

5.5 Maschinelles Lernen durch Ausprobieren und Belohnung ...	78
5.6 Architekturen von Robotersteuerungen	80
5.7 (Zwischen-)Bilanz	94

VERTIEFUNGEN

Beispiel für einen mobilen Manipulator	99
Alternative Sensoren für Navigation	101
Kartenherstellung für mobile Roboter	104
Beispiel für ein multimodal instruierbares Robotersystem	106
Neuronale Netze: Perzeptron und rekurrentes Netz	114

ANHANG

Glossar	120
Literaturhinweise	127

1 Einführung

Wann gibt es endlich einen Roboter – der 1920 vom Schriftsteller Karel Capek geprägte Begriff leitet sich vom tschechischen Wort für Zwangsarbeit her –, der zuverlässig meine Wohnung saugt und meine Fenster putzt? Oder einen solchen, der den Tisch abdeckt, die Spülmaschine einräumt und dann auch noch das Bad reinigt? Wäre es nicht möglich, dass er sich zumindest ab und zu auch der Kindererziehung widmet?

Solche Fragen werden nach einigen Jahrzehnten der Robotik-Forschung zu Recht immer wieder und nur halb im Scherz gestellt. Um die Antwort vorweg zu nehmen: In unmittelbarer Zukunft wird es solche Roboter nicht geben; dazu sind die zu lösenden Probleme zu komplex. Und dennoch sind die Fortschritte, die in den letzten Jahren erzielt wurden, beachtlich. Noch vor zwei Jahrzehnten wurde der Begriff des Roboters entweder mit realen »freiprogrammierbaren Handhabungsautomaten« bar jeglicher Intelligenz oder aber mit fiktiven Maschinen menschlicher Gestalt (Androiden) verbunden, gegenüber deren Intelligenz die menschliche nur wie ein Durchgangsstadium der Evolution wirkte. Der Abstand zwischen beiden Welten schien unüberbrückbar.

Inzwischen stellt sich die Situation jedoch anders dar, denn die Technik kleiner Rechner zur Robotersteuerung ist um Größenordnungen leistungsfähiger geworden, und auch ihre Programmierung ist wesentlich komfortabler und effizienter möglich, als zur Anfangszeit der Mikroprozessortechnik jemals erträumt. Hinzu kommt der enorme Fortschritt der Mechatronik (die Verbindung von Mechanik und Elektronik). Roboter sind heute ungleich robuster, präziser und wesentlich zuverlässiger geworden als in den Pionierzeiten. Ganz neue Klassen von Apparaten sind entstanden: mobile Roboter (Fahr-

zeuge für innen und außen, Flug- und Unterwasserroboter, Spezialsysteme für Aufgaben wie Fassadenputzen), Mikroroboter; darüber hinaus Teilsysteme wie anthropomorphe Arme und Mehrfingerhände – Meisterwerke der Präzisionsmechanik.

Auf Grundlage solcher Ingenieurleistungen ist in den Forschungsdisziplinen der Signalverarbeitung, Mustererkennung, Künstlichen Intelligenz sowie in jüngster Zeit auch der Neurobiologie und Hirnforschung eine Vielfalt von Methoden, Verfahren und Systemen entstanden, die die Übertragung perzeptiver, kognitiver und aktorischer Leistungen, wie wir sie bei einfachen Lebewesen beobachten können, auf mechanische Systeme zum Ziel haben. Tatsächlich ist bereits eine ganze Reihe von Robotern im Einsatz, die – abgesehen vielleicht von spektakulären Raumfahrtanwendungen – weitgehend unbemerkt von der Öffentlichkeit in gefährlichen oder unzugänglichen Umgebungen im Routineeinsatz Dienstleistungen erbringen, die Menschen erheblich entlasten.

Allerdings haben solche Serviceroboter entgegen vielfacher Vorhersagen und unterschiedlichster Realisierungsansätze noch kaum einen Grad an Autonomie erreicht, der ihren großflächigen Einsatz im industriellen, öffentlichen oder gar privaten Bereich erlauben würde. Die bisher verfügbaren Systeme sind in vielerlei Hinsicht nicht »intelligent« genug, um in einem von Menschen geprägten Szenario aus dynamischen Umgebungen, Anforderungen und Aufgaben »überleben« und eine sinnvolle Tätigkeit ausüben zu können, die mehr als nur die elementare Fähigkeit zur Ortsveränderung verlangt.

