

# Mechatronik und Robotik

## Kurseinheit 1: Einleitung

Mechatronik:  
Ein technischer und historischer Überblick

U. Borgolte  
M. Gerke  
A. Jochheim

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Anforderungen . . . . .	5
1.2	Historie mechatronischer Komponenten . . . . .	6
1.2.1	Computertechnik . . . . .	6
1.2.2	Stationäre Robotersysteme . . . . .	10
1.2.3	Mobile Robotersysteme . . . . .	20
1.2.4	Gehmaschinen . . . . .	21
1.2.5	Radgetriebene Systeme . . . . .	31
1.2.6	Omnidirektionale Fahrzeuge . . . . .	39

# Vorwort

In den letzten Jahren ist die Notwendigkeit einer fächerübergreifenden Methodik zur Lösung komplexer technischer Problemstellungen deutlich geworden. In der Regel trifft man nämlich auf eine Kombination elektrotechnischer und maschinenbaulicher Komponenten und benötigt zu deren Betrieb verschiedene Verfahren der Regelungs- und Automatisierungstechnik. Meist treten auch informations- und kommunikationstechnische Anwendungen hinzu.

Statt nun eine Vielzahl von Experten unterschiedlicher Ausbildungshintergründe mit der Lösung eines derartigen Problem zu beschäftigen, macht es mehr Sinn den Ausbildungskonflikt zu beheben und die strikte Fächerabgrenzung aufzuheben. Eben dies ist Ziel des Mechatronik-Konzeptes.

In der Mechatronik sollen elektromechanische Systeme und deren elektronische Steuerungen in einer integrativen Ausbildung zusammengefasst dargestellt werden. Wesentliche Inhalte dieser Ausbildung sind die Elektronik (von der Nanotechnologie bis zu modernen Motorsteuerungen), die Mechanik (Kinematik und Dynamik von starren Körpern), der Einsatz von Computertechnologie in Datennetzen sowie der Entwurf von Mensch-Maschine-Schnittstellen. Hinzu treten Aspekte des Systemdenkens beim Produktdesign, der Anlagenplanung und der Berücksichtigung von Endnutzer-Anforderungen.

Dies zeigt, dass Mechatronik keine separate Disziplin der Ingenieurwissenschaften ist, sondern einen Themenbereich in der Schnittmenge klassischer Disziplinen belegt. Darüberhinaus ist dieser Bereich trotz erster Normungsversuche keineswegs wohldefiniert, sondern er läßt noch einen breiten Raum für Interpretationen.

Dies führt dazu, daß verschiedene akademische Lehrer und Buchautoren zu diesem Bereich durchaus unterschiedliche Lehrinhalte darstellen. Meist wird dabei der eigene wissenschaftliche Kompetenzbereich zum Kern der jeweiligen Mechatronik-Darstellungen. Dies ist keineswegs verwerflich, solange die Definitionsphase noch nicht abgeschlossen ist. Im Gegenteil, erst die Vielfalt der Definitionsvorschläge und die jeweils erzeugte Akzeptanz wird es ermöglichen zukünftig den ‘gemeinsamen Nenner’ zu finden.

Vor diesem Hintergrund ist der hier vorliegende Kurs ‘Mechatronik und Robotertechnik’ einzuordnen. Dazu sollen die wichtigsten Randbedingungen benannt sein.

Der Kurs wendet sich an Studierende der Elektrotechnik und setzt bereits Kenntnisse voraus, wie sie etwa während des klassischen Grundstudiums bzw. in einem Bachelor-Studiengang erworben werden. Dies bedeutet, dass z.B. physikalische Grundgesetze der Elektrotechnik, analoge und digitale Schaltungstechnik und die zugehörigen mathematischen Beschreibungsformen hier nicht näher diskutiert werden, wiewohl sie als Bestandteile in einem völlig eigenständigen Lehrbuch als essentiell betrachtet werden müssten. Des Weiteren werden die Bereiche der Kommunikations- und Informationstechnik nur in einem engen Kontext dargestellt, da Studierende auch dazu an anderer Stelle ausführlich Lehrstoff vermittelt bekommen.

Daraus läßt sich im Umkehrschluß herleiten, was dieser Kurs vermitteln will, nämlich die fachliche Auseinandersetzung von Studierenden der Elektrotechnik mit Systemen, die den rein elektrotechnischen Bereich überschreiten. In diesem Sinne wird Mechatronik hier im Wesentlichen auf elektromechanische Systeme bezogen, obwohl im allgemeinen auch verfahrenstechnische Anlagen, Kraftwerke, oder -im Kleinen- Fahrzeuge und Hausgeräte dazugezählt werden können.

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird das Augenmerk der Studierenden in diesem Kurs sehr häufig auf Industrieroboter gerichtet, weil diese Beispielsysteme über eine Vielzahl interessanter Teilsysteme verfügen. Hiermit lassen sich alle Aspekte der Aktorik, Sensorik und die Problematik des Entwurfs von Steuerung und Regelungen konkret diskutieren und die zugehörigen mathematischen Methoden sehr anschaulich darstellen.

So werden Antriebsmotoren ‘nolens volens’ als weitere Beispiele für mechatronische Systeme zwangsläufig als Teilsysteme von Robotern beschrieben, eine Reihe von Meßsystemen und deren Prinzipien mit Blick auf die erforderliche Erfassung von Roboter-Umgebungen aufgeführt, Reglerentwürfe und der Aufbau von Gerätesteuern skizziert und vieles andere mehr.

Im Einzelnen ist diese Kurs wie folgt gegliedert:

- Die Kurseinheit 1 ordnet verschiedene historisch gewachsene Sichtweisen der Mechatronik und beschreibt diverse mechatronische Systeme. Sie wendet sich anschließend Robotersystemen als klassischen mechatronischen Systemen zu. Insgesamt vermittelt sie einen Überblick.
- Die Kurseinheit 2 führt zunächst einen Formalismus zur Beschreibung von Positionen und Orientierungen im Raum ein, und erläutert

verschiedene Transformationen (Euler-Winkel, RPY-Winkel, Drehvektor/Drehwinkel) zwischen räumlichen Lagebeschreibungen.

Sodann wendet sie sich kinematischen Ketten (bestehend aus Starrkörpern und Gelenken) zu und verdeutlicht die Vorteile der homogenen Transformation.

- Die Kurseinheit 3 führt zunächst in die kinematische Beschreibung offener kinematischer Ketten ein. Darauf aufbauend wird die Vorwärts-Transformation eingeführt und am Beispiel eines Industrieroboters verdeutlicht. Anschließend wird das Problem der Rücktransformation diskutiert und am Beispiel von Robotern verschiedene Lösungsverfahren aufgezeigt.
- In Kurseinheit 4 werden verschiedene Verfahren zur Analyse der Dynamik offener kinematischer Ketten vorgestellt und anhand eines ausgewählten Verfahrens die Modellbildung bei Robotern exemplarisch durchgerechnet.

Im zweiten Teil des Kurses (Kurs-Nummer 21602) werden die Themengebiete

- Antriebe,
- Bahnsteuerung,
- Sensorik und
- Kollisionsvermeidung

behandelt.

# 1 Einleitung

## 1.1 Anforderungen

Ingenieurausbildung findet traditionell innerhalb von einzelnen Disziplinen statt, wobei es zu einigen (wenigen) interdisziplinären Überschneidungen kommt. So werden in Vorlesungen des Maschinenbaustudiums auch einige Aspekte der Elektrotechnik besprochen, ebenso wie Elektrotechnik-Studenten einige Grundlagen aus dem Bereich des Maschinenbaues erlernen. Im Prinzip wird damit erkannten industriellen Anforderungen und einer Vielzahl üblicher Anwendungsprobleme begegnet. Auch für Studierende der Informatik werden in der Regel die grundsätzlichen Inhalte der Ingenieurwissenschaften dargestellt. Jenseits der ‘Praktischen Informatik’ hat sich zudem längst der Studiengang der Ingenieurinformatik etabliert.

Dies kommt den Problemen des industriellen Alltages (und somit den Erwartungen zukünftiger Arbeitgeber der Studierenden) entgegen, die nämlich eigentlich einen Ingenieur (oder praktisch orientierten Informatiker) erfordern, der Kompetenz sowohl im elektrotechnischen als auch im maschinenbaulichen Bereich besitzt. Zusätzlich wird Fachwissen im Umgang mit Computertechnologien und bei der Software-Entwicklung gefordert. Ein derart multidisziplinär ausgebildeter Ingenieur sollte mit einem völlig neuen Systemverständnis an die Lösung gestellter Probleme herangehen können, sei es im Bereich des Designs elektromechanischer Produkte, sei es bei Entwurf intelligenter Steuerungskonzepte usw.

## 1.2 Historie mechatronischer Komponenten

### 1.2.1 Computertechnik

Seit Beginn der Industrialisierung bis etwa zum 2. Weltkrieg gab es eine stürmische technische Entwicklung im Bereich der Anlagentechnik und des Maschinenbaues; in dieser Zeit galt die Elektrotechnik (im wesentlichen Energieerzeugung und -übertragung sowie Antriebstechnik) noch als Teilbereich des Maschinenbaues. Eine Steuerungstechnik im heutigen Sinne gab es nicht, statt dessen wurde die Prozeßführung durch Bedienpersonal in Leitwarten und im Feld durchgeführt. Im Bereich der Regelungstechnik gab es zwar erste pneumatische und hydraulische Lösungsansätze zur lokalen automatischen Beeinflussung von Prozeßgrößen, jedoch standen noch keine komplexen Regelungsverfahren zur Verfügung. Diese wären mit den damaligen Regeleinrichtungen auch gar nicht realisierbar gewesen.

Somit datiert eigentlich auch der Beginn des Mechatronik-Zeitalters auf die Erfindung des Transistors im Jahre 1947 (Germanium-Transistor), hergestellt erstmals in den Laboratorien der Bell Telephone Company.

Im Größenvergleich ist dieser Transistor in Abbildung 1 dargestellt<sup>1</sup>.

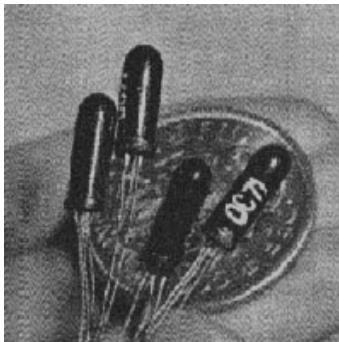


Abbildung 1: Germanium-Transistor der Bell Telephone Company (1947)

Damit verbundenen ist gleichzeitig der Beginn der zweiten Computergeneration, die ausschließlich auf Halbleiter-Bauelementen basiert.

Die rasche Entwicklung der Mikrotechnik (später: Nanotechnik) sorgte für eine generationsweise Verkleinerung der Transistor-Strukturen und führte bald zu ersten integrierten Schaltungen ('integrated circuits'). Die darauf basierende Computertechnik bestand in den Jahren 1960-1970 im Wesentlichen aus

---

<sup>1</sup><http://www.idv.uni-linz.ac.at/bueroaut/elektron/trans.htm> (Februar 2000)

Mainframe-Maschinen. Diese Rechner waren noch sehr groß und benötigten einen erheblichen Zusatzaufwand zur Kühlung.

