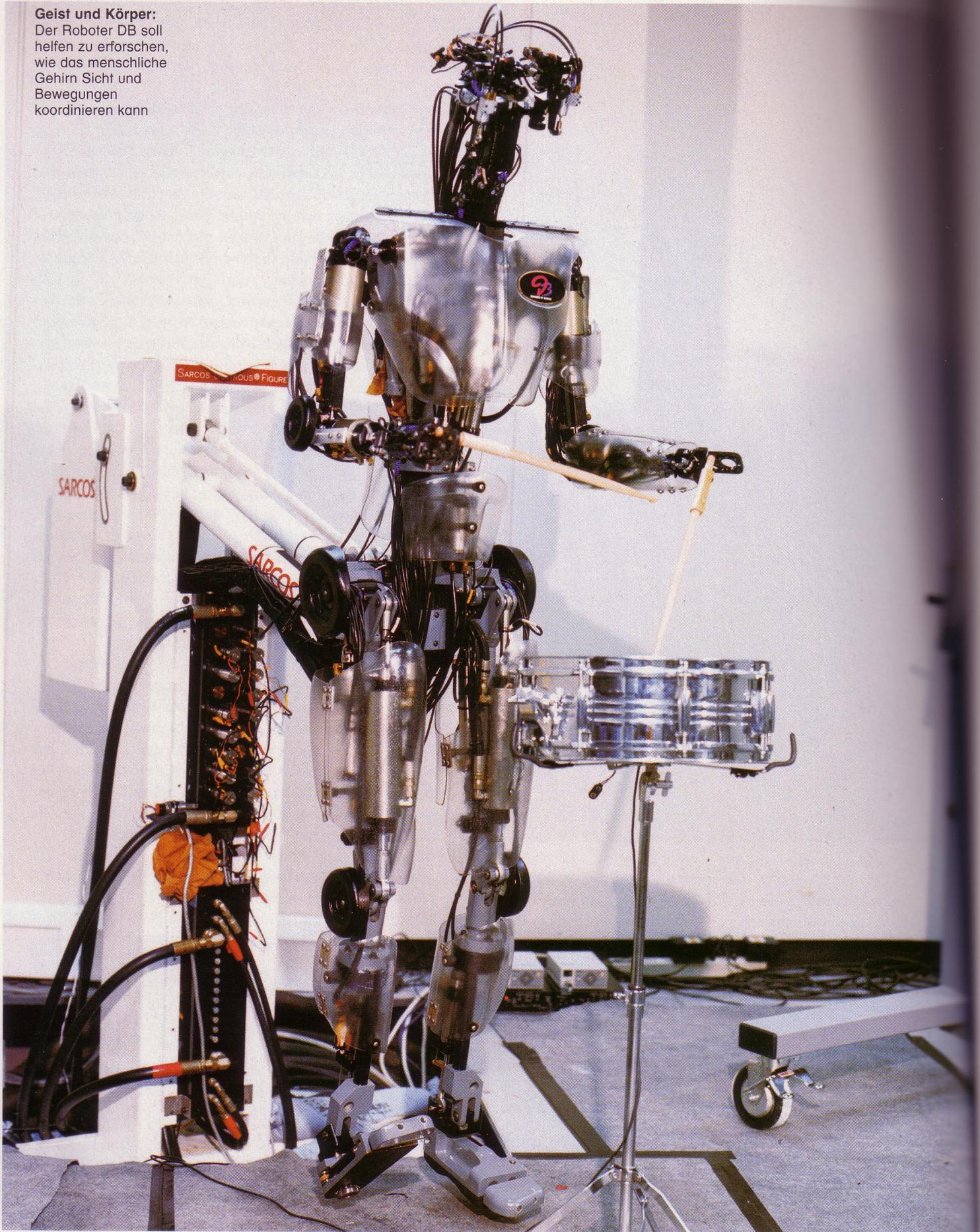


**Geist und Körper:**  
Der Roboter DB soll  
helfen zu erforschen,  
wie das menschliche  
Gehirn Sicht und  
Bewegungen  
koordinieren kann



