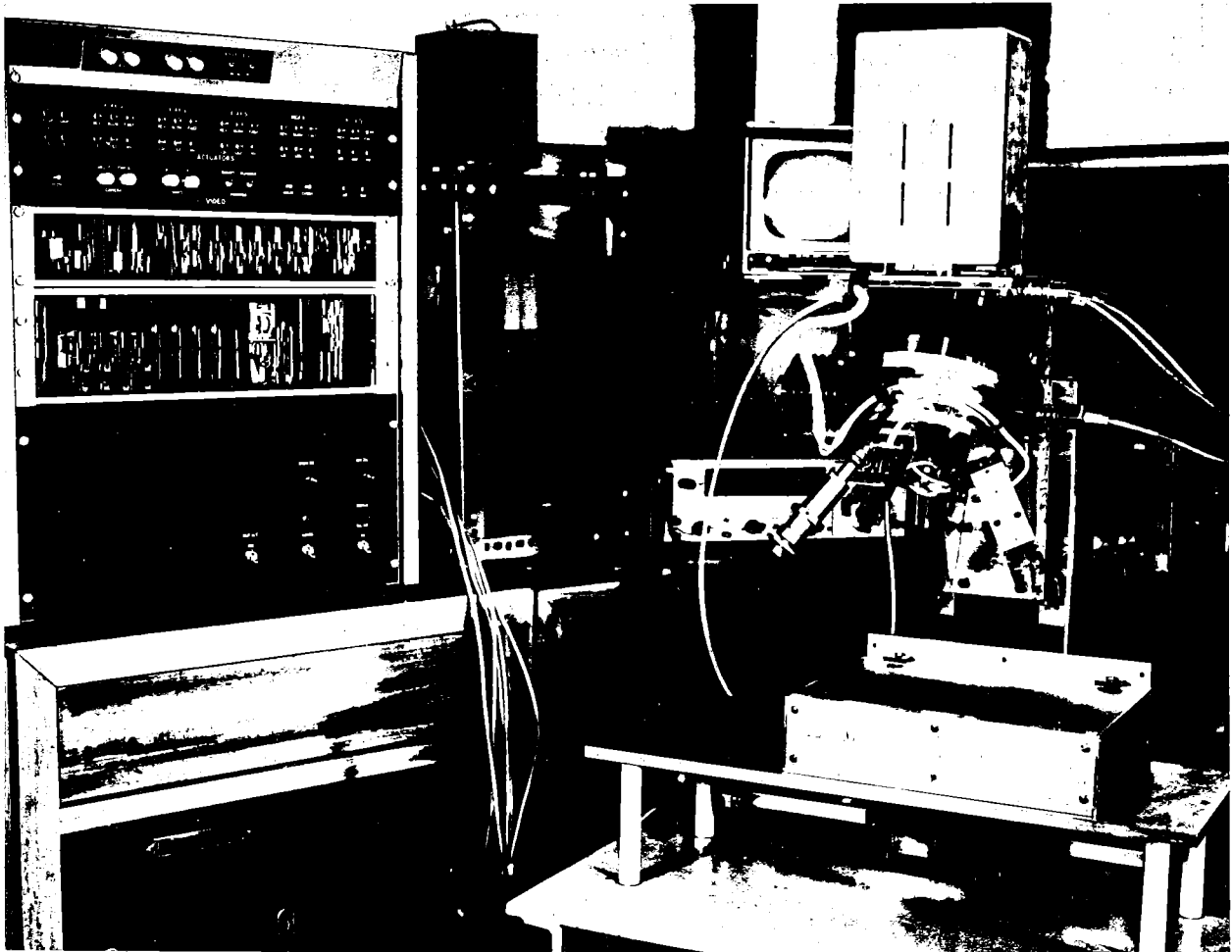


Foto: Uni. Nottingham, GB

Bild 13: Montage-Roboter "SIRCH" der Universität von Nottingham, mit 3 Greifern

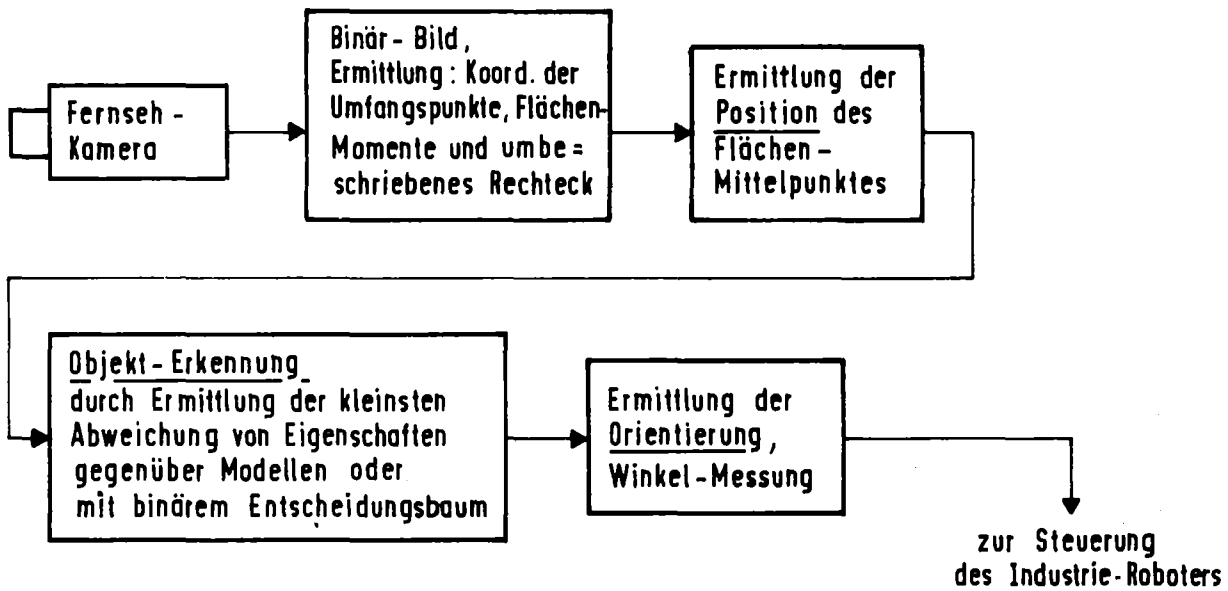