Ab 1961 erschienen erste Minicomputer (PDP-1) von DEC und wurde beständig weiterentwickelt. Die berühmtesten Nachfahren dieses Rechners waren die PDP-8 und die PDP-11. Diese Computer hatten allesamt noch das Format eines Schaltschranks, wie man auch der Abbildung 2 entnehmen kann<sup>2</sup>.



Abbildung 2: PDP-Serie der Firma DEC

Nach zweijährigen Vorarbeiten brachte die Firma Intel in 1971 den ersten kommerziellen Mikroprozessor auf den Markt, den integrierten Schaltkreis Nummer 4004; er besaß ca. 4000 Transistorfunktionen und war der vierte Prototyp des Bausteins. Durch Exklusivvertrag wurde dieser Mikroprozessor zunächst von der japanischen Firma Busicom für Taschenrechner, aber auch für Meß- und Steuerungsgeräte eingesetzt.

Nach Wiedererlangung der Rechte begann die Weiterentwicklung durch Intel. Im Jahr 1972 erschien der Baustein 8008. Er wurde vermarktet als erster 'computer on a chip'. Das Betriebssystem dazu hieß 'Control Program for Microcomputers' (CP/M).

Der integrierte Schaltkreis Intel 4004 ist in Abbildung 3 dargestellt<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup><http://www.pdp11.de/pdp11/english/seite2.htm> (März 2000)

<sup>3</sup><http://www.mmx.li/intel/museum/25anniv/hof/4004.htm> (März 2000)



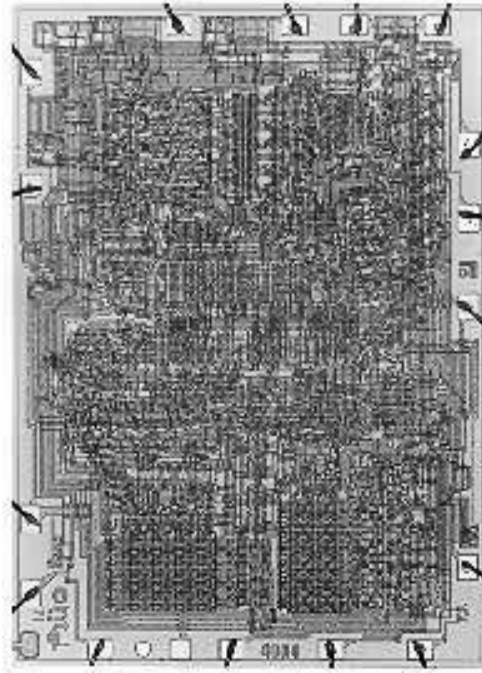


Abbildung 3: Der Intel 4004 Microcomputer

Im militärischen Bereich existierte bereits Mitte 1970 ein Mikroprozessor-Chipsatz, der für das 'TomCat'-Kampfflugzeug der US-Navy entwickelt worden war. Wegen der Geheimhaltungspflicht wurde darüber aber nicht detailliert berichtet.

In der Folgezeit wurden auch von anderen Firmen verschiedene Mikroprozessoren entwickelt. Durch Verbesserung der Herstellungstechnologie wurden größere Schaltdichten pro Chip erzielt.

Auch alternative Konzepte wie Transputer, Signalprozessoren und Microcontroller wurden realisiert und finden für Spezialaufgaben (in 'embedded systems') eine hohe Akzeptanz.

Betrachtet man diese Entwicklung aus der Perspektive des Ingenieurs, der Computertechnik und Datenverarbeitung für elektro-mechanische Systeme einzusetzen gedenkt, so ergibt sich:

Die beständige Weiterentwicklung ermöglichte einen zunehmenden Automatisierungsgrad in technischen Anlagen und Prozessen. Für den im Bereich der elektromechanischen Systeme interdisziplinär arbeitenden Ingenieur sind dabei die schaltungstechnischen Details der analogen und digitalen Elektronik und der Microcomputer wenig relevant. Ihn interessieren deren Anwendung als 'black box' in der zunehmend elektrischen Steuerungs- und Regelungstechnik und der Einsatz von leistungsfähigen Rechnern in der Automatisierungstechnik.

Seit ca. 1980 kam es zu einer massiven Verbreitung von Mikroprozessorbasierten Produkten. Deren Leistungsfähigkeit vervielfältigte sich bei gleichzeitig massiv fallenden Kosten. So haben Mikroprozessoren konsequenterweise inzwischen alle ingenieurtechnischen Arbeitsbereiche erreicht und durchdrungen. So muß der im Bereich elektromechanischer Systeme tätige Ingenieur heute Kompetenz bei der Anwendung von Mikroprozessoren besitzen; diese erstreckt sich auf deren Hardware-Integration (Auswahl, Anpassung, Einsatz) und der zugehörigen Software-Entwicklung (Echtzeit-Programmierung, Peripherie-Ansteuerung, digitale Regelung).

Behält man die skizzierte Entwicklung im Bereich der Computertechnik im Kopf und wendet sich dann den mechatronischen Systemen zu, so erkennt man die starken Abhängigkeiten voneinander. Einerseits benötigte der Entwurf neuer Generationen von Computer-Hardware stets die motivierende Nachfrage durch industrielle und militärische Anwendungen, andererseits war der konzeptionelle Entwurf und die Weiterentwicklung mechatronischer Systeme abhängig vom aktuellen technologischen Stand auch der Computertechnik.

Betrachten wir dazu mit der Entwicklung bei stationären und mobilen Robotern die wohl komplexesten mechatronischen Systeme in terrestrischen zivilen Anwendungen.

## 1.2.2 Stationäre Robotersysteme

Als stationäre Roboter bezeichnet man solche, deren Basis (z.B. der Roboter-Fußpunkt) starr mit der Umgebung verbunden sind, und die daher einen festgelegten Arbeitsraum besitzen. Dabei handelt es sich in der Regel um Roboter, die aus einer Kette starrer Teilkörper bestehen, welche wiederum über Gelenke miteinander verbunden sind. Unterschiedliche Gelenkstellungen führen also zu unterschiedlichen Aufenthaltsorten für den Endeffektor (z.B. den Greifer) des Roboters, also den äußersten Punkt der kinematischen Kette.

Wir werden dazu später ausführlich zurückkehren.

Betrachten wir aber zunächst die historische Entwicklung dieser stationären Robotersysteme. Das Wort *Roboter* selber hat im Verständnis unterschiedlicher Menschen ebenso unterschiedliche Bedeutungen. So findet sich im Brockhaus dazu zunächst die allgemeine Beschreibung:

*der Roboter (slawisch ‘robota’, Arbeit), Bezeichnung für bewegliche Automaten, die Lebewesen nachgebildet sind und deren Funktion zumindest teilweise ausführen können. Besonderes Kennzeichen ‘autonomer Roboter’ ist die Lernfähigkeit (umgebungsorientiertes Handeln über Sensoren und Aktuatoren).*

Zum Begriff des *Industrieroboters* erläutert der Brockhaus etwas konkreter:

*Programmierbare Automaten, mit Greifern (zu Montage-, Messarbeiten u.ä.) oder Werkzeugen (z.B. Punktschweißzangen, Lackierpistolen), oft sensorgeführt, vielseitig einsetzbar.*

Das Wort ‘Roboter’ wurde von dem tschechischen Dichter Karel Capek kreiert, in dessen Theaterstück ‘Rossumaj universal robotj’ (dt. ‘Werstands universale Roboter’) die Gefahren der übermäßigen Technisierung der Welt kritisiert wurden. Er bezeichnete dort die in einer Fabrik eingesetzten künstlichen Arbeiter als Roboter; das Wort ‘roboty’ bedeutet im traditionellen tschechischen Sprachgebrauch ‘Fronddienst’.

Obwohl also das Wort seit ca. 1920 durch die Literatur eingeführt war, dauerte es bis Ende der 1940er Jahre, bis ein -vergleichsweise einfaches- technisches Äquivalent realisiert wurde. Die *Oak Ridge and Argonne National Laboratories* in den USA konstruierten damals einen ‘Master-Slave-Manipulator’ zur Handhabung von radioaktivem Material. Hierbei wurde der Master-Manipulator von einem menschlichen Bediener manuell manövriert, und die angekopp-

pelte Slave-Mechanik führte die entsprechende Bewegung räumlich getrennt und unter Aufbringung verstärkter Kräfte und Momente durch.

Der erste programmierbare mechanische Manipulator wurde (etwa 1959) von George Devol konstruiert und in Zusammenarbeit mit Joe F. Engelberger so weit verfeinert, bis daraus der Unimate Industrieroboter entstand und von der gemeinsamen Firma Unimation (1961) vertrieben wurde. Dieser Roboter besaß eine NC-Steuerung, die Schrittbefehle wurden auf einer Magnettrommel gespeichert. Der Unimate-Roboter wurde bei der General Motors Company eingesetzt zur Handhabung von heißen Metallteilen bei der Druckguß-Bearbeitung.

Ein Modell dieses Roboters ist in Abbildung 4 wiedergegeben<sup>4</sup>.

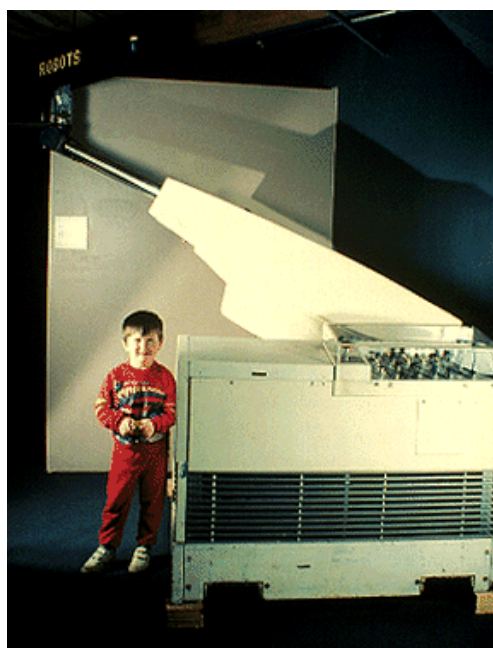


Abbildung 4: Der erste Industrieroboter Unimate im Einsatz bei General Motors

Zu dieser Zeit standen zwar schon geeignete Technologien zum Aufbau einer Roboter-Kinematik und zu deren Ausstattung mit Motoren, Getrieben und Sensoren zur Verfügung. Auch gab es bereits eine fortgeschrittene Theorie der linearen Regelungstechnik, um analoge Systeme akzeptabel zu beherrschen. Allerdings besaßen diese analog-gesteuerten Roboter erhebliche Mängel, die erst durch die kostengünstige Verfügbarkeit von Minicomputern (später: Mi-

---

<sup>4</sup><http://www.ar2.com/ar2pages/uni1961.htm> (September 2001)

krocomputer) und die Digitalisierung der Regelungstechnik behoben wurden. So war es kaum möglich, die frühen Analog-Robotersysteme flexibel zu programmieren. Die eingesetzte Technik zur Erzielung von Bewegungssequenzen (z.B. Heb-Drehwähler aus der Telefontechnik, Potentiometer-Arrays) erlaubte nur beschränkte Bahnbewegungen.