## Was wir von Robotern lernen können

**Für den Japaner Mitsuo Kawato ist die Konstruktion menschenähnlicher Maschinen kein reiner technischer Selbstzweck. Robotik könnte vielmehr helfen zu erklären, wie das menschliche Gehirn funktioniert**

VON GREGORY T. HUANG; GRAHAM MACINDOE (FOTOS)

**E**s war ein recht frischer Oktobertag im vergangenen Jahr, als das Robotik-Institut der Carnegie Mellon University die Feierlichkeiten anlässlich seines 25-jährigen Bestehens begann. Robotik-Experten aus der ganzen Welt waren gekommen, um zu sehen, wie C-3PO, der Roboter Shakey, Hondas Asimo und Astro Boy in die Ruhmeshalle der Robotik aufgenommen wurden. Am nächsten Tag waren Demonstrationen zu sehen: laufende Roboter, schlängelnde Roboter und Roboter, die Dudelsack spielen. Am dritten Tag war Mitsuo Kawato an der Reihe. Die Lichter wurden abgedunkelt, und der Direktor der Advanced Telecommunications Research (ATR) Laboratorien für Computational Neurosciences in Kyoto betrat unter den Klängen von Rockmusik die Bühne.

Trotz des freundlichen Willkommens ist Kawato jedoch ein Außenseiter. Einer, der nichts davon hält, die Erfolge der modernen Robotik und damit seine eigene Arbeit immer wieder selbst zu feiern. Er beginnt seine Präsentation damit, langsam über die Bühne zu staken – eine Imitation dessen, wie steif und künstlich aktuelle humanoide Roboter noch immer gehen. Dies zeige uns, so Kawato, wie wenig die Wissenschaft noch immer davon versteht, wie das menschliche Hirn den Körper kontrolliert: Wenn sie das wirklich täten, könnten sie diesen Prozess in einem Roboter nachahmen. Aber Kawatos Thema

ist nicht – wie bei vielen anderen Sprechern an diesem Tag –, wie man die Bildverarbeitung oder die Navigation von Robotern verbessern kann. Stattdessen spricht er über die Funktion verschiedener Hirnregionen wie dem Kleinhirn oder der Basalganglien bei der Bewältigung sensomotorischer Aufgaben – in Begriffen, die auch Robotik-Spezialisten verstehen.

Kawatos Revers zielt ein Anstecker, auf dem steht „I love Robots“, aber es gibt einen großen Unterschied zwischen ihm und den anderen Konferenzteilnehmern. Er liebt Roboter

### kurz gefasst

**Humanoide Roboter** haben sich trotz ihrer beschränkten Fähigkeiten als interessante Modellsysteme für menschliche Fähigkeiten erwiesen.

**Roboter könnten** beispielsweise helfen zu klären, wie die Hand-Auge-Koordination funktioniert.

**Mitsuo Kawato** kombiniert zu diesem Zweck Daten aus der Magnetresonanztomografie mit den Ergebnissen seiner Versuche an humanoiden Robotern.