Bild 14 : Objekterkennungssystem mittlerer Fähigkeit vom SR I

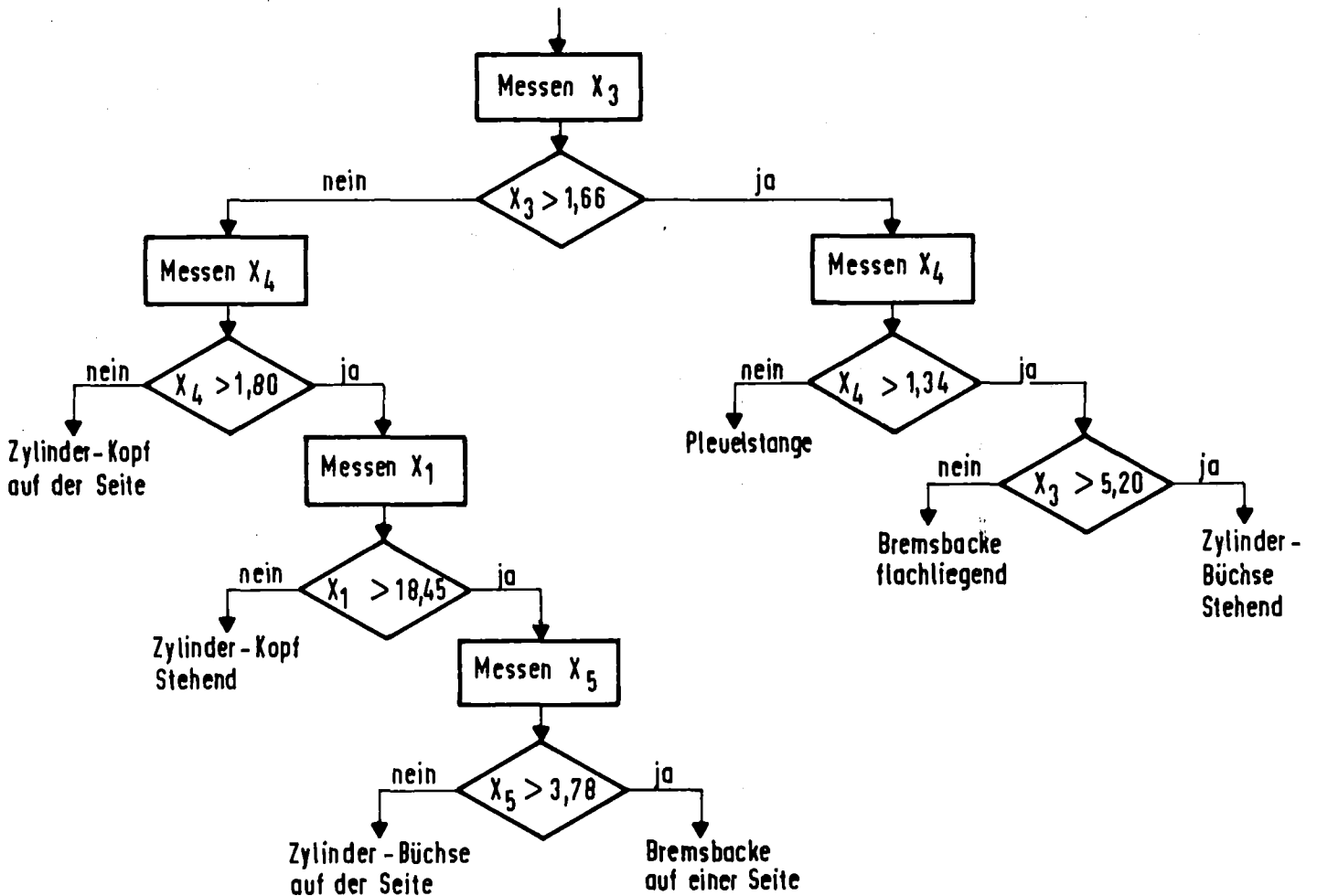


Bild 15 : Beispiel eines Entscheidungsbaumes des Objekterkennungssystems vom SR I