Lange Zeit blieb Unimation die einzige Firma, die ernsthaft die Forschung an und die Entwicklung von Industrierobotern betrieb. Lediglich einige Forschungsinstitute wie das Stanford Artificial Intelligence Lab und das MIT Lincoln Lab entwickelten eigene Roboter, z.B. mit taktilem Sensorik und unter Einsatz von Bildverarbeitungssystemen.

Der STANFORD-Roboter war ein Roboter mit einem Schubarm, das heißt eines seiner Armgelenke war translatorisch. Bezeichnet man -wie bei 6-achsigen Robotern üblich- die ersten 3 Robotergelenke als Armgelenke (diese entsprechen den 3 Grundachsen, also den ersten Achsen von der Roboterbasis aus gesehen), und die folgenden 3 Gelenke als Handgelenke, so trat beim STANFORD-Arm nach zwei rotatorischen Gelenken an dritter Stelle in der kinematischen Kette ein translatorisches Gelenk auf.

Diese Achsanordnung ist in Abbildung 5 deutlich zu erkennen<sup>5</sup>.

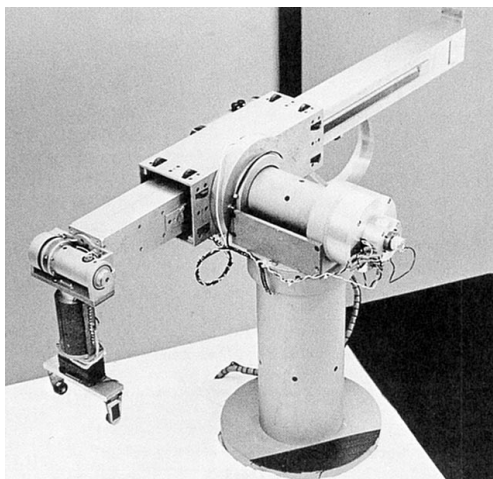


Abbildung 5: Der STANFORD-Arm

Schubgelenke sind etwas aufwendiger zu realisieren als Drehgelenke, da die bewegungserzeugende Rotation eines Motors erst in eine Translationsbewegung umgesetzt werden muß. Dies ist zwar prinzipiell kein Problem, geht jedoch stets zu Lasten einer kompakten Bauweise.

---

<sup>5</sup>R.P. Paul; Robot Manipulators, MIT-Press, 1981

Dieser STANFORD-Arm ist zur Verdeutlichung seiner Bewegungsmöglichkeiten noch einmal in Abbildung 6 skizziert<sup>6</sup>.

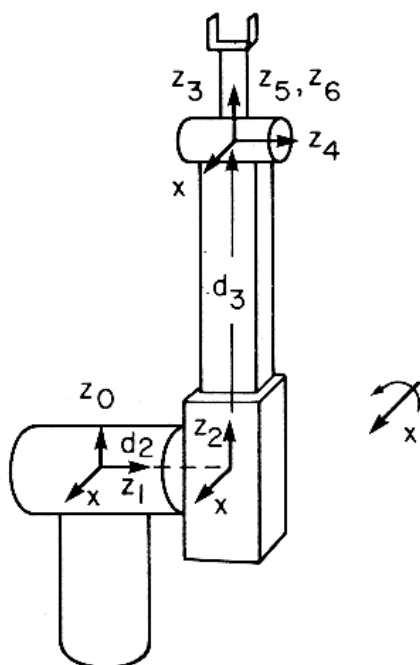


Abbildung 6: Schematische Darstellung des STANFORD-Arms

Etwa gegen 1973 brachte die US-Firma 'Cincinnati Milacron' den  $T^3$ -Roboter ( $T^3 =$  The Tomorrow Tool) auf den Markt; dies war ein Industrieroboter für den Einsatz mit schweren Lasten.

Der für den Stanford-Roboterarm verantwortliche Wissenschaftler Victor Scheinman verließ 1974 das Forschungsinstitut und kommerzialisierte den Roboter in seiner Firma Vicarm Inc.; dieser Roboter wurde von der NASA bei den Mars-Missionen Viking I und Viking II benutzt. Im Jahr 1977 kaufte Unimation diese Firma auf und produzierte ein Jahr später gemeinsam mit General Motors den 'berühmten' PUMA-Roboter (Programmable Universal Machine for Assembly).

Der PUMA-Roboter, seine Steuerung sowie das Handbediengerät sind in Abbildung 7 wiedergegeben<sup>7</sup>.

<sup>6</sup>R.P. Paul; Robot Manipulators, MIT-Press, 1981

<sup>7</sup>R.P. Paul; Robot Manipulators, MIT-Press, 1981



Abbildung 7: Der Unimate PUMA-Roboter

Dieser Roboter gehört in die Klasse der weitverbreiteten Knickarm-Roboter mit 6 rotatorischen Gelenken; bei einer 'sinnvollen' konstruktiven Anordnung der 6 Drehachsen kann ein derartiger Roboter jede Position in seinem Arbeitsraum in jeder Orientierung erreichen. Beide Forderungen sind in der Regel gleichzeitig wichtig, da ein Robotergreifer an einer bestimmten Position  $(x, y, z)$  in seinem Arbeitsraum eine Aufgabenstellung zu erfüllen hat. Soll beispielsweise ein Stab in eine passende Öffnung eingeführt werden, so ist der Robotergreifer geeignet zu orientieren, dass der Längsvektor des Stabes mit dem Normalenvektor auf der Lochöffnung übereinstimmt. Der sechssachsige Roboter mit Knickarm ist noch einmal schematisch mit seinen 6 Drehachsen  $z_1, \dots, z_6$  in Abbildung 8 skizziert<sup>8</sup>.

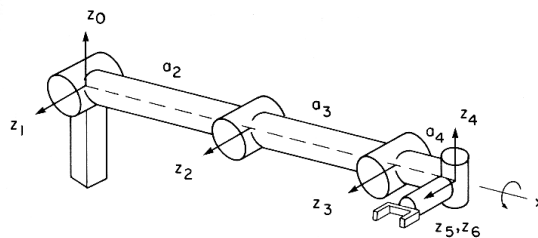


Abbildung 8: Schematische Darstellung des PUMA-Roboters

<sup>8</sup>R.P. Paul; Robot Manipulators, MIT-Press, 1981

Etwa gleichzeitig mit der Entwicklung des PUMA-Roboters begann auch bei Asea Brown Boveri Ltd. (ABB) der Vertrieb von Microcomputer-gesteuerten Robotern.

Ein weiterer früher Roboter vom Knickarm-Typ ist der Cybotech Vertical 80 der Firma Cybotech, der in Abbildung 9 dargestellt ist<sup>9</sup>.

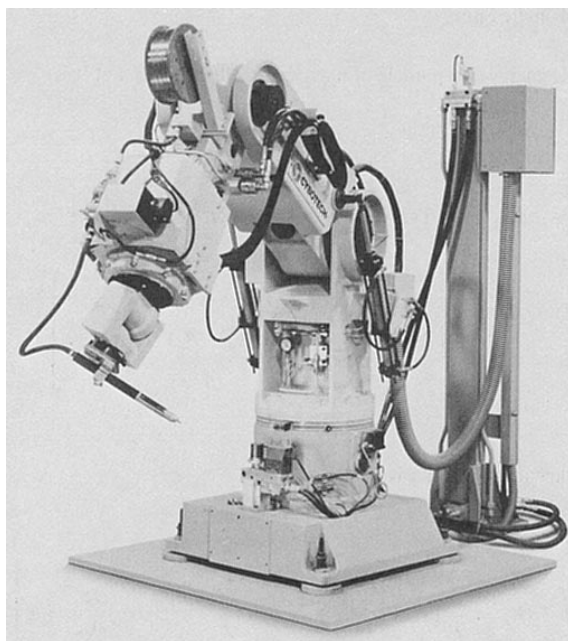


Abbildung 9: 'Cybotech Vertical 80' Roboter

Die Starwars-Trilogie schrieb 1977 Filmgeschichte und machte gleichzeitig durch den Roboter-Androiden C3PO und das mobile Robotersystem R2D2 ein Massenpublikum auf technische Entwicklungen bei Robotersystemen aufmerksam.

Anfang der 1980er Jahre gründeten die Firmen Fanuc Ltd. und General Motors Company ein Joint-Venture mit dem Namen 'Fanuc Robotics North America Inc.'. Dieses wird schnell zum führenden Hersteller für den US-amerikanischen Markt.

Ein Schwerlast-Roboter aus dem Produktsortiment von FANUC ist in Abbildung 10 wiedergegeben<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup>R.P. Paul; Robot Manipulators, MIT-Press, 1981

<sup>10</sup><http://www.fanucrobotics.com/> (September 2001)





Abbildung 10: Der FANUC S-900 Schwerlast-Roboter

Der dargestellte Schwerlast-Roboter vom Typ FANUC S-900 iW besitzt 6 Rotationsachsen und gehört damit zur Familie der Knickarm-Roboter. Die maximale Last beträgt 400 kg, die maximale Ausfahrlänge ist ca. 2500 mm und die Wiederholgenauigkeit seiner Positionierung im Raum liegt bei 0,5 mm. Die drei mechanisch am stärksten belasteten Grundachsen verfahren jeweils mit einer Maximalgeschwindigkeit von  $95^\circ$  pro Sekunde, die äußere Achse (Endflansch der Roboterhand) erreicht sogar  $160^\circ$  pro Sekunde.

Aber auch in Europa (z.B. Deutschland: Kuka, Reis) und in Asien (z.B. Japan: Mitsubishi, Honda, Epson) entstehen Firmen (bzw. neue Firmensegmente) mit anspruchsvollen und konkurrenzfähigen Produktpaletten im Roboterbereich.

So ist die japanische Firma EPSON zwar zunächst mit Druckern auf dem Weltmarkt erschienen und bekannt geworden, inzwischen sind jedoch auch ihre Roboterprodukte weit verbreitet. Insbesondere ist diese Firma für ihre SCARA-Roboter bekannt geworden. Diese so genannten Horizontal-Knickarmroboter verfügen über zwei parallel zueinander angeordnete rotatorische Achsen, gefolgt von einer senkrecht wirkenden translatorischen Achse. Die vierte Achse ist dann wieder rotatorisch. Der SCARA-Typ geht auf die US-Firma ADAPT zurück; er eignet sich insbesondere für Montage- und Handling-Aufgaben. Hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erlau-

ben kurze Zykluszeiten in der Fertigung. Üblicherweise werden diese Roboter nicht mehr mit drei weiteren Handachsen ausgebaut, sondern es folgt meist nur noch eine vierte Drehachse mit unabhängiger senkrechter Drehooption.