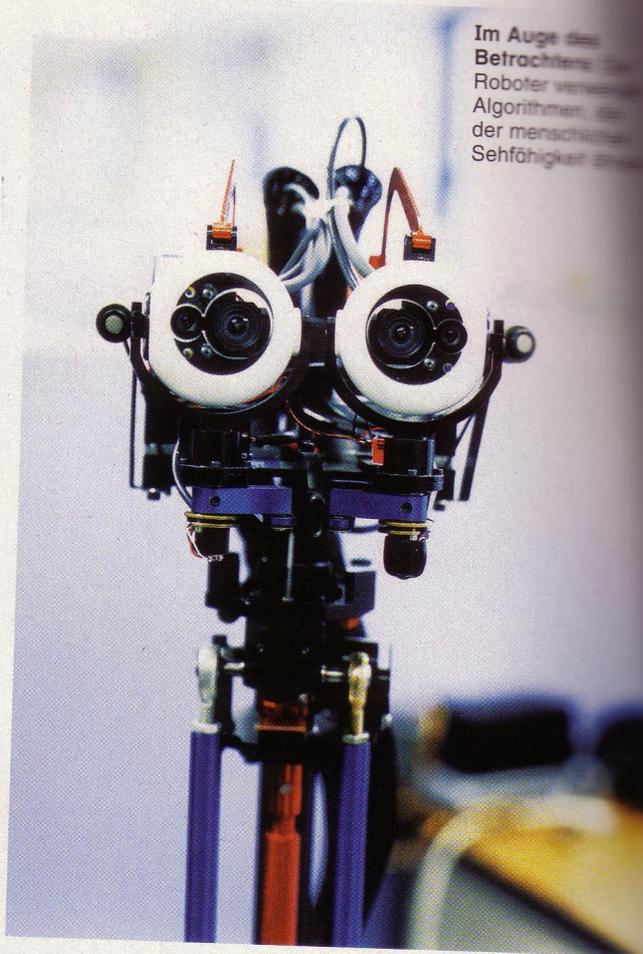
nicht, weil sie cool sind, sondern weil er glaubt, man könne mit ihrer Hilfe erklären, wie das menschliche Gehirn funktioniert. „Nur wenn wir versuchen, die menschlichen Hirnfunktionen in künstlichen Maschinen zu reproduzieren, können wir verstehen, wie die Informationsverarbeitung im menschlichen Gehirn funktioniert“, argumentiert Kawato. Seine Devise: „Das Gehirn verstehen, indem man es baut“. Wenn man beispielsweise einen Roboter so programmiert, dass er nach einem Gegenstand greift, könne man dabei etwas über die elektrischen Signalmuster lernen, die in einem menschlichen Gehirn entstehen, wenn ein Mensch seinen Arm steuert.

Dieser Gedanke ist überraschend und umstritten. Trotz der wachsenden Zahl menschenähnlicher Maschinen haben Menschen und Roboter noch immer sehr wenig gemein. Das menschliche Gehirn besteht aus Milliarden von Neuronen, die auf komplexe Art und Weise miteinander verknüpft sind, die kein Computerprogramm der Welt bislang simulieren kann. Aber Kawato glaubt, dass Experimente mit Robotern zumindest ein vereinfachtes Modell davon liefern könnten, was bestimmte Gruppen von Neuronen im menschlichen Gehirn eigentlich tun. Mit Hilfe fortschrittlicher Bildgebungsverfahren überprüft er, ob Gehirnzellen von Menschen oder Affen sich diesen Modellen entsprechend verhalten.

„Das unterscheidet sich sehr von der üblichen Begründung für die Entwicklung humanoider Roboter – bei denen betont wird, sie seien wirtschaftlich nützlich oder könnten zur Altenpflege eingesetzt werden“, meint der Robotik-Experte Christopher Atkeson von der Carnegie Mellon University. Vielmehr liege Kawatos Motivation darin, Roboter zu benutzen, um zu verstehen, wie Menschen denken, Entscheidungen treffen und mit der Welt interagieren. Das so gewonnene Wissen könnte Medizinern helfen, Therapien für Hirnverletzungen, Schlaganfälle oder neurologische Erkrankungen zu entwickeln – möglicherweise sogar für Bewusstseins- oder Verhaltensstörungen. Die Suche nach Elementen, die nötig sind, um einen sozial interaktiven Roboter zu konstruieren, könnte andere Forscher dazu motivieren, nach Hirnregionen zu suchen, die bei Autisten ausgeschaltet sind (Neuronen in den Basalganglien sind viel versprechende Kandidaten dafür). Ein Roboterarm, der instabil wird, wenn rückgekoppelte Signale verzögert werden, könnte Hinweise darauf geben, warum die Hände von Parkinson-Patienten zittern.