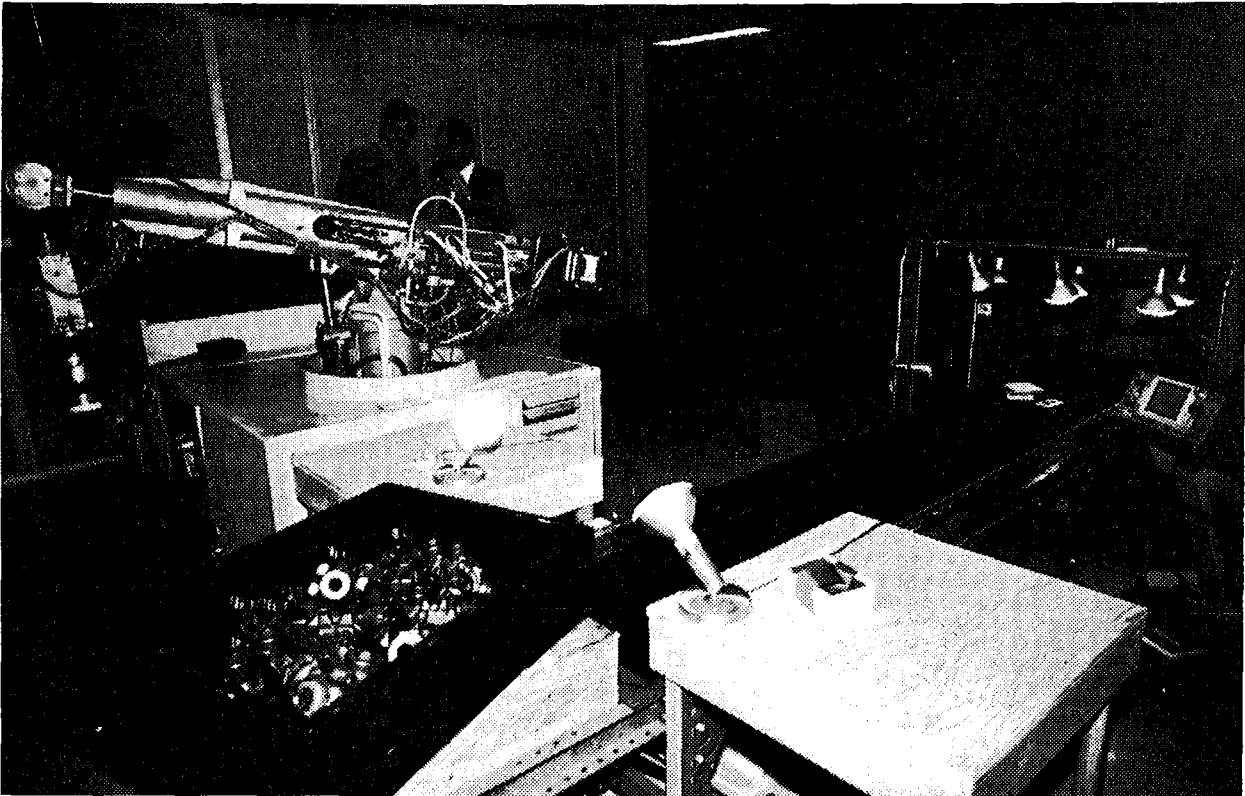


Foto: IPA

Bild 16: "Unimate 2000" vom Stanford Research Institute in den USA ausgerüstet mit einem Magnet-Greifer und einfachem Objekterkennungs-System;

links: hinten Industrie-Roboter,
vorn Kiste mit Teilen

rechts: Förderband und Erkennungsstation

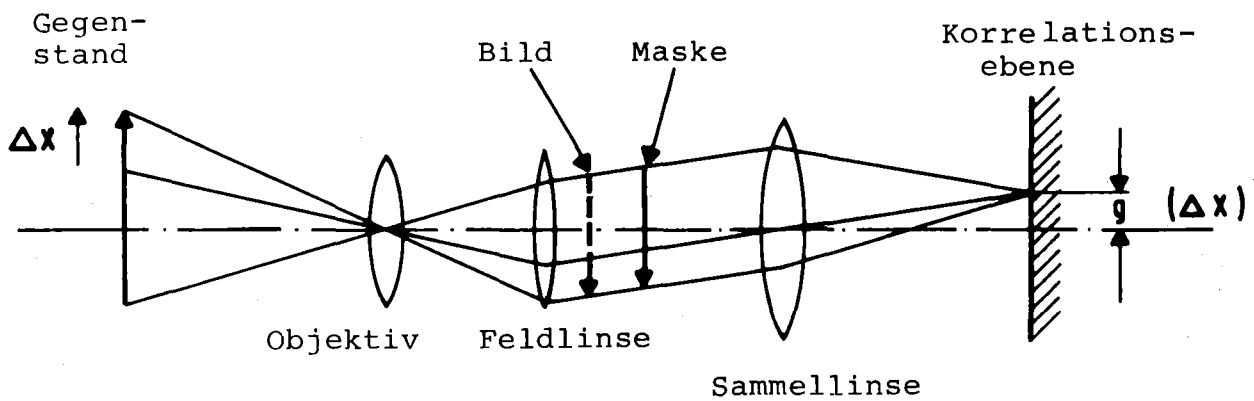


Bild 17: Prinzip eines inkohärent-optischen Korrelators zur Positionsvermessung

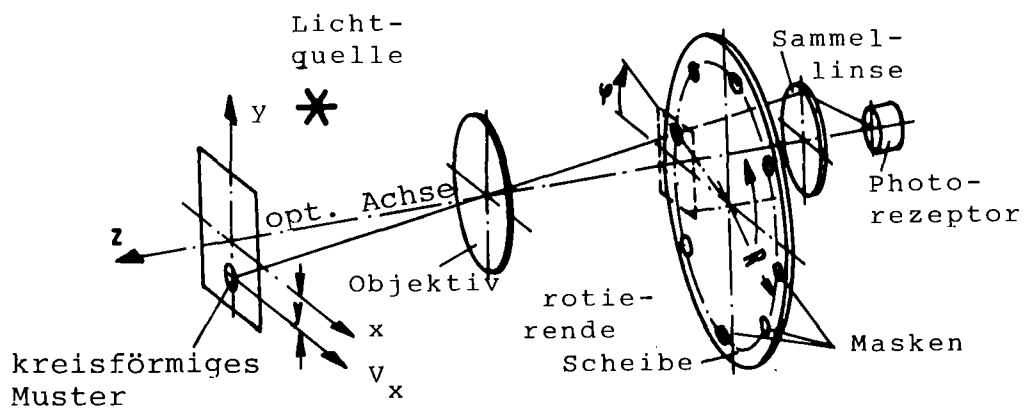


Bild 18: Schema eines Korrelators zur Positionsbestimmung und Klassifikation kreisförmiger Muster (runde Löcher) vom IITB