Einige SCARA-Roboter der Firma EPSON sind in Abbildung 11 zu sehen<sup>11</sup>.



Abbildung 11: Modelle der Scara E-Serie von EPSON

Der SCARA-Roboter ist erkennbar **degeneriert**, da mit nur 4 Bewegungsachsen die Forderung nach Erreichbarkeit aller Positionen des Arbeitsraumes in beliebiger Orientierung nicht mehr erfüllt werden kann. Dazu bedarf es, wie erwähnt, sechs konstruktiv sinnvoll angeordneter Achsen.

Überschreitet man die Zahl von 6 unabhängigen Bewegungsachsen, so erzielt man sogenannte **redundante Kinematiken**, bei denen das Positions- und Orientierungsproblem mehrdeutig ist, da es auf verschiedene Weisen lösbar wird. Hier bedarf es wiederum eines erhöhten Aufwandes, um eine Entscheidung zwischen den Mehrdeutigkeiten zu treffen.

Der kanadische Roboterarm des Space Shuttle sowie der weiterentwickelte Arm 'Canadarm2' der internationalen Raumstation ISS sind derart redundante Kinematiken; 'Canadarm2' wiegt etwa 2000 Kilogramm und ist ca. 19 Meter lang. 7 Gelenke des Arms sind angetrieben. Damit ist 'Canadarm2' größer und stärker als der Arm des Space-Shuttle. Zudem kann er mit beiden Enden wahlweise an der Raumstation ISS andocken und sich auf diese Weise sogar wurmartig fortbewegen. Eine Fallstudie zu diesem Arm, hier noch mit

---

<sup>11</sup><http://www.epson.de/robots/german/product/scaras/eserie/index.htm> (November 2001)

einem mobilen Service-System als Arm-Basis und einer 15-gliedrigen Hand ist in Abbildung 12 gezeichnet<sup>12</sup>.



Abbildung 12: Ein mobiles Service-System mit ‘Canadarm2’ und zusätzlichem Hand-Modul als Fallstudie

Der Arm selber ist bereits realisiert; er wurde im April 2001 zur ISS transportiert und in Betrieb genommen.

---

<sup>12</sup><http://www.liftoff.msfc.nasa.gov/News/2001/News-STs100.asp> (November 2001)

Rein kartesische Roboter besitzen senkrecht zueinander angeordnete Linear-Achsen. Sie werden als so genannte Portalroboter häufig in Warenlagern und Fertigungshallen zum Transport von Gütern eingesetzt.

Als Kleinroboter mit quaderförmigem Arbeitsraum finden sie nur selten Einsatz. Die linearen Bewegungen der Achsen werden üblicherweise über Spindeln erzeugt. Dabei treten auf Grund der Baulängen sehr große rotatorische Massenträgheitsmomente der Spindeln auf; andererseits besitzen diese Systeme ein hohes lineares Beschleunigungsvermögen.

Ein kartesischer Roboter der Firma EPSON ist in der Abbildung 13 dargestellt<sup>13</sup>.



Abbildung 13: Kartesisch operierender Roboter der Firma EPSON

---

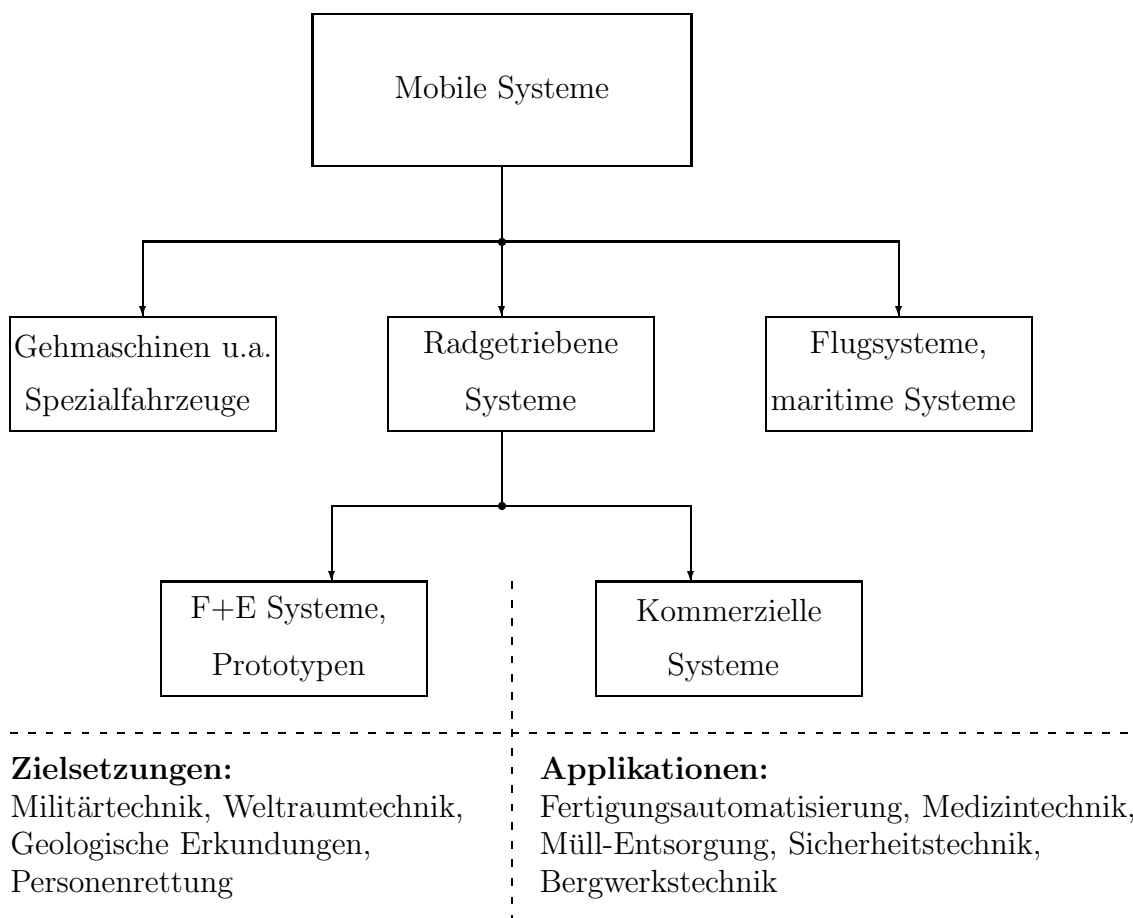
<sup>13</sup><http://www.epson.com/robots/german/product/kartesische/index.htm> (November 2001)

### 1.2.3 Mobile Robotersysteme

An Universitäten und Instituten richtet sich das Forschungsinteresse inzwischen auch auf Gehmaschinen, humanoide Roboter und autonome mobile Systeme für den Service-Bereich (medizinische Robotik, mobile Systeme zur Unterstützung behinderter und älterer Menschen, intelligente Sondermaschinen: Weltraum, Militär etc.).

Wegen der Vielzahl von Spezialentwicklungen im militärischen und im Forschungsbereich ist eine umfassende Beschreibung verschiedener Systeme nicht möglich. Lediglich der Markt für kommerziell erhältliche zivile Systeme präsentiert sich noch recht übersichtlich.

Die Gliederung soll daher ohne Anspruch auf Vollständigkeit nur eine grobe Sortierung liefern.



Bei den landgestützten Systemen unterscheidet man kinematisch die sogenannten Gehmaschinen und die radgetriebenen Fahrzeuge.

Diese grenzen sich somit ab von den nicht-bodengestützten Systemen, also jede Form von Flugkörpern und Schiffen. Letztere sind unzweifelhaft von hohem wissenschaftlichen Interesse und wegen der sich ergebenden zusätzlichen Freiheitsgrade der Bewegung eine echte Herausforderung. Dennoch stellen sich für derartige Systeme viele der in dieser Arbeit betrachteten Problemstellungen deutlich andersartig dar. So ist die regelungstechnische Behandlung dieser Systeme häufig kompliziert (autonome Helikopter), andererseits die Bahnplanung und Kollisionsvermeidung durch die Besonderheiten des Bewegungskontinuums erleichtert.

Nicht-bodengestützte Systeme sollen im Folgenden nicht weiter betrachtet werden, um den Rahmen des Kurses nicht zu sprengen.

#### 1.2.4 Gehmaschinen

Gehmaschinen haben eine eigene Faszination. Dies liegt vermutlich daran, dass sie humanoide Merkmale besitzen, die uns vertraut erscheinen (und vielleicht dadurch auch wieder befremden).

Grundsätzlich ist die Fortbewegung auf Beinen die natürlichste aller Bewegungsformen, erprobt seit Hunderten von Millionen Jahren bei einer Vielzahl von Lebensformen. Diese Form der Bewegung hat sich nicht grundlos bei Landlebewesen durchgesetzt. Sie ist die einzige akzeptable Fortbewegung, die den Bodenbeschaffenheiten in der Natur gerecht wird.

Im Vergleich zur radgetriebenen Bewegung besitzt das Gehen in einer natürlichen Umwelt viele Vorteile:

- Auf unebenem Terrain erreichen Tiere (als Vorbilder der Gehmaschine) im Durchschnitt eine höhere Geschwindigkeit als Kettenfahrzeuge und sie sind den radgetriebenen Fahrzeugen dort deutlich überlegen.
- Die von Tieren erreichbare Geschwindigkeit auf unebenem Boden geht einher mit einer ausgezeichneten Energiebilanz. Diese ist bei rad- und kettengetriebenen Systemen deutlich ungünstiger.
- Radgetriebene Fahrzeuge erreichen ihre Vorteile als schnelles Bewegungsmittel nur bei enormen künstlichen Eingriffen in die Bodenbeschaffenheit, also durch Asphaltierung, Bodenbegradigung, Brücken- und Tunnelbau. Bewegen sich diese Systeme hingegen in natürlichen Umwelten, so erzeugen die Bewegungen des Rades bzw. der Ketten er-

hebliche Boden-Depressionen und Verwerfungen. Die Fußabdrücke von Tieren sind für die Umwelt vergleichsweise unerheblich.

- Trotz gigantischer Anstrengungen zur autogerechten Gestaltung unserer Umwelt bleiben doch riesige Regionen der Erde langfristig nicht befahrbar für Rad- und Kettenfahrzeuge. Hingegen sind Tiere, die sich auf Beinen bewegen, in allen Landschaften unserer Erde vertreten (Schafe und Ziegen in Gebirgsregionen, Nagetiere in allen Wüsten, Amphibien in Sümpfen und Feuchtgebieten).
- Auf unebenem Boden ist die Fortbewegung auf Pferden (als klassischer natürlicher Gehmaschine, die zu Transportzwecken eingesetzt wird) deutlich komfortabler als die in Offroad-Fahrzeugen.