Als Werkzeug für das Verstehen der Funktion des menschlichen Geistes sind Roboter „extrem wertvoll“, erklärt Antonio Damasio, Leiter der Abteilung Neurologie der Universität von Iowa. Damasio hat mit drei Büchern über das Gehirn den Begriff der „Embodied Intelligence“ in der Öffentlichkeit bekannt gemacht. „Mit Hilfe von Robotern kann man Modelle implementieren und testen, wie etwa Bewegungen ablaufen“, erklärt er. Die Erweiterung solcher Modelle führt schließlich zu einer erweiterten Theorie des menschlichen Verstandes, ergänzt Damasio: „Wir wissen mehr und mehr darüber, was beispielsweise notwendig ist, damit das menschliche Bewusstsein funktioniert.“

Ein japanisches Sprichwort sagt: „Zu lehren bedeutet zu lernen“. Wenn man aus Kawatos Büro kommt und den Flur



Im Auge des Betrachters: Der Roboter verwendet Algorithmen, die der menschlichen Sehfähigkeit ähneln.

heruntergeht, trifft man auf die Roboterschule des ATR. In einer Ecke bringt ein Wissenschaftler dem Roboter DB bei – die Abkürzung steht für „Dynamic Brain“ –, mit Menschen zu interagieren. Der Roboter ist stattdessen gebaut, 1,90 Meter groß und 80 Kilogramm schwer, aber er bewegt sich schnell und elegant. Ein Wissenschaftler steht vor ihm und wedelt mit einem Stoffhund, während DB ihn beobachtet. Offensichtlich erregt das Stofftier seine Aufmerksamkeit. Er dreht den Kopf und folgt dem Spielzeug mit den Kameraaugen. Dann streckt er seinen hydraulischen Arm aus und streichelt den Hund, etwas unbeholfen, am Kopf. Auf einem großen Display nebenan kann man sehen, was der Roboter sieht und welche Algorithmen gerade bei ihm ablaufen.

**Aber DB ist nicht einfach nur ein weiterer Roboter**, der seine menschenähnlichen Fähigkeiten vorführt. Gordon Cheng, Chef der Arbeitsgruppe Humanoide Roboter bei ATR, stellt sich DB als Versuchstier vor, das Elektrizität isst und hydraulische Flüssigkeit blutet. Mit Robotern zu arbeiten, erklärt Cheng, lehre einen, „wie die Teile ineinander greifen, um ein komplexes System zu ergeben“, das das menschliche Gehirn und den menschlichen Körper emulieren kann.

Um DBs Arm zu kontrollieren, wenn er beispielsweise nach einem Gegenstand greift, errechnet die Software, welche Steuerungssequenzen den Arm in die richtige Position bewegen.

Wang und Cheng glauben, ein ähnlicher Prozess spiele sich auch im menschlichen Gehirn ab: Demnach verwenden wir „interne Modelle“, um die neuronalen Signale zu berechnen, die notwendig sind, um eine bestimmte Bewegung auszuführen. Wenn man also beispielsweise dabei ist, eine Kaffeetasse hochzuheben, greifen Neuronen im Gehirn auf diese Modelle zu, um zu errechnen, welche Abfolge von Signalen von der Schulter, zum Ellenbogen und Handgelenk geschickt werden müssen. Es ist, als ob das Gehirn jedes Mal permanent Berechnungen anstellen würde, wenn man Kaffee trinkt.