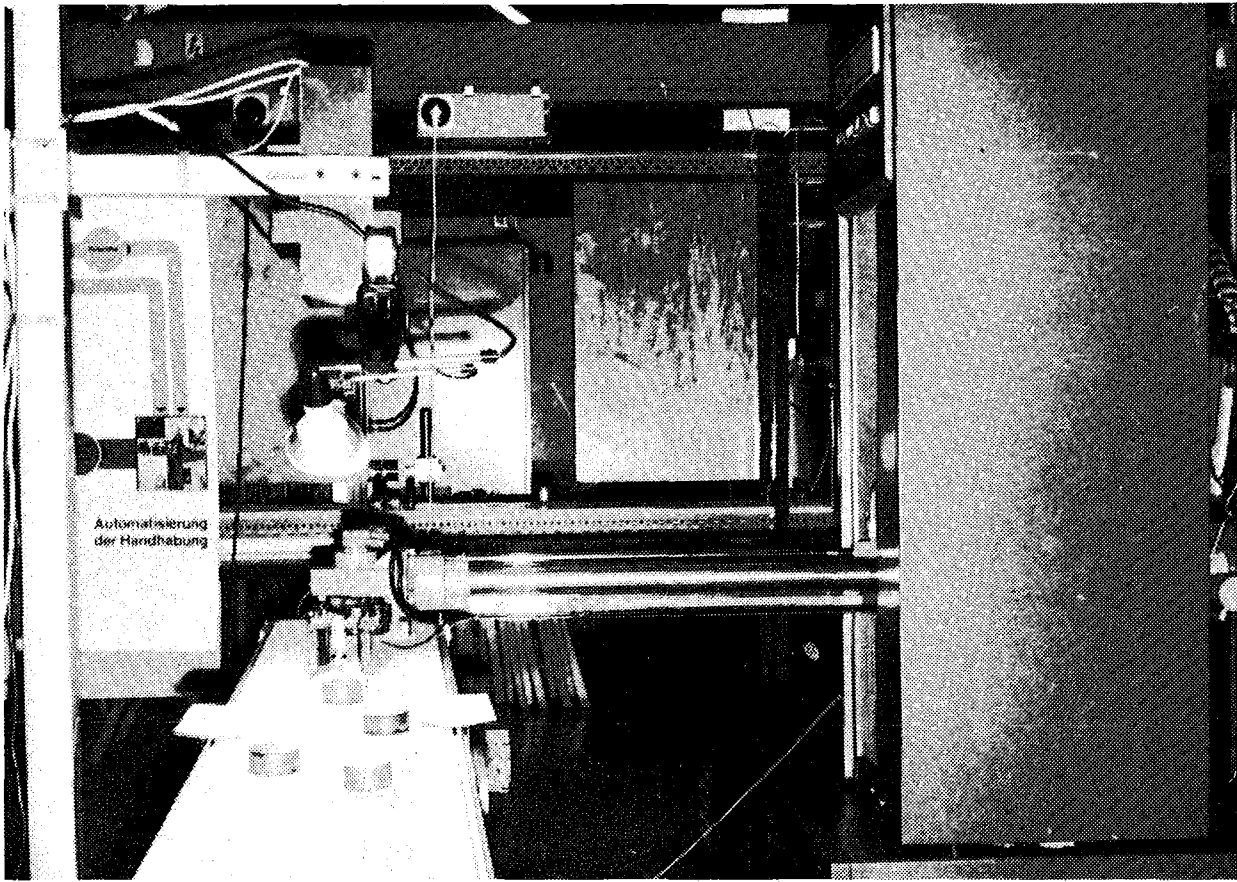


Foto: IPA, BRD

Bild 19: Korrelator vom IITB zur Positionsbestimmung und Klassifikation kreisförmiger Muster verkettet mit einem Industrie-Roboter;

links: oben Korrelator, Mitte Greifer,
unten Förderband mit Teilen

Mitte und rechts: nach vorn ausfahrbarer
Arm bzw. Säule für vertikale
Bewegung des Industrie-Roboters