Es war also nicht eine Unfähigkeit der Natur, dass sie kein Rotationsgelenk ‘erfunden’ hat, welches eine dauerhafte Drehbewegung erlaubt. Vielmehr war es nüchternes Kalkül mit Blick auf die natürliche Umwelt der Lebewesen.

Dennoch ist es natürlich nicht wirklich gerecht die im Laufe der Evolution über Jahrmillionen hinweg entstandenen Lebewesen mit radgetriebenen technischen Systemen zu vergleichen, deren Bewegungsprinzip seit wenigen Jahrtausenden erfunden ist, und deren technische Entwicklung eigentlich erst mit der Erfindung moderner Antriebsmaschinen verbunden ist.

Dazu nämlich müßte man radgetriebene Fahrzeuge mit technischen Gehmaschinen vergleichen; hierbei trifft man jedoch auf Gehmaschinen, die bisher keineswegs die Vorzüge der Vorbilder aus dem Tierreich aufweisen.

Immerhin weisen erste Patente zu Gehmaschinen darauf hin, dass zum Ende des 19. Jahrhunderts der Gedanke an die Konstruktion einer technischen Gehmaschine reifte.

George Moore stellte im Jahre 1893 eine Konzeptzeichnung zu einer zweifüßigen Gehmaschine vor, die mit Dampf angetrieben wird; er nannte sie ‘steam man’.

Ein erstes Patent wurde angemeldet für das ‘mechanische Pferd’ von L.A. Rygg; allerdings wurde diese Konstruktion niemals wirklich realisiert. Ebenfalls vierbeinig war der Streitwagen, den Baron von Bechtolsheim 1913 zum Patent anmeldete. Beide Patente sind in den nachfolgenden Abbildungen 14 und 15 dargestellt<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup>[http://www.fzi.de/ids/WMC/walking\\_machines\\_Katalog/node14.html](http://www.fzi.de/ids/WMC/walking_machines_Katalog/node14.html)

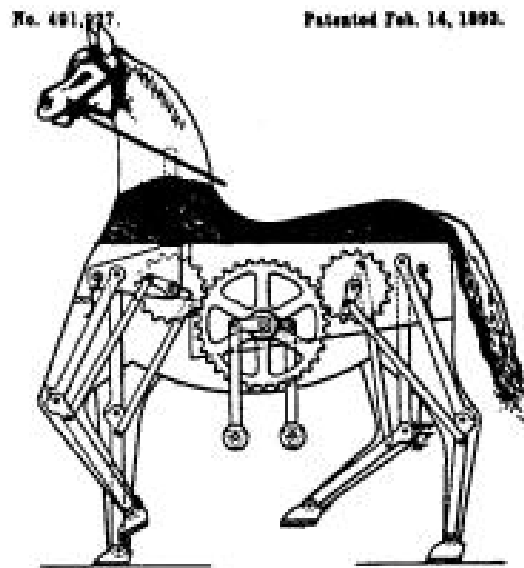


Abbildung 14: Patentzeichnung zum 'mechanischen Pferd' von 1893

Eine kurze Ursachenforschung zur späten und langsamen Entwicklung bei den Gehmaschinen ist angebracht: im Gegensatz zu radgetriebenen Fortbewegungsmitteln ist der Fortschritt bei künstlichen Gehmaschinen stark beeinträchtigt durch die Komplexität der nachzubildenden Gehbewegung.

Dies liegt einerseits an einem mangelnden Verständnis von Gehbewegungen und Schrittmustern, das sich erst in jüngerer Zeit durch den Einsatz moderner Videotechnik und computergestützter Bewegungsanalyse durch Zoologen beseitigen ließ.

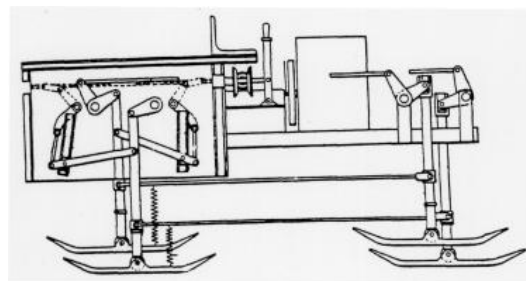


Abbildung 15: Patentzeichnung des Bechtolsheim'schen Streitwagens von 1913



Andererseits fehlte lange Zeit ein wirklich brauchbares maschinelles Bein, welches mechanisch und aktorisch den Ansprüchen an eine Gehmaschine genügt. Grundsätzlich läßt sich die Problematik bei der Entwicklung von Gehmaschinen auf folgende Aspekte reduzieren:

- **Bewegungssteuerung und Regelung**  
Die Regelung einer Gehbewegung gehört zu den schwierigsten zu lösenden Problemen und wird noch aktiv erforscht. Dies gilt insbesondere für den Bereich der statisch instabilen Fortbewegung.
- **Schrittkoordination**  
Hier gibt es zwar zahlreiche Erkenntnisse von Zoologen, jedoch keine Systematik, die für den ingenieurmäßigen Entwurf verfügbar ist. Insbesondere bei stark unebenem Boden, Hindernisüberquerung und Treppensteigen besteht noch Analysebedarf.
- **Antriebstechnik und Design des Gehapparates**  
Dies ist der jüngste Forschungsbereich auf dem Gebiet der Gehmaschinen. Gerade im Bereich des Design von künstlichen Beinen sind noch Erfahrungen zu sammeln. So setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, dass eine effiziente Gehmaschine nicht allein durch eine fortschrittliche Regelung aufgebaut werden kann, sondern dass die Beingeometrie selbst für die Funktionalität der Gehmaschine von erheblicher Bedeutung ist.

Abschließend wird die historische Entwicklung von künstlichen Gehmaschinen kurz skizziert.

## **The Phoney Pony**

Etwa ab 1960 wurden die ersten Studien zu Gelenkmechanismen für Gehmaschinen entworfen, wenige Jahre später entstanden die ersten derartigen Systeme.

Neben zwei Entwicklungen der ‘Space General Cooperation’ ist aus dieser Frühphase eine vierbeinige Gehmaschine namens ‘Phoney Pony’ bekannt geworden, die an der University of Southern California entwickelt wurde. Diese Gehmaschine ist in Abbildung 16 skizziert<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup>[http://www.fzi.de/divisions/ipt/WMC/walking\\_machines\\_katalog/node16.html](http://www.fzi.de/divisions/ipt/WMC/walking_machines_katalog/node16.html) (September 2000)

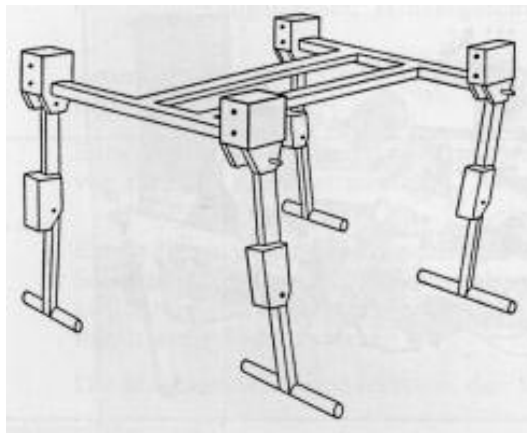


Abbildung 16: Phoney Pony, die erste autonome Gehmaschine

Phoney Pony war die erste Gehmaschine, die sich autonom unter Computersteuerung bewegte. Jedes Bein bestand aus zwei Gliedern, die durch zwei Gelenke mit dem Hauptkörper verbunden waren. Die Gelenke wurden von Elektromotoren über ein Schneckengetriebe angetrieben. Die Stromversorgung erfolgt extern.

Beim ‘Phoney Pony’ waren zwei Schrittmuster vorhanden, nämlich der vierfüßige Gang und der vierfüßige Trab.

### **Der General Electric Quadruped**

Im Jahr 1968 baute die General Electric Company eine ca. 1,5 Tonnen schweren vierfüßige Gehmaschine. Abbildung 17 gibt den Aufbau dieser Gehmaschine wieder<sup>16</sup>.

Jedes Bein besaß hierbei 3 Freiheitsgrade, nämlich ein Kniegelenk und zwei Hüftgelenke. Bewegt wurden diese Gelenke über eine Kurbel von einem linearen Hydraulikzylinder.

Die Ansteuerung der 4 Beine erfolgte durch einen menschlichen Bediener, der mit seinen Händen und Füßen über einen bidirektionalen Kraftübertrager (Hydraulik-Servo) das System bewegen konnte. Dennoch war die Bedienung der 12 Freiheitsgrade sehr schwierig.

Obwohl diese Gehmaschine überzeugende Leistungen im Bereich der Mobilität und des Kletterverhaltens aufwies, zeigte sie ebenso deutlich die Grenzen der Teleoperation durch menschliche Bediener.

<sup>16</sup>[http://www.fzi.de/divisions/ipt/WMC/walking\\_machines\\_katalog/node16.html](http://www.fzi.de/divisions/ipt/WMC/walking_machines_katalog/node16.html) (September 2000)

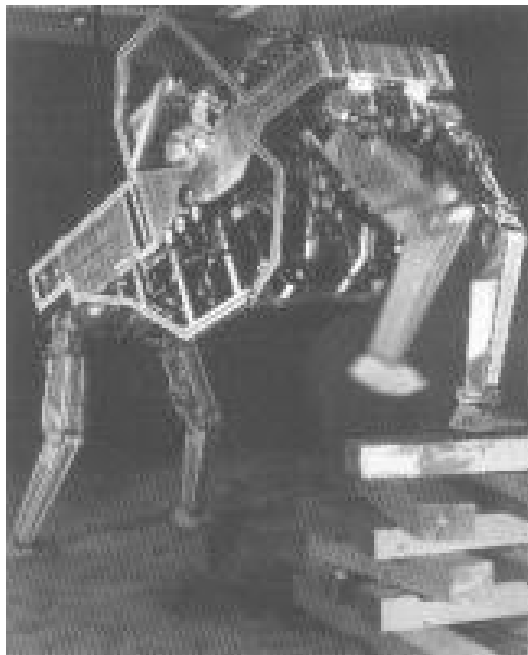


Abbildung 17: Ferngesteuerter GE-Quadruped

### **CMU Hexapode**

Ab 1980 wurden an der Carnegie Mellon University (CMU) in Pittsburgh hexapodische Gehmaschinen entwickelt; 1983 entstand eine sechsbeinige Maschine, welche durch einen on-board Mikrocomputer gesteuert wurde und unabhängig schreiten konnte.

In weiteren Entwicklungsschritten wurde dort der sechsbeinige AMBLER (1988-1992) und dann die DANTE-Serie (DANTE II: 1993-1994) gebaut; diese Roboter wurden für die NASA entwickelt. DANTE II wurde auch tatsächlich mit einer Mission beauftragt. Diese Gehmaschine sollte nämlich den Vulkankrater des Mount Spurr in Alaska explorieren.