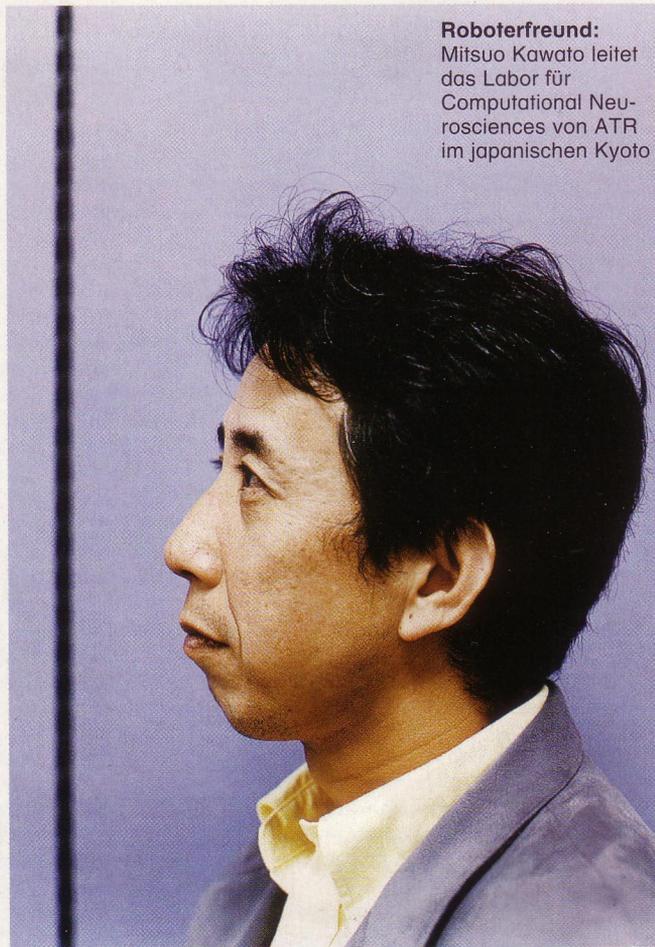
Das Design eines solchen Systems mag einem Roboter-Spezialisten intuitiv erscheinen – die meisten Neurowissenschaftler hielten es dagegen lange Jahre für lächerlich. Wie, fragten sie, können Neuronen solch komplexe Berechnungen anstellen? Sie glaubten, die Kommandosequenzen vom Gehirn wären viel einfacher strukturiert. Muskeln und Reflexe – nicht abstrakte Modelle – würden große Teile der menschlichen Bewegungen erklären. Aber im Verlauf der vergangenen zehn Jahre hat Kawato gewichtige Beweise für das Gegenteil gesammelt. Interne Modelle seien tatsächlich notwendig für die Steuerung von Arm- und Beinbewegungen; möglicherweise sogar für die Interaktion mit Objekten oder anderen Menschen, argumentiert er.

In der Praxis hat es sich allerdings als relativ schwierig herausgestellt, eine direkte Verbindung zwischen Menschen und Robotern herzustellen. Denn um das zu tun, müsste der Roboter mit seiner Soft- und Hardware die menschliche Physiologie und Neurologie auf das Genaueste abbilden. Tatsächlich passt DBs Gehirn nicht einmal in seinen Kopf, sondern belegt mehrere Serverschränke, wobei verschiedene Wissenschaftler notwendig sind, um die einzelnen Fähigkeiten des Roboters wie Greifen oder Jonglieren zu starten. Wie DB Aufgaben erfüllt, mag viel mit der menschlichen Art zu denken zu tun haben oder auch nicht. Um das herauszufinden, studiert Kawatos Team die Art und Weise, wie Menschen lernen, Probleme zu lösen.

In Experimenten, die in Kawatos Labor durchgeführt werden, liegen die menschlichen Versuchssubjekte in einem Magnetresonanztomografen, während sie lernen müssen, eine modifizierte Computermaus zu bedienen, um ein sich auf einem Bildschirm bewegendes Ziel zu verfolgen. Auf den Bildern des Computertomografen sind verschiedene Bereiche im Kleinhirn zu sehen, die während dieser Tätigkeit aufleuchten, was auf erhöhten Blutfluss in bestimmten Clustern von Neuronen hindeutet. Die Wissenschaftler glauben, dass diese Neuronen ein internes Modell der Koordinationsleistung des Menschen repräsentieren – ähnlich dem, das sie auch für DB programmiert haben.