Es ist inzwischen weitgehend akzeptiert, dass echte Adaptation und mithin »Intelligenz« sich nur dann ausprägen können, wenn Roboter-Artefakte nicht nur über situierte Reaktionsfähigkeiten und ein hohes Maß an Handlungsautonomie verfügen, die sich ihrerseits auf leistungsfähige Sensorik samt (Vor-)Verarbeitung abstützt, sondern auch über einen anpassungsfähigen Körper mit flexiblen »Gliedermaßen«. Idealerweise sind sie darüber hinaus mit der Fähigkeit aus-

gestattet, ihre reichhaltigen motorischen Handlungsmöglichkeiten über ihre »Lebensspanne« zu entwickeln; dies als sehr langfristige Perspektive möglicherweise sogar in einem entsprechend sich entwickelnden, mitwachsenden Körper.

Die bislang bei der Automatisierung von Produktion und Dienstleistung erzielten Erfolge sind außerordentlich und beileibe nicht nur auf die publikumswirksamen Applikationen der Automobilindustrie beschränkt. Obwohl die vollständige Roboterunterstützung aller Produktionsprozesse wohl noch einige Zeit auf sich warten lässt, und sie in manchen Bereichen sogar kontraproduktiv wäre, begründet die Qualität der realisierten und zu erwartenden Roboter-Anwendungen durch ihre zum Teil enormen Produktionsfortschritte nichts weniger als eine weitere industrielle Revolution. Mit den Worten von P. Kennedy: »In vieler Hinsicht sind die Ähnlichkeiten zwischen der Dampfmaschine und dem Roboter auffallend. Beide stellen eine neue Herstellungsmethode dar, die zugleich die physischen Anstrengungen der Arbeiter reduziert und die allgemeine Produktivität erhöht. [...] Wie die Dampfmaschine beeinflusst die Robotik die internationale Konkurrenz, sie hebt die Pro-Kopf-Produktion der Nationen, die in die neue Technologie investieren, und sie schwächt auf längere Sicht die relative Position von Gesellschaften, die nicht in der Lage sind, dies zu tun.«

2 EINSATZBEREICHE VON ROBOTERN

Die Robotik gründet sich auf zwei »Basistechniken«: Telemanipulatoren und die Technik der numerischen Steuerung von Werkzeugmaschinen (NC: Numerical Control, bzw. CNC: Computer NC). Telemanipulatoren sind von Menschen ferngesteuerte Maschinen, die gewöhnlich aus einem Arm mit einem Greifer bestehen. Ihre Bewegungen folgen direkt den Bewegungen, die der Bediener an einer an seinem Arm und seiner Hand befestigten Steuereinheit vormacht.

sung schnell an Grenzen, wenn sie zur Beherrschung eines sich in einer veränderlichen Umgebung bewegend, physikalischen Roboters operationalisiert werden soll. Aus dieser Erfahrung heraus argumentierte R. Brooks 1987: Repräsentationen seien der falsche Ansatz zur Konzeption intelligenter Systeme. Zumindest im Fall einfacherer Organismen bräuchte es keine Repräsentationen der Welt zum Überleben: «Wenn wir Intelligenzleistungen niedriger Stufe untersuchen, so stellen wir fest, dass explizite Repräsentationen und Modelle der Welt nur stören. Die Welt ist sich selbst ihr bestes Modell.» Erstes Ziel einer »neuen KI« müsse es deshalb sein, verhaltensgesteuerte Artefakte zu bauen, die sich an veränderte Umwelten anpassen, oder sich eine neue Umgebung zu suchen. Wenn dies erreicht sei, dann werde »der Rest« menschlicher Kognitions- und Intelligenzleistungen einfach nachzuempfinden sein.