Die Mission am Krater war ein Erfolg: fünf Tage lang operierte die Gehmaschine im Kratergebiet; die Missionszentrale und alle Teleoperationseinrichtungen waren 120 km entfernt. Durch die an Bord verfügbare Sensorik und eine Teilautonomie des Roboters konnte das System effizient navigieren (und damit den Einsatz derartiger Gehmaschinen auch für Weltraumanwendungen

motivieren). Erst beim Verlassen des Kraters blieb DANTE II stecken und mußte geborgen werden.

AMBLER und DANTE II sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt<sup>17</sup>.

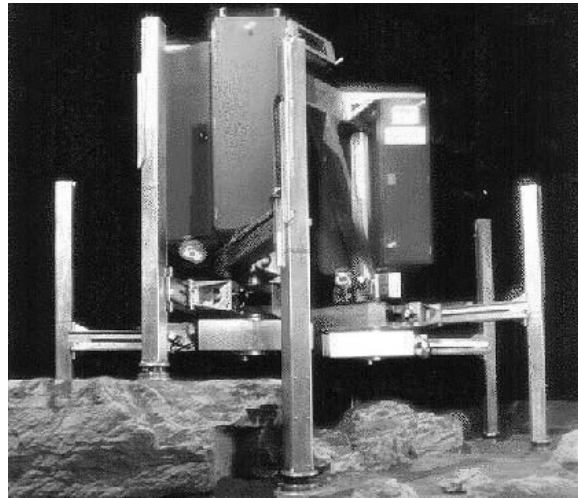


Abbildung 18: CMU's AMBLER



Abbildung 19: Vulkanexploration mit DANTE II

---

<sup>17</sup>[http://ranier.hq.nasa.gov/telerobotics\\_page/photos.html](http://ranier.hq.nasa.gov/telerobotics_page/photos.html) (September 2000)

## Die TITAN-Serie

Etwa ab 1980 begann man am Tokyo Institute of Technology erste vierbeinige Gehmaschinen zu entwickeln.

Die Gehmaschine PV II wog etwa 10 Kilogramm und konnte mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 20 Millimetern pro Sekunde gehen; der Energieverbrauch dieser Maschine betrug nur 10 Watt. Dieser geringe Verbrauch war nicht nur ein Resultat der Leichtbauweise, sondern er ist auch mit der energieeffizienten Konstruktion des Roboterbeines verbunden. Energieversorgung und Computersteuerung erfolgten extern.

Eine erweiterte Version wurde 1984 unter dem Namen TITAN III vorgestellt. Wie zuvor besaß die Gehmaschine wieder den in Abbildung 20<sup>18</sup> beschriebenen pentagraphartigen Gehmechanismus mit drei Freiheitsgraden; jedoch war sie größer und schwerer als der Vorgänger.

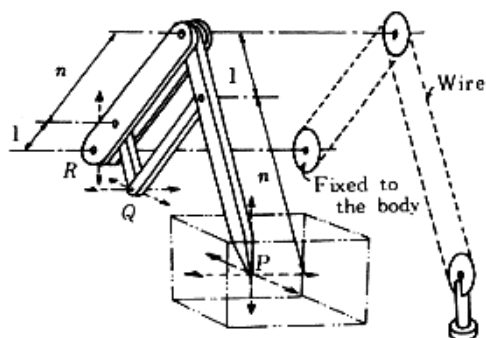


Abbildung 20: Pentagraphartiger Gehmechanismus

Die TITAN-Serie wurde bis heute weiterentwickelt; so ist die in Abbildung 21<sup>19</sup> dargestellte TITAN VIII etwa 1997 entstanden und käuflich erhältlich.

<sup>18</sup><http://mozu.mes.titech.ac.jp/research/walk/RoQWM/fig3.html>

<sup>19</sup><http://mozu.mes.titech.ac.jp/research/walk/TITAN8/TITAN8.html>

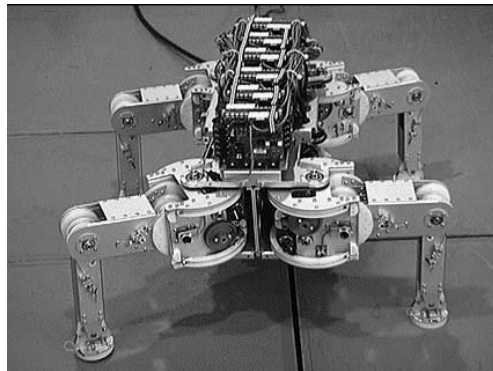


Abbildung 21: TITAN VIII, Tokyo Institute of Technology

### **Besondere Entwicklungen**

Einen besonderen Reiz unter den (ohnehin schon reizvollen) Gehmaschinen üben die statisch instabilen Systeme aus; insbesondere einbeinige und zweibeinige Gehmaschinen fallen in diese Gruppe.

Ein zweibeiniges Exoskeleton wurde von 1972 vom Institute Michailo Pupin in Belgrade, Yugoslavia, als Behindertenhilfe vorgestellt.

Gleichzeitig wurden an der Waseda University in Tokyo, Japan; ebenfalls eine Reihe von zweibeinigen ‘Treppensteigern’ entwickelt. Sie wurden zunächst ferngesteuert und waren sehr langsam.

Ein Monopod, also eine einbeinige Gehmaschine, entstand 1982 an der Ohio State University. Sie war insgesamt etwa 0,5 Meter hoch und bestand aus einer Vier-Balken-Mechanik. Allerdings war dieser Monopod in einem Rahmen mit 3 antriebslosen Rädern montiert und daher stabil.

Eine echte ‘Hüpfmaschine’, also ein Monopod, dessen Stabilität nur durch eine geregelte Hüpfbewegung sichergestellt wurde, entwickelten Raibert and Sutherland im Jahre 1983 an der CMU.

Eine Hüpfmaschine jüngeren Datums ist in Abbildung 22 wiedergegeben<sup>20</sup>.

Dieser Monopode entstand in der Zeit von 1994 bis 1997 am Centre for Intelligent Machines der McGill University in Montreal, Kanada. Es handelt sich um ‘Monopod II’, der bis zu 1,2 Meter pro Sekunde zurücklegen kann. Dabei verbraucht er nur 68 Watt und ist damit einer der energieeffizientesten Roboter, die je entwickelt wurden.

---

<sup>20</sup>[http://www.fzi.de/ids/WMC/walking\\_machines\\_katalog/node40.html](http://www.fzi.de/ids/WMC/walking_machines_katalog/node40.html) (September 2000)



Abbildung 22: Monopod II der McGill University

Der auf der Tokyoter Weltausstellung gezeigte humanoide Roboter WABOT-2 zeichnete sich neben seiner Bauform insbesondere auch durch die feingliedrige Hand aus, die eine hohe Greiffunktionalität zuläßt. Exemplarisch wurde dies im Klavier-Duett demonstriert. Er ist in Abbildung 23 gezeigt<sup>21</sup>.



Abbildung 23: WABOT-2, der klavierspielende Roboter

Ein Jahr später begannen die ersten (inzwischen weltweit populären) Weltmeisterschaften im Roboter-Fußball, allerdings zunächst mit Software-Agenten und Kleinrobotern. Langfristiges Ziel ist es hierbei bis etwa 2050 eine menschenähnliche Robotermannschaft aufzubauen, die im Wettbewerb mit rein menschlichen Fußballmannschaften bestehen kann. Beim RoboCup 2000 beteiligten sich bereits erstmals drei humanoide Roboter an den Wettkämpfen, nämlich 'Jonny Walker' von der University of Western Australia, MK-II von der japanischen Aoyama Gakuin University, und Pino vom Kitano Symbiotik Systems Projekt.

---

<sup>21</sup>[http://courseweb.chchpoly.ac.nz:8081/grosserr/1999/HIST200/21CArchMAS/Future\\_21C/robots/robot.htm](http://courseweb.chchpoly.ac.nz:8081/grosserr/1999/HIST200/21CArchMAS/Future_21C/robots/robot.htm)

### 1.2.5 Radgetriebene Systeme

Die sicher anspruchsvollste Aufgabenstellung für autonome radgetriebene Systeme ist eine Off-Road Navigation bei der eigenständigen Durchfahrt eines beliebigen -auch vorher unbekanntem- Terrains. Herausforderungen dabei sind die Gewährleistung der Fahrzeug-Sicherheit und gleichzeitig die Erzielung einer angemessenen Mindestgeschwindigkeit.

Diese Problemstellungen führen typischerweise in den Hochtechnologie-Bereich; Hintergrund sind dann militärische Entwicklungsabsichten oder interdisziplinäre Forschungsinteressen in finanzstarkem Umfeld.

#### **SRI: Shakey the robot**

Der erste mobile Roboter mit einer eigenen intelligenten Aktionsplanung war 'Shakey', der in den Jahren von 1966 bis 1972 am damaligen 'Stanford Research Institute (SRI)' entwickelt wurde.

Durch die erstmalig gelungene Verknüpfung von mobilen Robotersystemen mit Verfahren der künstlichen Intelligenz ist dieser Roboter auch für heutige Systementwicklungen wegweisend.

'Shakey' besaß eine Kamera, einen Triangulationssensor und mehrere Berührungssensoren (Bumper). Als Rechner wurde eine externe DEC PDP-10 (später PDP-15) benutzt, die über eine Funkverbindung mit dem Fahrzeug gekoppelt war.

Die Steuerung des Fahrzeugs war gegliedert in Sensor-Erfassungsmodule, Programmmodule zur Erstellung von Umwelt-Modellen, und Aktionsmodule (Planung und Ausführung).

An diesem Roboter evaluierte Nilsson seine zuvor entwickelten Bahnplanungsansätze.

'Shakey the robot' ist in Abbildung 24 wiedergegeben<sup>22</sup>.

#### **Das Stanford Cart**

Erste Anfänge zum Aufbau des 'Stanford Cart' datieren zurück in das Jahr 1967; entscheidende Weiterentwicklungen erfolgten in den Jahren 1977-1979 durch Hans Moravec an den Stanford Artificial Intelligence Labs (SAIL).

Es gehört damit zur Gründergeneration mobiler radgetriebener Robotersysteme.

---

<sup>22</sup><http://net.org/html/history/detail/1970-shakey.html> (August 2000)





Abbildung 24: Shakey the Robot

Dieses fernsteuerbare und mit Video-Kameras ausgestattete mobile Robotersystem ist in Abbildung 25 dargestellt<sup>23</sup>.

Es war bereits damals in der Lage auf Grundlage von stereoskopischen Kamera-Informationen seine eigene Bewegung in einer variablen Hinderisumgebung zu koordinieren. Dazu wurden Objekte in der Nähe des Fahrzeuges erfaßt und daraus ein Umweltmodell generiert. Innerhalb dieses Modells lief eine hindernisvermeidende Bahnplanung ab, die mit jedem neu hinzutretenden Objekt während der Fahrt verändert wurde.

Dieses System war auf kurzen Strecken zuverlässig, benötigte aber für einen kollisionsfreien Fahrweg von etwa 1 Meter eine Fahrzeit von 10-15 Minuten. Danach wurde das Umgebungsmodell sensorbasiert erneuert.