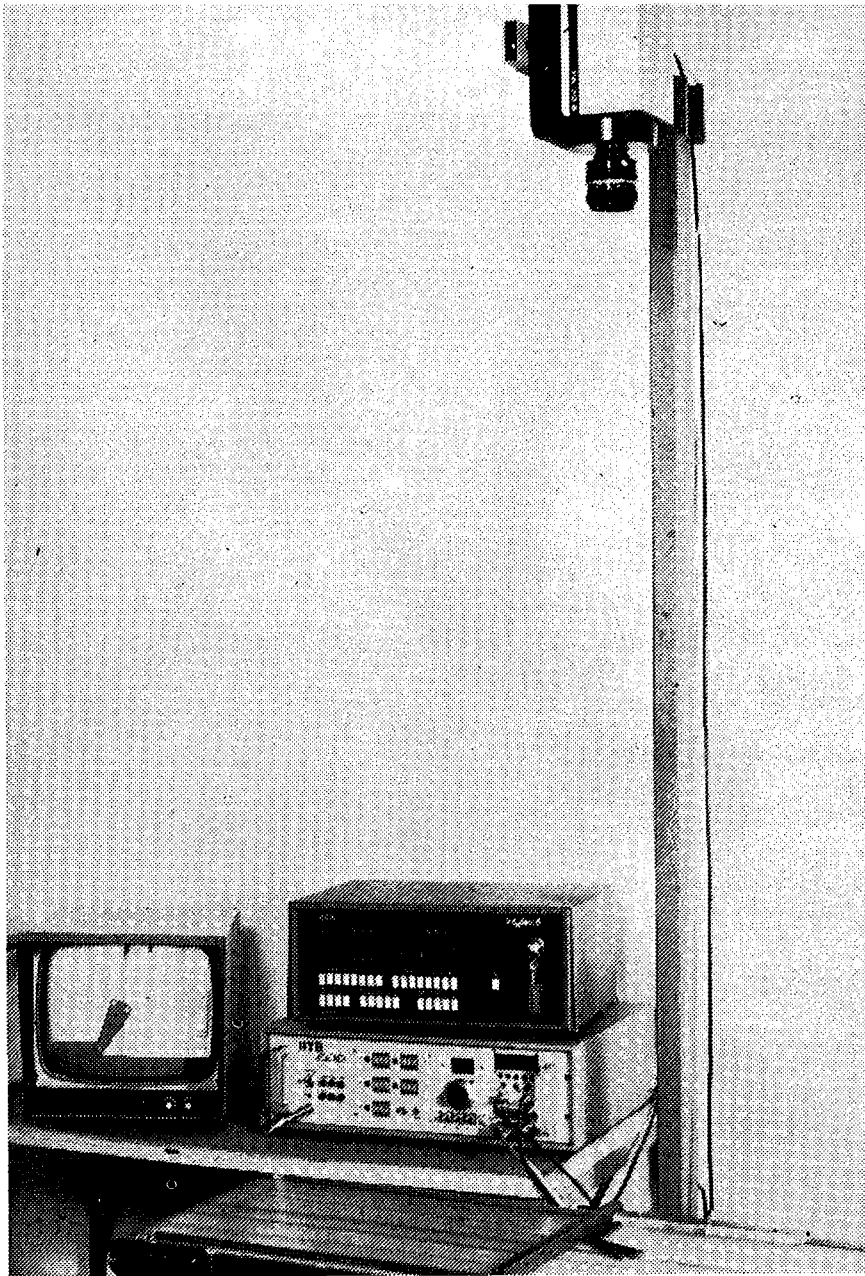


Foto: IITB, BRD

Bild 20: Einfaches Objekterkennungs-System
vom IITB;

oben: Fernsehkamera

unten: im Vordergrund Förderband
mit Anschlag

im Hintergrund Mikroprozessor

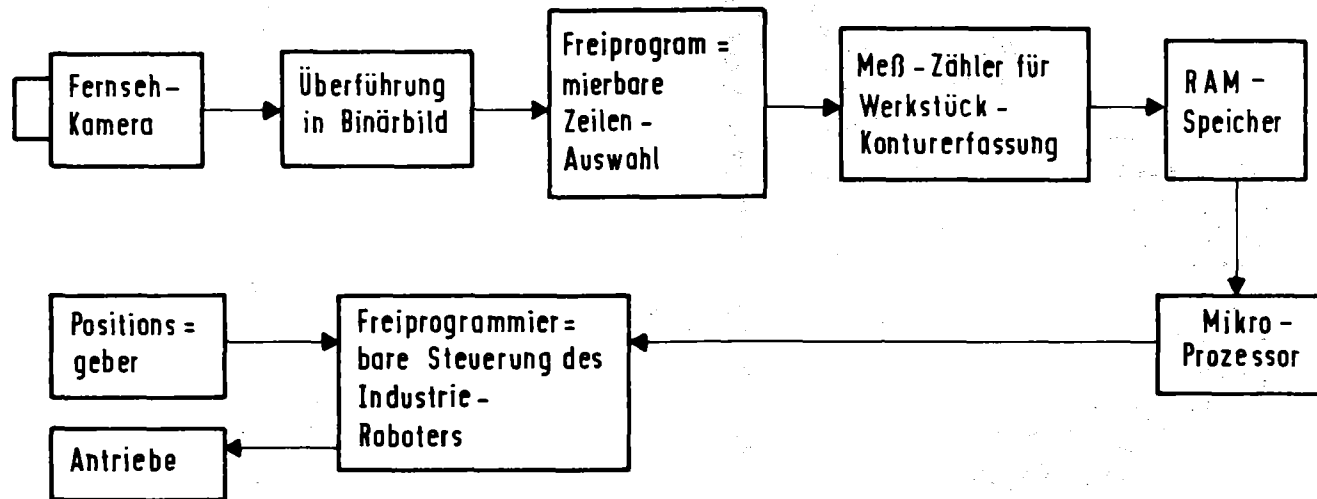


Bild 21 : Industrie-Roboter mit einfachem optischen Werkstück-Erkennungs- und Positionsmeß-System vom IITB