Fünfzehn Jahre später kann dieser radikale Anspruch völliger Repräsentationsfreiheit ebenfalls als gescheitert gelten. Allerdings sind die begleitenden Forderungen nach Leiblichkeit (embodiment) und Umwelt- und Situationsbezug (situatedness) in der kognitiven Robotik als wesentliche Konstituenten intelligenter Artefakte anerkannt. Zu beobachten ist der Wechsel von einem repräsentations- zu einem handlungszentrierten Ansatz, dessen Verfolgung die Konstruktion von leiblichen Artefakten zwingend voraussetzt: Kognition als aktiver Prozess der Weltgestaltung. Beim Ansatz der *enactive cognition* werden Körper und Geist als (jeweils bisheriges) Resultat der Historie von (physischen, sensorischen, sozialen) Interaktionen zwischen Lebewesen und Umwelt aufgefasst, die sich in struktureller Kopplung befinden, mithin permanent aufeinander einwirken. Gestaltung der Umwelt und Entwicklung des Lebewesens sind also ein Prozess, der nicht separiert werden kann. Im Unterschied zu kognitivistischen Ansätzen, bei denen die Umgebung (»Welt«) in Symbolen repräsentierbar wird oder zu konnektionistischen Metaphern (bei denen dies durch »subsymbolische« Aktivierungsmuster geschieht),

ist das Verhältnis Welt \leftrightarrow Lebewesen nicht durch Repräsentationen zu beschreiben, vielmehr durch Handlung präsentierbar. Dies schließt selbstverständlich das Entstehen bzw. Vorhandensein von Phänomenen, die in Kognitivismus/Konnektionismus über repräsentationelle Konzepte beschrieben werden, keineswegs aus.

Nach diesen generellen Überlegungen zur Modellierung und Einordnung kognitiver Systeme wollen wir auf den Begriff der Leiblichkeit (Körperlichkeit, embodiment) näher eingehen.

4.4 Natürliche und künstliche leibliche kognitive Systeme

Die Frage nach der Leiblichkeit stellt keine philosophische Spitzfindigkeit dar, sondern ihre Beantwortung wird ganz wesentlich die Richtung bestimmen, die die Robotik zukünftig zu nehmen haben wird, wenn das Ziel die Bereitstellung autonomer intelligenter Systeme ist. Oder auch umgekehrt: Was bestenfalls zu erwarten ist, wenn bestimmte Charakteristika lebender Systeme von Artefakten nicht eingehalten werden. (Was zur Zeit in vieler Hinsicht sicher der Fall ist – angefangen von der Tatsache, dass diese Artefakte von externen Designern jeweils programmiert werden müssen, bis zu ihrer im Vergleich zu den erforderlichen Adaptations- bzw. Lernzeiten sehr kurzen Betriebszeiten.) Erkennt man dies an, leitet sich als Forderung daraus ab, dass die künstliche Intelligenz sich mit Maschinen beschäftigen muss, die in einer Umwelt agieren, um zu dieser einen kausalen Bezug herstellen zu können. Insbesondere müssen sie in der Lage sein, eigene interne Repräsentationen und Bedeutungssysteme aufzubauen, die ihnen nicht von einem Programmierer vorgegeben werden (der sich in ihre »Erfahrungen« – abgesehen von trivialen Fällen – nicht hineinversetzen kann).

Dies kann durch Fähigkeiten zur Wahrnehmung, zur Handlung in der realen Welt und durch Lernfähigkeit geschehen. Sie charakteri-

sieren auch den »intelligenten« Roboter, insofern ist es folgerichtig, dass die KI sich zunehmend mit Robotern beschäftigt. Bei den in und mit einer realen Umwelt interagierenden Robotern ergeben sich, wie bereits weiter oben angedeutet, erweiterte Anforderungen und Möglichkeiten gegenüber körperlosen Agenten: (1) Kognition erfolgt unter Zeitdruck, die Zeitrahmen werden von der Umwelt vorgegeben. Nichteinhaltung führt im Extremfall zur Zerstörung des Roboters oder seiner Umwelt. (2) Kognition ist situiert, d. h. in Abhängigkeit von der Umwelt- und Handlungssituation, in der der Roboter sich befindet, werden verschiedene kognitive Fähigkeiten unterschiedlich gefordert. (3) Kognition ist über die Handlung direkt auf die Umwelt bezogen, sie entsteht in der Handlung (Maturana). Derart verstanden benötigt man kein internes »Modell« der Umwelt, die Umwelt ist vielmehr »sich selbst ihr bestes Modell«.