---

<sup>23</sup><http://net.org/html/history/detail/1979-scart.html> (August 2000)

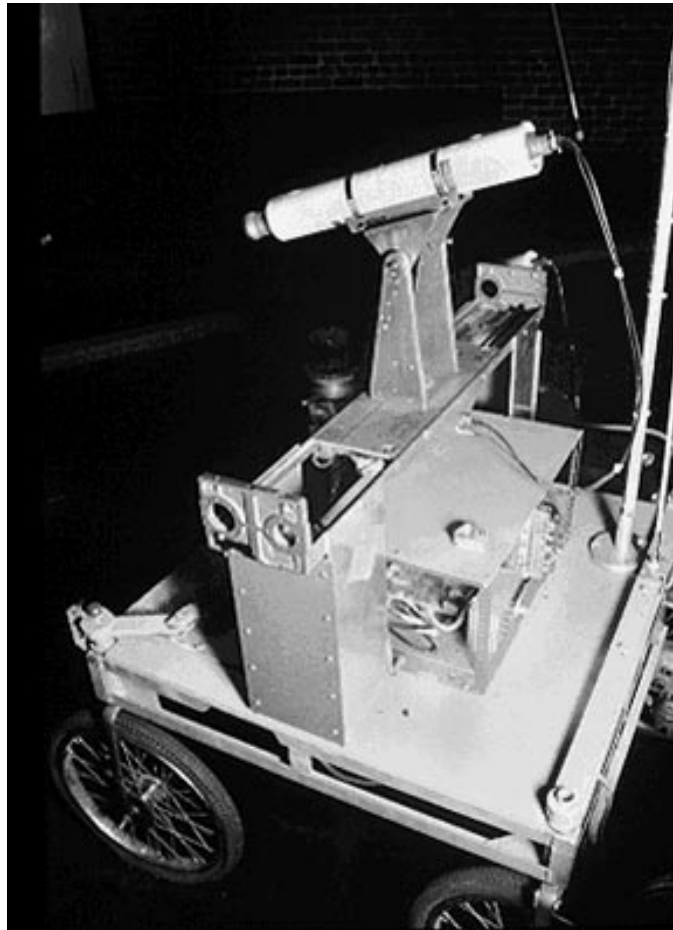


Abbildung 25: Das Stanford Cart

## **HILARE und HILARE II**

In Frankreich werden ebenfalls seit über 20 Jahren mobile Roboter für den wissenschaftlichen Einsatz entwickelt; dort ist das 'Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS)' des 'Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)' in Toulouse federführend.

Am LAAS werden seit etwa 1977 mobile Roboter entwickelt. Eines der ersten Robotersysteme trug den Namen HILARE und wurde bis Mitte der 1980er Jahre entwickelt; er besaß zwei Antriebsräder und ein frei bewegliches drittes Rad. Dieser Roboter war ausgerüstet mit 4 INTEL-80286 Prozessoren, 16 Ultraschall-Sensoren, odometrischer Sensorik und einem Laser-Scanner. Zur Kommunikation wurde ein Funk-Modem eingesetzt.

HILARE ist in Abbildung 26 dargestellt<sup>24</sup>.

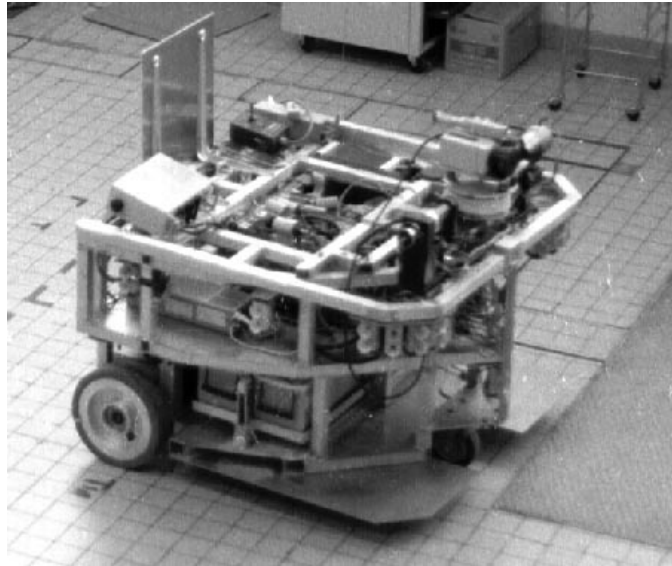


Abbildung 26: LAAS: der HILARE Roboter

Beständige Weiterentwicklungen führten u.a. in 1990 zu HILARE II, der jedoch mit dem Vorgänger nur noch eine Namensverwandtschaft hat. HILARE II besitzt 2 Antriebsräder und 4 weitere freie Räder, ist mit einem Multiprozessorsystem ausgestattet und verfügt über eine erweiterte Sensorik (32 US, 3D-Scanner, 2 Kameras).

HILARE II ist in Abbildung 27 wiedergegeben<sup>25</sup>.

---

<sup>24</sup><http://www.laas.fr/laasve/index.html> (August 2000)

<sup>25</sup><http://www.laas.fr/laasve/index.html> (August 2000)



Abbildung 27: LAAS: der HILARE II Roboter

## NavLab II (CMU)

Eine der fortgeschrittensten Entwicklungen im Forschungsbereich ist das ausschließlich computergestützt operierende Off-Road Fahrzeug NavLab II der Carnegie Mellon University (CMU) in Pittsburgh. Dieses autonome radgetriebene System steht in einer Serie von Spezialentwicklungen (Gehmaschinen und Radfahrzeuge) der CMU sowohl für militärische als auch zivile Nutzungen.

Mögliche Anwendungen sind im militärischen Bereich Aufklärung und Logistik und reicht im zivilen Bereich von medizinischen Such- und Rettungsaufgaben über Handhabung von Gefahrgut bis zu industriellen Anwendungen zum Beispiel bei automatisierten Ausgrabungs- und Bergwerkstätigkeiten.

NavLab II ist dabei eindeutig als Prototyp zum Verständnis der prinzipiellen Navigationsprobleme und als technische Umsetzung der verfügbaren Lösungsbeiträge entworfen. Es umfaßt interdisziplinäre Systemintegration, insbesondere zu dem Bereichen der Echtzeit-Datenverarbeitung, der Sensorik und der Aktorik.

Das Fahrzeug ist in Abbildung 28 dargestellt<sup>26</sup>.



Abbildung 28: Das CMU-System NavLab II

Als Fahrzeug-Sensorik diente in vielen Fahrversuchen ein 2-D Raster-Laser-scanner. Um das Fahrzeug völlig unabhängig agieren zu lassen, wurden

<sup>26</sup>[http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/alv/member/www/other\\_pages/navlab2\\_photo.html](http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/alv/member/www/other_pages/navlab2_photo.html) (July 1998)

für Off-Road Einsätze keinerlei Vorrichtungen zur Außen-Kommunikation oder externen Energieversorgung vorgesehen. Zur Energieversorgung werden Generatoren im Fahrzeug selbst verwendet.

Zur Bewegungskontrolle dienen drei unabhängige System-Freiheitsgrade, nämlich Drosselklappen-Stellung, Bremse und Lenkrad-Einschlag. Der aktuelle Fahrzeug-Zustand (Position, Geschwindigkeit und Orientierung) wird mit einem geeigneten Satz von Encodern und einem Trägheitsnavigationssystem geschätzt.

CMU beschäftigt sich intensiv mit Aspekten des Sensoreinsatzes zur Umwelterfassung in Echtzeit, der zugehörigen Datenverarbeitung, sowie den Problemen der (high-level) Bewegungsplanung (path planning / collision avoidance) und des (low-level) Spurhaltens (path tracking).

### **Der JPL-Rover**

Das Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, Kalifornien, arbeitet im Auftrag der NASA an der robotergestützten Fernerkundung unseres Sonnensystems. Im Bereich der mobilen Roboter erzielte JPL den bis dato spektakulärsten Erfolg in einer Mars Pathfinder Mission. Hierbei wurde am 4. Juli 1997 ein Landegerät mit dem Rover-Fahrzeug 'Sojourner' auf dem Mars abgesetzt.

Abbildung 29 zeigt diesen Mars-Rover aus der Baureihe 'Rocky 4'<sup>27</sup>.

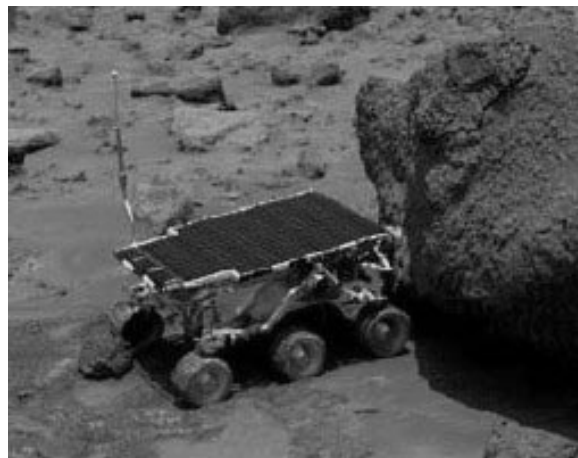


Abbildung 29: Mars-Rover Sojourner

---

<sup>27</sup><http://robotics.jpl.nasa.gov/groups/rv/> (August 2000)

Ein Prototyp der nächsten Generation, nämlich 'Rocky 7', ist in Abbildung 30 dargestellt<sup>28</sup>. Dieses Rover-Fahrzeug ist mit einem Stereo-Bildverarbeitungssystem und einem Manipulatorarm ausgestattet. Es soll im Jahr 2005 zum Mars geschickt werden.



Abbildung 30: Rocky 7, Prototyp eines weiterentwickelten Mars-Rover

In zahlreichen Veröffentlichungen sind die Mars-Rover detailliert beschrieben.

---

<sup>28</sup><http://robotics.jpl.nasa.gov/groups/rv/> (August 2000)

## 1.2.6 Omnidirektionale Fahrzeuge

### CMUs URANUS Cart

Der an der Carnegie Mellon University entworfene mobile Roboter URANUS mit omnidirektionalen Fahreigenschaften nutzt die kinematische Struktur, die erstmals mit dem Wheelon-Rollstuhl vorgestellt wurde.

Vier omnidirektionale MECANUM-Räder (getrennt angetriebene Radzylinder mit antriebslosen Rollen) sind dazu an den Ecken des Fahrzeuges montiert. Die Rollen besitzen einen  $45^\circ$ -Montagewinkel gegenüber der Orientierung des Einzelrades. Beim URANUS-Fahrzeug befinden sich 12 Rollen auf jedem Radzylinder.

Diese URANUS-Plattform erlaubt 3 vollständige Freiheitsgrade der Bewegung.

URANUS ist in Abbildung 31 dargestellt<sup>29</sup>.