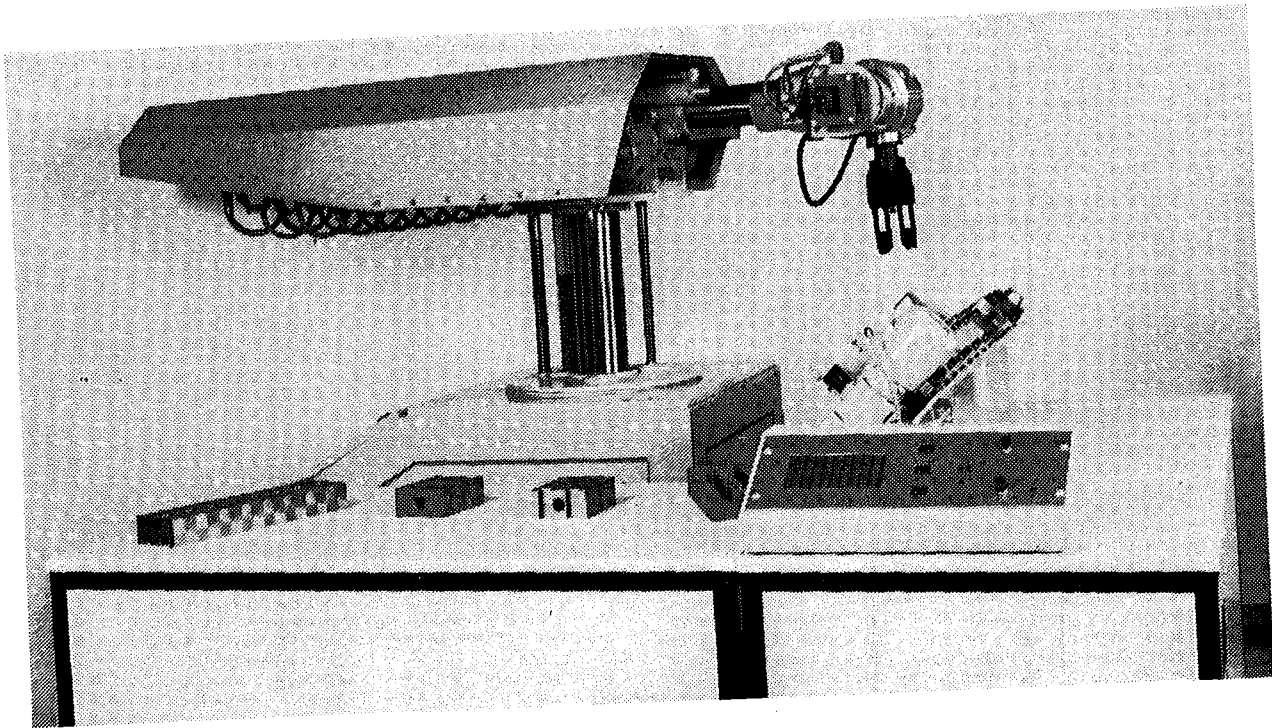


Foto: IBP Pietzsch GmbH., BRD

Bild 22: Vorpositionier- und Erkennungsgerät (rechts)
verkettet mit Industrie-Roboter PPI-PM 12

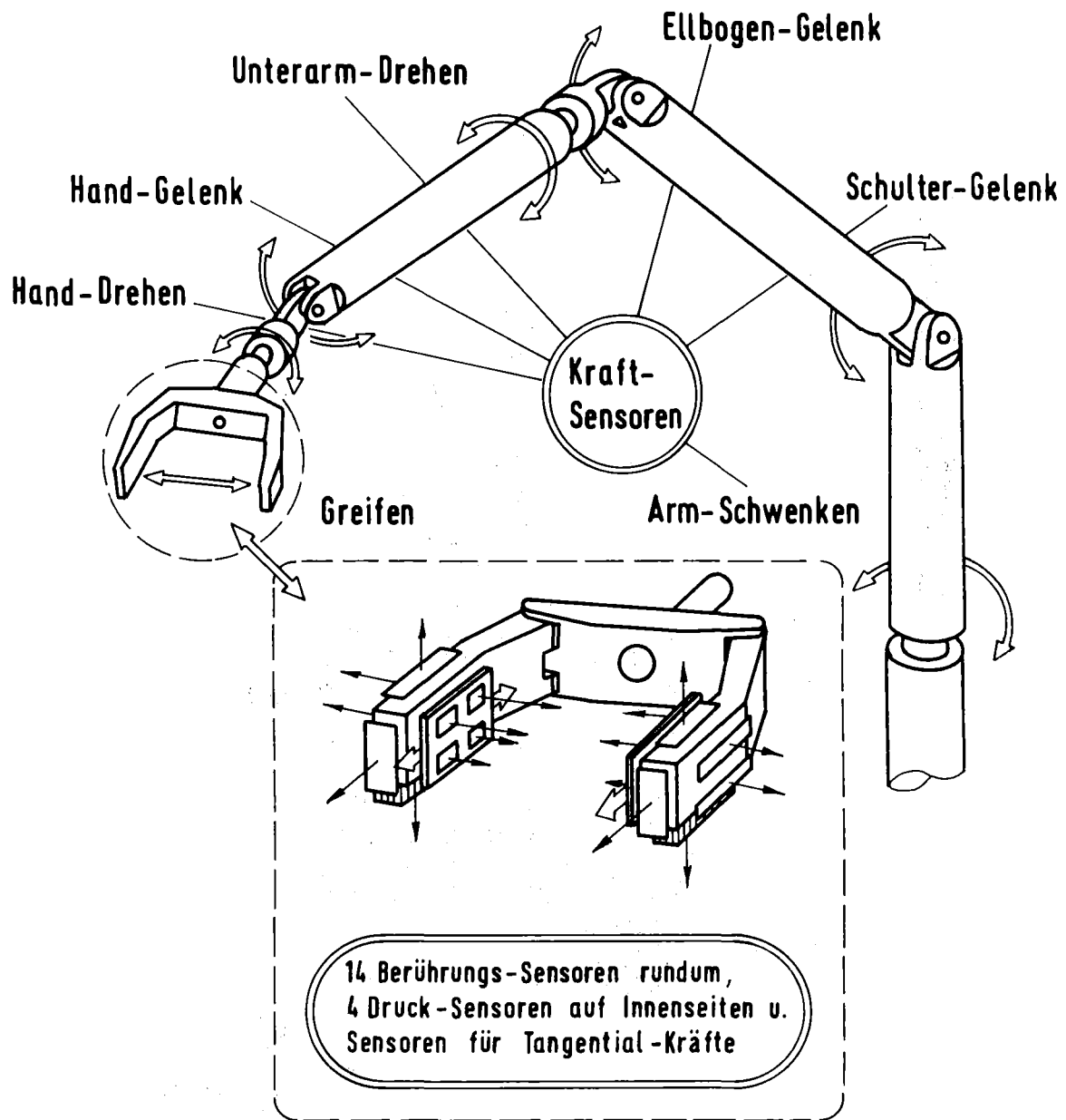


Bild 23: Industrie-Roboter „HI-T-Hand“ der Firma Hitachi, mit zahlreichen verschiedenen Sensoren und Fähigkeit einfache Teile zu unterscheiden