Spätestens (3) benötigt offensichtlich einen realen Körper. An welcher Stelle bezieht sich Kognition nun aber auf einen bestimmten realen Körper, wo kann für die Kognition keinesfalls auf ihn verzichtet werden? Wir folgen hier der Argumentation, nach der menschliche Konzepte sich in unserer körperlichen Erfahrung und Aktivität gründen, sich also nur mit dieser Erfahrung aufbauen und strukturieren lassen. Dies lässt sich anhand der von uns verwendeten Metaphern leicht nachvollziehen, die in vielfältigster Weise auf körperliche Aktivität Bezug nehmen und diese auf abstrakte Kontexte beziehen: Meinungen prallen aufeinander, Chancen werden ergriffen, Stolpersteine werden in den Weg gelegt, Knüppel werden zwischen die Beine geworfen, auf den Vorschlag wird so richtig draufgehauen. Demnach entstehen Bedeutungsstrukturen ursprünglich durch unsere körperliche (und soziale) Erfahrung. Wir verfügen ferner über die Fähigkeit, diese Erfahrungen auf eine abstrakte Ebene zu projizieren und zu generalisieren.

Dementsprechend wäre es aussichtslos zu versuchen, einem Roboter, der über keinen Greifer verfügt und folgerichtig kein Konzept

»Greifen« entwickeln konnte, zu vermitteln, was es heißt, eine Chance zu ergreifen.

Man kann körpergebundene Kognition also verschieden auffassen; einen strukturierten Vorschlag gibt Ziemke:

Strukturelle Kopplung. Strukturelle Kopplung liegt vor, wenn sich das kognitive System in Wechselwirkung mit seiner Umgebung befindet, d. h. beide beeinflussen sich gegenseitig. Eine solche Kopplung bedingt keinen Körper, jeder Software-Agent (bzw. eine diesen repräsentierende menschenähnliche Gestalt auf einem Bildschirm) kann sich in einer derartigen Kopplung mit seiner Umgebung befinden. Strukturelle Kopplung ist notwendig, aber nicht hinreichend für ein kognitives System: jede (reale, simulierte) Alge ist strukturell mit dem Meerwasser gekoppelt, ohne dass hieraus kognitive Phänomene resultieren würden.

Physischer Körper. Offensichtlich reicht das reine Vorhandensein eines Körpers, der sich in struktureller Kopplung befindet, für das Entstehen leiblicher Kognition nicht aus. Es ist vielmehr notwendig, dass dieser Körper mit Sensoren und Aktoren ausgerüstet ist, die es dem System erst ermöglichen, einen Kognitionsapparat aufzubauen, dessen Repräsentationen sich in der historisch durch Kopplung erfahrenen Welt gründen.

Organoider Körper. Folgend der Hypothese, dass Kognitionsleistungen von biologischen Organismen an das Vorhandensein eines Körpers als Medium gebunden sind, wird hier gefordert, dass der Körper des Artefakts eine ähnliche Form und Struktur wie biologische Vorbilder haben muss. Ebenso müssen darauf aufbauend dem biologischen Muster ähnliche sensomotorische Fertigkeiten bereitstehen. Dieser Forderung entsprechende Verkörperungen sind humanoide Roboter oder skorpioartige Laufmaschinen.

Organischer Körper. Die strengste Forderung an die Entstehung körpergebundener Kognition ist, dass ein lebender Körper vorhanden ist. Inwieweit die Roboter-Technologie zukünftig in der Lage sein wird, die für lebende Systeme wesentlichen Charakteristika in ausreichender Qualität nachzubilden, sei dahingestellt. Momentan ist dies nicht der Fall, insofern ist es nicht überraschend, dass die Kognitionsleistungen der Lebewesen unerreichbar sind.