Abbildung 31: Das omnidirektionale Uranus Cart

Jedes Rad wird getrennt angesteuert durch einen bürstenlosen DC-Servomotor. Das Chassis des Fahrzeuges besteht aus zwei Bauebenen: die

---

<sup>29</sup>[http://www.ri.cmu.edu/labs/lab\\_12.html](http://www.ri.cmu.edu/labs/lab_12.html) (August 2000)



untere Ebene beinhaltet die Fahrzeugmechanik und Batteriezellen, und die obere Ebene nimmt den Computer und alle elektronischen Einheiten inklusive der Fahrzeugsensorik auf.

Dieses Fahrzeug wurde vornehmlich zu Forschungszwecken im Bereich der 3D-Sensorerfassung und Umwelt-Kartografierung eingesetzt. In jüngerer Zeit wurden mit dem URANUS-Fahrzeug Arbeiten zur visuellen Hindernisvermeidung durchgeführt, bei denen die Methode der genetischen Programmierung zum Einsatz kam.

### **KAMRO und PRIAMOS, omnidirektionale Systeme aus Karlsruhe**

Der KAMRO (Karlsruhe Autonomous Mobile Robot) besteht aus einem mobilen Roboterfahrzeug mit MECANUM-Rädern, die eine omnidirektionale Fahrt erlauben, zwei PUMA 200 Roboterarmen in hängender Konfiguration sowie einer auf 3 Kameras gestützten Bildverarbeitungssensorik und einem Ultraschall-Sensorsystem.

Das KAMRO-Fahrzeug mit den beiden montierten Robotern ist in Abbildung 32 dargestellt<sup>30</sup>.

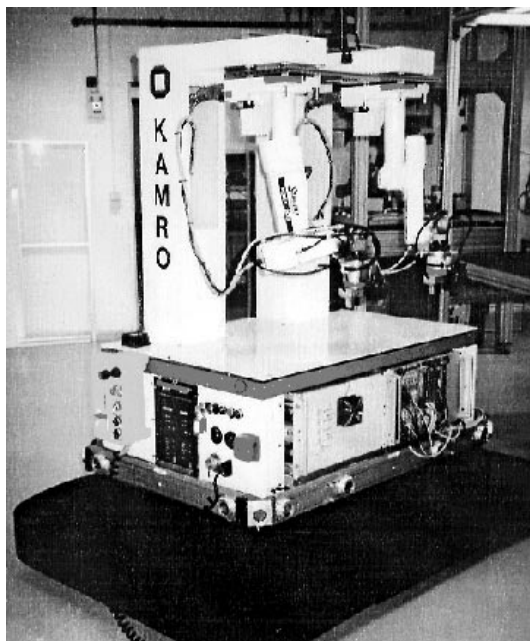


Abbildung 32: Karlsruher autonomer mobiler Roboter KAMRO

---

<sup>30</sup><http://www.dfki.uni-sb.de/vitra/papers/ro-man94/node3.html>

KAMRO diente zum Aufbau und Test einer vollständigen Navigationsstruktur, die sämtliche Planungsebenen vom Aufgabenplaner über Bahnplaner bis hinunter zur Ebene der Aktoren-Regelung und Sensor-Auswertung einschließlich reaktiver Bewegungssteuerung umfaßte. Außerdem wurde der koordinierte Betrieb zweier Roboterarme implementiert und wissenschaftlich analysiert.

Zielsetzung des gesamten KAMRO-Projektes war die autonome Durchführung komplexer Fertigungsaufgaben durch Einsatz intelligenter autonomer Robotersysteme. Das Projekt selber war auch Bestandteil des DFG-Sonderforschungsbereiches 314 'Künstliche Intelligenz - Wissensbasierte Systeme'.

Ebenfalls in Karlsruhe wurde mit dem PRIAMOS-System ein weiterer omnidirektional verfahrbarer mobiler Roboter als Testplattform für Forschungsarbeiten an Navigationsstrategien, Regelungshierarchien und Sensorintegration aufgebaut.

PRIAMOS wurde mit aktiver Sensorik (3-Kamera-System zur räumlichen Bildverarbeitung, Ultraschall-Sensorik, Laser-Optik zur 'Strukturierten Licht'-Methode) zur Umwelterfassung versehen, Methoden zur interaktiven Kartenerstellung der Umwelt (inklusive einer on-line Kartenverbesserung) einbezogen, Kollisionsvermeidungs- und präzise Navigationsalgorithmen implementiert und Verfahren zur Feinpositionierung eingebracht

Das PRIAMOS-Fahrzeug ist in Abbildung 33 wiedergegeben<sup>31</sup>.

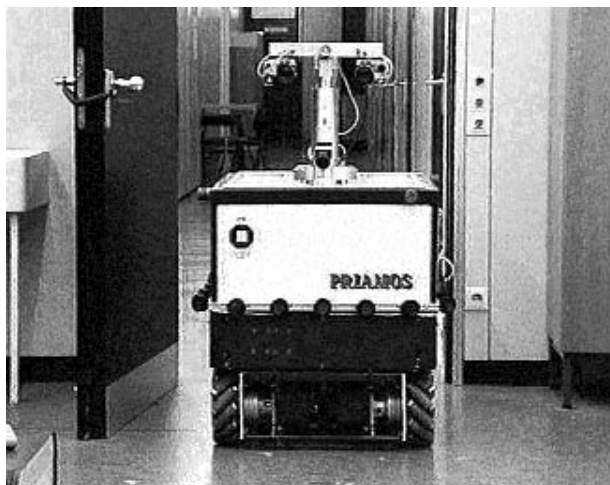


Abbildung 33: Das omnidirektionale Roboterfahrzeug PRIAMOS

---

<sup>31</sup><http://www.ipr.ira.uka.de/graf/Robots/priamos.html>

## Entwicklungen an der FernUni Hagen

Ebenfalls auf dem MECANUM-Antriebskonzept basiert das omnidirektionale Fahrzeug der FernUniversität Hagen, welches zu Forschungszwecken im Bereich moderner Verfahren zur Antriebsregelung eingesetzt wird. Hierbei werden zur gezielten Verkopplung der Ansteuerungen aller Einzelantriebe des MECANUM-Systems ein regelungstechnisches Verfahren im Zustandsraum vorgestellt, welches für die konkrete Anwendung die systematische Realisierung eines elektronischen Getriebes erlaubt.

Inzwischen wird das mobile System verstärkt im Bereich der Ausbildung und Lehre genutzt. Hierbei wird ein Internet-basierter Zugriff auf das Fahrzeug im Rahmen von Praktikumsversuchen ('Virtuelles Praktikum') ermöglicht.

Abbildung 34 stellt die mobile Roboterplattform vor.



Abbildung 34: Das omnidirektional-mobile System der FernUni Hagen

Neben der odometrischen Erfassung und Positionsüberwachung des Fahrzeuges steht ein Laser-Gyroskop zur Vermessung von Drehungen zur Verfügung. Eine taktile Sensorik am Fahrzeugrahmen sorgt für die sichere Abschaltung des Systems im Konfliktfall. Der on-board Computer kommuniziert mit einem Leitrechner über eine Ethernet-Funkverbindung.

Erwähnenswert ist aus dem Bereich der Service-Robotik auch ein omnidirektionaler Rollstuhl der FernUniversität Hagen, der in Abbildung 35 dargestellt ist. Dieses System verfügt über Funktionsmodule, die auch schwerstbehinderten Menschen noch Navigationsmöglichkeiten bietet (anpassbare Eingabegeräte, optional Sprachsteuerung, Playback- und Backtracing-Fahrt, umgebungsabhängiges Fahren).

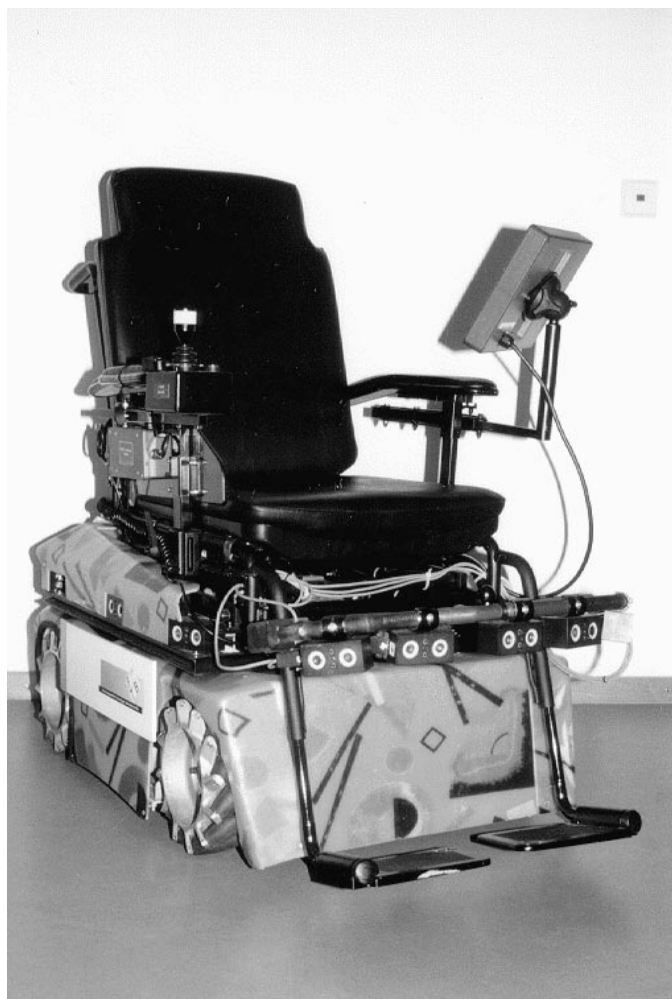


Abbildung 35: Omnidirektionaler Rollstuhl der FernUni Hagen

## Kommerzielle Systeme der Service-Robotik

Ein Beispiel für einen kommerziellen Serviceroboter im Krankenhausbereich ist das HelpMate System; es wurde in einer weiteren Firma des bereits erwähnten Roboter-‘Urvaters’ Engelberger entwickelt, der Transition Research Corporation, später HelpMate Robotics Inc.; der erste ausgelieferte HelpMate-Roboter arbeitete in einem Hospital in Danbury, Connecticut. In Abbildung 36 ist dieser Roboter im praktischen Einsatz zu sehen<sup>32</sup>.



Abbildung 36: Der Service-Roboter Helpmate im Krankeneinsatz

Weitere Serviceroboter sind weltweit in Entwicklung bzw. im prototypischen Einsatz. Auch in der Europäischen Gemeinschaft gibt es zahlreiche Projekte auf diesem Gebiet, insbesondere im Bereich der Industrieforschung und im Bereich der Unterstützung von älteren sowie behinderten Menschen durch Service-Systeme.

---

<sup>32</sup>[http://courseweb.chchpoly.ac.nz:8081/grosserr/1999/HIST200/21CArchMAS/Future\\_21C/robots/robot.htm](http://courseweb.chchpoly.ac.nz:8081/grosserr/1999/HIST200/21CArchMAS/Future_21C/robots/robot.htm)