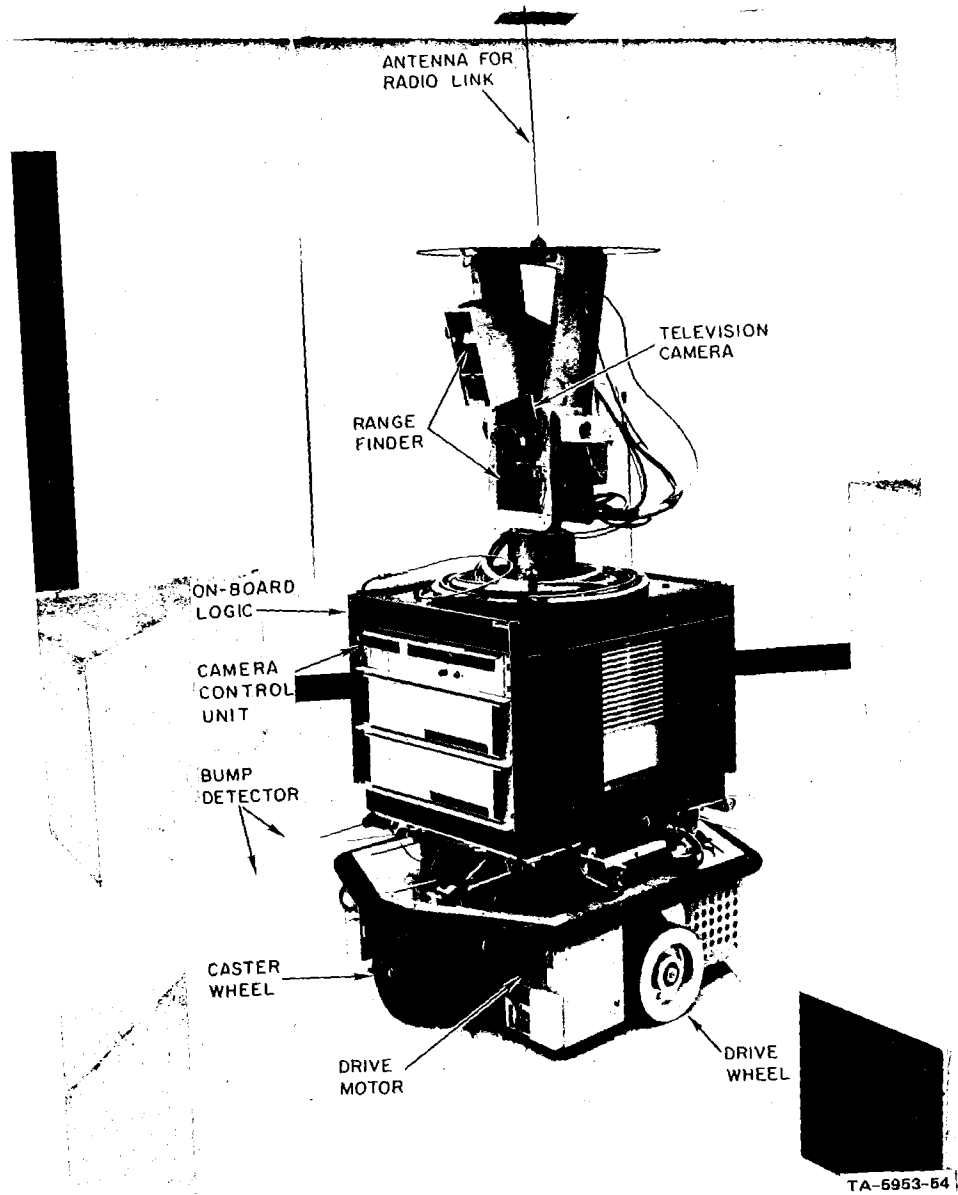


Foto: Stanford Research Institute, USA

Bild 24: Experimental-Roboter-Fahrzeug "Shakey"
mit Planungs- und Lernfähigkeit

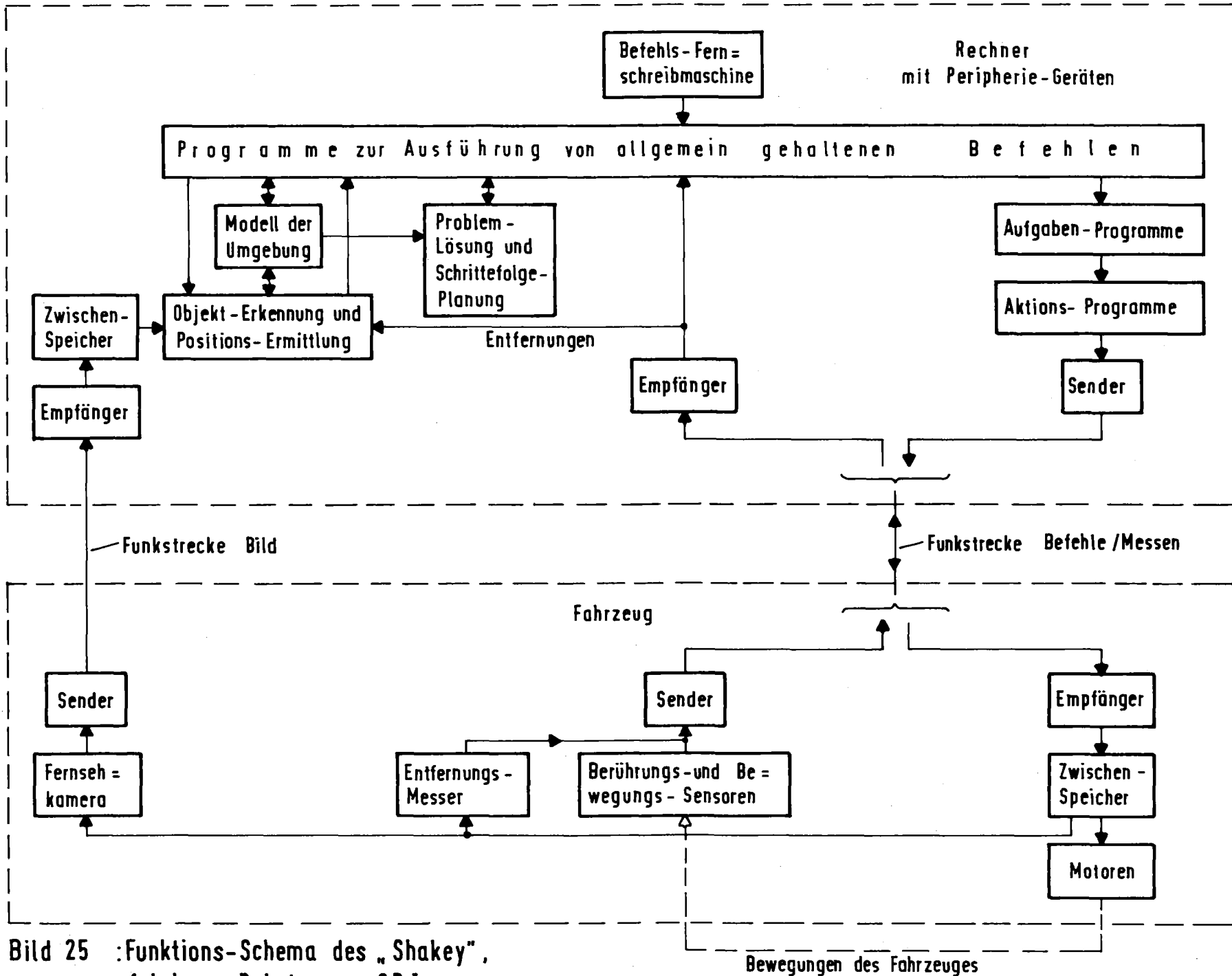