Durch die Kombination von Magnetresonanztomografen-Bildern, die eine Auflösung im Millimeterbereich haben, mit Aufzeichnungen des zeitlichen Verlaufs der elektrischen und magnetischen Gehirnaktivitäten hofft Kawatos Team, Details des Zusammenspiels dieser Neuronen zu entschlüsseln. Kawato nennt das „den Geist dekodieren“ – jemandes Absicht erken-

**Roboterfreund:**  
Mitsuo Kawato leitet  
das Labor für  
Computational Neuro-  
sciences von ATR  
im japanischen Kyoto



nen, indem man die Muster seiner neuronalen Signale ausliest. Falls die Wissenschaftler erfolgreich sind, wäre dies ein echter Durchbruch beim Verständnis des menschlichen Geistes.

**Die Botschaften des Gehirns** in etwas zu übersetzen, das auch ein Roboter verstehen kann, wäre ein Schritt in Richtung eines technologischen Traums: Einem Maschine-Gehirn-Interface für die Roboter-Fernsteuerung, das den Benutzer an Ereignissen partizipieren ließe, die sich tausende von Kilometern entfernt abspielen. Ein Helm könnte die Hirnaktivitäten einer Person auslesen, und diese Signale, beispielsweise über das Internet, an einen humanoiden Roboter weitergeben. Nahezu in Echtzeit könnten die Handlungen dieser Person so von

**ROBOTER HABEN SICH FÜR DAS VERSTÄNDNIS DER  
FUNKTIONEN DES MENSCHLICHEN GEISTES  
ALS EXTREM WERTVOLLE WERKZEUGE ERWIESEN**

## Embodied Intelligence



**Der aufrechte Gang, die beiläufige Eleganz**, mit der ein Basketballspieler den Ball aus der Luft pflückt – was scheinbar einfach und natürlich aussieht, stellt die Wissenschaft immer noch vor Rätsel. Als Rodney Brooks – mittlerweile Leiter des MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory – Mitte der 80er Jahre den klassischen Ansatz der künstlichen Intelligenz einer radikalen Kritik unterzog, legte er jedoch den Grundstein für eine Verbindung zwischen Robotik und Kognitionsforschung, die helfen könnte, diese Rätsel zu lösen. Die Mehrheit der Forscher, die sich bis dahin mit künstlicher Intelligenz

beschäftigte, ging davon aus, dass Wahrnehmung und Denken symbolische Prozesse sind: Jedes intelligente Wesen – egal ob Mensch oder Maschine – formt demnach in seinem Kopf ein abstraktes Modell seiner Umgebung, die symbolische Repräsentation, die während des Denkens mit Hilfe logischer Operationen manipuliert wird.

Ein großer Nachteil dieses Ansatzes ist aber, dass die Symbole ihre Bedeutung daraus beziehen, dass andere Symbole auf sie verweisen. Eine Maschine kann zum Beispiel die Tatsache, dass sie sich in einem bestimmten Raum befindet, mit einem logischen Symbol IM\_RAUM beschreiben. Dieses Symbol kann man im programmierten Modell mit dem logischen Symbol TUER verknüpfen, das die Zustände offen und geschlossen einnehmen kann. Man kann dem Roboter dann leicht beibringen, dass er die Tür öffnen muss, wenn er in den Raum hineinwill. Was aber macht die Maschine, wenn die Tür blockiert? Hilfe holen? Wenn ja, von wem? Ohne Interpretationshilfe könnte die Maschine nur schwer entscheiden, was wirklich wichtig ist – derselbe Einwand gälte natürlich auch für Menschen, wenn das menschliche Denken auf diese Weise funktionieren würde.

Brooks' neues Credo lautete „Intelligence must have a body“. Zu jedem intelligenten System gehört ein Körper. Die Art dieser Verkörperung bestimmt die Art seines Denkens. Von symbolischer Informationsverarbeitung war nicht mehr die Rede. Insbesondere in Europa bildete sich eine Schule heraus, die sich mit „Embodied Artificial Intelligence“ befasste. Die Hypothese der Protagonisten dieser Schule lautet: Höhere kognitive Funktionen entstehen aus dem Zusammenspiel von gekoppelten einfachen, kognitiven Prozessen. Sprachverständnis beispielsweise hängt wahrscheinlich mit der Fähigkeit zusammen, den Gesichtsausdruck des Gegenübers zu erfassen, was sich wiederum auf die Fähigkeit herunterbrechen lässt, sein Gegenüber als solches zu erkennen und zu imitieren.