Worin bestehen nun aber die grundsätzlichen Unterschiede zwischen lebenden Wesen und Maschinen? Die Klärung dieser Frage ist von hohem Interesse, wenn entschieden werden soll, nach welchen Prinzipien Maschinen aufgebaut sein müssten, die Lebewesen nachempfinden können. Sie ist aber auch wichtig, wenn man sich fundiert der populären Diskussion um die Möglichkeit der Entstehung maschinellen Bewusstseins stellen will. Bereits vor fast einhundert Jahren versuchte der deutsche Biologe J. von Uexküll, strukturelle Unterschiede zwischen Lebewesen und Maschinen herauszuarbeiten, die im Wesentlichen bis heute Bestand haben. Danach handeln Lebewesen gemäß einer während ihres Lebens gewachsenen »Reaktionsbasis«, einem Regelsystem. Lebewesen enthalten »Funktionsregeln« und bestehen aus reproduzierbaren Zellen, was Wachstum und Selbst-Reparatur gemäß einem intrinsischen »Bauplan« ermöglicht. Maschinen sind demgegenüber feste Strukturen, die zu einer strukturellen Änderung ihrer Verhaltensweisen nicht fähig sind – diese werden, wie ihr Bauplan, vom Menschen festgelegt. Man könnte auch sagen, dass Maschinen Pläne (des Menschen) ausführen, während Lebewesen selbst der Plan sind, den (nach dem) sie leben. Es wird außerdem nach dem Konstruktionsprinzip unterschieden: Maschinen werden von außen nach innen gebaut; zunächst werden die Einzelteile hergestellt, die dann zusammengefügt werden. Umgekehrt entstehen alle Lebewesen »zentrifugal«; ausgehend von einer Zelle differenziert sich eine Vielzahl von Organen.

Moderne Roboter können – bis zu einem gewissen Grad – ihre Handlungsbasis erweitern. Die Entwicklung kollektiven, sozialen Verhaltens in Teams von Robotern kann ebenfalls als Umsetzung von Evolutionsprinzipien gesehen werden. Allerdings beruht beides typischerweise wieder auf vom Menschen erdachten »Meta-Regeln«: Regeln zur Konstruktion von Regeln. Bislang nicht erkennbar sind Wege, um brauchbare technische Annäherungen an das physische Wachstum zu erhalten, welches Lebewesen zu einer parallelen Entwicklung des Interaktionsmediums Körper und des mit diesem Körper realisierten Kognitionsapparats befähigt, schon gar nicht im Sinne der »Zentrifugalität« als Enthaltensein des Bauplans in jeder Zelle (Komponente).

Lebewesen sind autopoietische Systeme: Sie zielen darauf ab, sich selbst bei Wahrung ihrer Identität ständig zu erneuern (zu reproduzieren) und sich dabei eigene Regeln und Grenzen festzulegen – sich also in diesem Sinn selbst zu organisieren und diese Organisation aufrechtzuerhalten. Nur am Rande sei bemerkt, dass dieses Prinzip nicht nur Lebewesen befähigt, sich flexibel in einer Umwelt mit einer Vielzahl externer Einflussfaktoren zu verhalten, sondern auch große Organisationen wie Wirtschaftsunternehmen und die menschliche Gesellschaft. Es wurde übrigens in gewissem Sinne schon vor längerer Zeit auch für die Nanotechnik als Ziel formuliert. Unsere gegenwärtigen Robotersysteme sind demgegenüber allopoietische Systeme; solche Maschinen erzeugen durch ihre Funktion etwas von ihnen selbst Verschiedenes. Die allopoietische Maschine reproduziert sich nicht selbst, sie ist vielmehr Produkt eines anderen Prozesses, etwa der Entwicklungsarbeit des Ingenieurs. Dieser (nicht die Maschine selbst) legt ihre Grenzen fest, ebenso ihre Organisation.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass noch erhebliche Anstrengungen unternommen werden müssen, um vielleicht eines Tages Robotersysteme bauen zu können, die anpassungsfähig und in einem engeren Sinne intelligent genug sind, um dem Menschen hilfreiche Dienste anbieten zu können. Ein wesentliches Hindernis

auf dem Weg dorthin scheint – neben den vielfach noch unverstandenen Prinzipien der Erbringung kognitiver Leistungen bei einfachen und höheren Lebewesen – unser grundsätzliches technisches Unvermögen, reale Roboter sich aus zellähnlichen »omnipotenten« (d. h. für unterschiedliche Fertigkeiten spezialisierbaren) Bausteinen entwickeln zu lassen. Nur wenn dies der Fall wäre, könnte man die Mächtigkeit des Konzepts der Leiblichkeit in Verbindung mit den Konzepten der Evolution und Individualentwicklung wirklich maschinell umsetzen.