Bild 25 : Funktions-Schema des „Shakey“, fahrbarer Roboter vom SRI

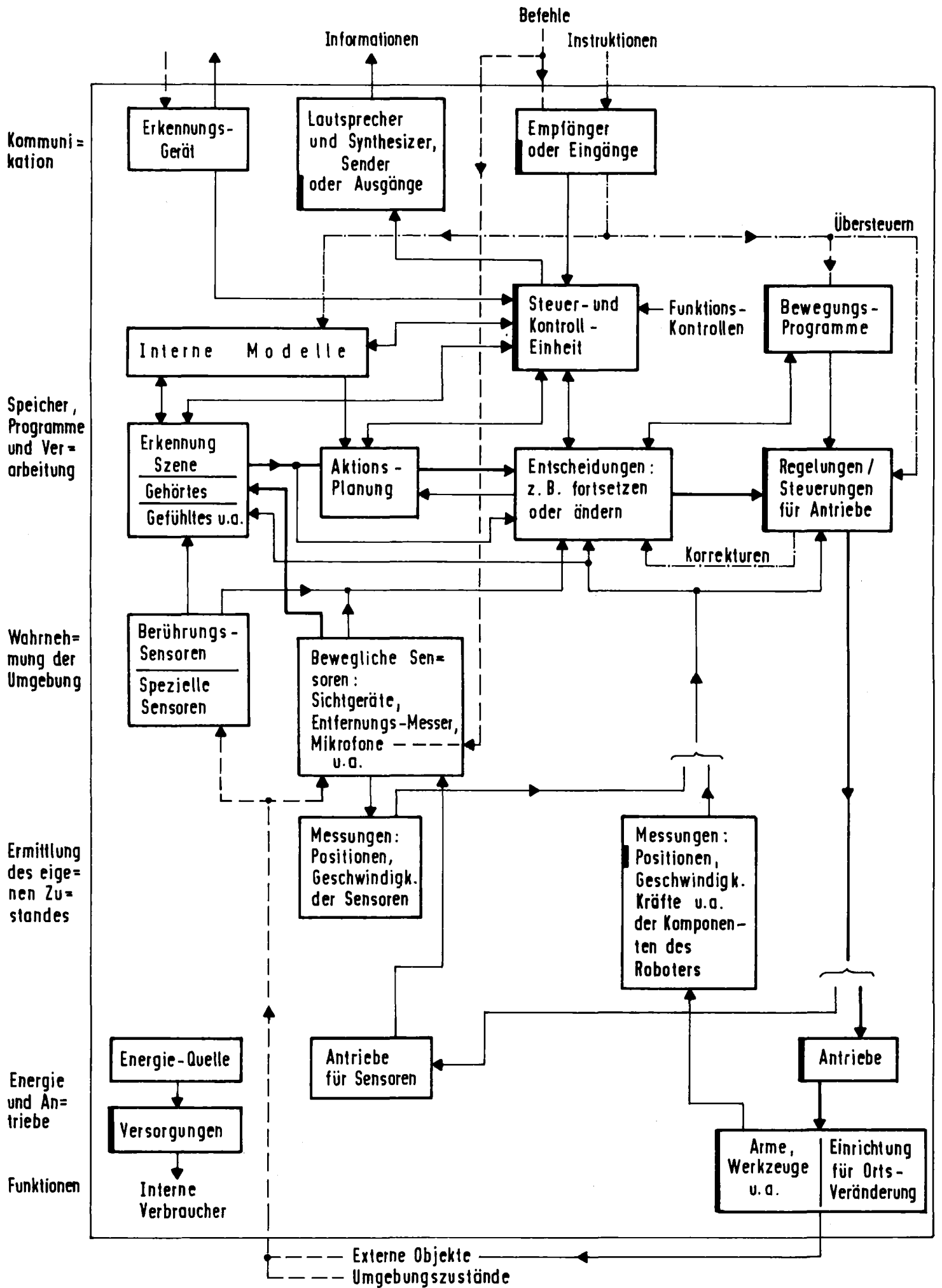


Bild 26: Allgemeines Schema eines Roboters

□ = Komponenten eines Industrie-Roboters der 1. Generation