**Zentrales Element** dieses Ansatzes ist der Begriff der Emergenz: Das scheinbar intelligente Verhalten entsteht aus dem Zusammenwirken des so genannten Agenten mit seiner Umgebung. Der Hirnforscher Valentin Braitenberg – bis 1994 Direktor am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen – zeigte bereits 1984 in seinem Buch „Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology“, wie mit einfachen

einem digitalen Double wiedergegeben werden. Um so etwas zu bauen, müssen die Wissenschaftler spezifische Signale im Gehirn finden, sie übersetzen, ohne nennenswerte Verzögerung übertragen und zur Kontrolle einer Maschine am anderen Ende der Leitung verwenden. Von einer Lösung dieses Puzzles ist man jedoch weit entfernt. Aber Kawatos Mix aus Neurowissenschaft und Robotik könnte dazu beitragen, zumindest die ersten Teile davon an die richtige Stelle zu legen.

Wenn man Roboter verwendet, um das menschliche Gehirn zu verstehen, könnte dies auch die Autonomie von

Robotern verbessern – obwohl das zunächst einmal nicht viel heißen mag. Der Pionier auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz, Marvin Minsky vom MIT, spottet: „Die heutigen Roboter scheinen alle gleichermaßen dumm zu sein. Unfähig, selbst einfache Probleme des gesunden Menschenverstandes zu lösen.“ Das mag wie billige Polemik klingen, aber das erfolgreichste Produkt von iRobot, einem führenden Roboterhersteller aus Massachusetts, ist ein simpler Staubsauger. Industrieroboter lackieren Autos und stellen Mikrochips her, können aber nichts tun, wozu sie nicht programmiert sind. Aber es gibt ein wachsendes Interesse, besonders in Japan und in Europa, Erkenntnisse aus den Neurowissenschaften zu verwenden, um neue, bessere humanoide Roboter zu konstruieren.

Auch in Kawatos Labor ist man bereits dabei: Im Zuge eines millionenschweren Projektes wird DB zurzeit aufgerüstet, wobei Kawato Erkenntnisse aus dem Studium des menschlichen Gehirns verwendet. Der neue Roboter, der, wie auch DB, von der Firma Sarcos aus Salt Lake City entworfen wird, soll in seiner Anatomie, der Architektur seines Gehirns, seiner

## DAS ERFOLGREICHSTE PRODUKT DES ROBOTERHERSTELLERS IROBOT WAR BISLANG EIN SIMPLER, RELATIV DUMMER AUTONOMER STAUBSAUGER

ausgestattete, extrem simpel aufgebaute autonome Fahrzeuge können komplexes Verhalten zeigen können, das durch sehr einfache Mechanismen bewirkt wird.

Die so genannten „Didabots“ sind beispielsweise in der Lage, ohne explizite Steuerung verstreute Objekte zu einem Haufen zusammenzuschieben. Die kleinen Roboterfahrzeuge sind rechts und links ihrer Vorderseite mit Berührungssensoren ausgestattet. Sie sind so programmiert, dass sie normalerweise einfach geradeaus fahren. Wenn einer der Sensoren angesprochen wird, drehen sich die Roboter vom Hindernis weg und fahren dann geradeaus weiter. Eigentlich sollten sie also Hindernissen ausweichen, aber Würfel, die direkt vor ihnen liegen, nehmen sie nicht wahr, sondern schieben sie einfach vorwärts. Setzt man einige dieser Roboter in einem einige Quadratmeter großen Areal aus, in dem zufällig verteilte Styroporwürfel liegen, schieben die Roboter die Würfel nach einiger Zeit zu einem oder zwei Haufen zusammen. Ändert man die Konfiguration des Gesamtsystems nur geringfügig – bringt man die Sensoren beispielsweise weiter vorn an oder macht die Würfel größer als die Roboter –, geht die