4.5 Weiterführende Fragestellungen

Welche Konsequenzen haben nun diese Einsichten über die Entwicklung kognitiver Strukturen in leiblichen Systemen für Robotersysteme und die Robotik-Forschung? Unbestreitbar rücken in den letzten Jahren zunehmend technische Ansätze in den Mittelpunkt des Interesses, die versuchen, einfache sensorische, kognitive und motorische Leistungen so auf die vorhandenen Roboter-Plattformen aufzusetzen, dass ein technisches System entsteht, welches bis zu einem gewissen Grad autonom handeln kann und ein Mindestmaß an Flexibilität bezüglich sich strukturell ändernder Aufgabenstellungen besitzt. Dabei ist Autonomie so zu verstehen, dass das System in Abhängigkeit von sich ständig wandelnden Umweltsituationen nicht nur – losgelöst von menschlichen Kommandos – zielgerichtet arbeitet, sondern dass ein externer Beobachter Verhaltensweisen des Systems erkennen kann, die nicht explizit bei der Konstruktion des Systems vorgegeben wurden.

Flexibilität des Roboters bezüglich sich strukturell ändernder Aufgabenstellungen setzt höhere kognitive Leistungen voraus: Objekt- und Umwelterkennung, Planung von Bewegung und Handlungsausführung sowie deren Kontrolle, Lernen von Objekteigenschaften und langen Handlungssequenzen (mit sensomotorischen Parame-

tern), Generalisierung auf neuartige Situationen, Bewertung von Situationskontext, Generalisierung und Übertragung von kontext- oder raumgebundenem gelerntem Wissen auf neue Situationen, selbständige Bildung von autonomem Eigenverhalten aus Erfahrung und Hintergrundwissen (Analogie zur Übertragung von gelernten Handlungen ins Kleinhirn des Menschen), Kurz- und Langzeitgedächtnis – eine enorme Herausforderung. Die Flexibilität bezieht sich aber natürlich auch auf die Anpassung von Körper und Aktorik an die Umwelt, entweder im Sinne der Optimierung eines Körpers auf wiederholte ähnliche, aber spezielle Aufgabenstellungen oder aber die kurzfristige Körperanpassung an eine neu vorgelegte Aufgabe.

Es gibt hierfür zwei denkbare Möglichkeiten: für die langfristige Optimierung die Nutzung von Prinzipien der Selbstorganisation und Wachstumsprozessen (im Sinne einer selbständigen, vom Designer nur »genetisch vorgeprägten« Anpassungsstrategie, die sich an die von der Umwelt diktierten Randbedingungen anlehnt und den Anpassungserfolg geeignet bewertet) und für die zweite Möglichkeit die Adaptation der Robotermechanik über zusätzliche Vorrichtungen bzw. Werkzeuge. Die erste Möglichkeit entspricht der biologischen Evolution über tausende Jahre hinweg, die zweite erfordert die Weitergabe von Erfahrungswissen über den Gebrauch von Vorrichtungen von einer »Generation« an die nächste.

Schließlich ist es denkbar, dass Artefakte mit redundanter Aktorik ausgerüstet werden, deren Gebrauch sich durch Übung verbessert (durch zusätzliche Bereitstellung von Ressourcen; biologisch gibt es hier die Analogie der Vergrößerung von solchen Hirnarealen, die zur Steuerung häufig genutzter Gliedmaßen eingesetzt werden). Auf jeden Fall sollte es aber schon in nächster Zukunft einem flexibel einsetzbaren Serviceroboter durch geeignete aktorische Ausrüstung möglich sein, in halbstrukturierten Umgebungen arbeiten zu können, in denen sich Menschen natürlich bewegen: Wohnungen, öffentliche Einrichtungen, Fabriken, Kraftwerke. Darüber hinaus ist