Verhaltensweise wieder verloren. Das Beispiel verdeutlicht, was Professor Rolf Pfeifer vom Artificial Intelligence Lab der Universität Zürich eine „ökologische Nische“ nennt: Die Emergenz entsteht nur aus dem Zusammenwirken des „autonomen Agenten“ mit einer spezifischen Umgebung. Indem man natürliche Eigenschaften des Systems ausnutzt, kann man dieses Phänomen fördern und sich eine Menge Steuerung von Robotern ersparen.

Wie Mitsuo Kawato folgen auch Pfeifer und dessen Mitarbeiter einem synthetischen Ansatz: Sie bauen Modelle intelligenter Systeme, um zu verstehen, wie diese funktionieren. Dabei spielt die Entwicklung eine wichtige Rolle: Weil auch der Mensch nicht von Geburt an über alle sensomotorischen Fähigkeiten verfügt, versuchen die Wissenschaftler auch Entwicklungsprozesse nachzubauen, um der menschlichen Intelligenz auf die Schliche zu kommen. Gabriel Gomez und Kollegen konnten sogar erstmals zeigen, dass ein Roboter, bei dem körperliche Entwicklung simuliert wurde, schneller lernt als ein statisches Vergleichssystem. Vor fünf Jahren hat sich mit der „Epigenetischen Robotik“ ein inter-

disziplinärer Forschungsansatz aus Entwicklungspsychologie und Robotik herauskristalliert, in dessen Rahmen solche Konzepte und Untersuchungen intensiv diskutiert werden – beispielsweise auf den jährlich stattfindenden Tagungen und dem Preprint-Server Cogprints. Eigentlich stammt der Begriff der Epigenetik aus der Genforschung, wo sich zunehmend die neue Erkenntnis durchsetzt, dass Vererbung nicht nur eine Sache der Gene allein ist, sondern übergeordnete Regulationsmechanismen existieren. Der Schweizer Psychologe und Philosoph Jean Piaget führte den Begriff in die Psychologie ein, wo er schließlich von der interdisziplinären Community freudig aufgegriffen wurde.

Ob sich die zentrale These halten lässt, wonach Bewusstsein aus dem Zusammenspiel einfacher Wahrnehmungsfunktionen entspringt, ist allerdings noch experimentell zu belegen. Giulio Sandini, Giorgio Metta und David Vernon vom LiraLab der Universität von Genua wollen in einem internationalen Kooperationsprojekt mit RobotCub jetzt eine offene Roboterplattform entwickeln, die speziell für die Untersuchung kognitiver Entwicklungsprozesse konstruiert wird. **Wolfgang Stierer**

Kraft und seinem Energiebedarf sehr viel menschenähnlicher werden als sein Vorläufer. Er wird beispielsweise kraftvolle Beine bekommen, die ihm erlauben zu laufen und zu rennen. Wenn der neue Roboter Ende 2005 fertig ist, will einer seiner ersten Nutzer ihn verwenden, um Funktionsstörungen des Gehirns, wie sie bei älteren Menschen auftreten, zu untersuchen.

Neben der unmittelbaren Arbeit in seinem Labor will Kawato den Grundstein für eine weiter gehende Zusammenarbeit zwischen Robotik und Neurowissenschaften legen: Gemeinsam mit Honda und Sony versucht er die japanische Regierung davon zu überzeugen, die Mittel für ein weltweites Projekt bereitzustellen, in dem ein Roboter entwickelt wird, der mindestens die geistigen und körperlichen Fähigkeiten eines fünf Jahre alten menschlichen Kindes aufweisen soll. Abgesehen von dem mit diesem Projekt verbundenen technischen Fortschritt würde das auch den Neurowissenschaften wichtige neue Erkenntnisse bescheren. Allerdings würde es wohl über die nächsten 30 Jahre hinweg pro Jahr mindestens 500 Millionen Dollar kosten, dies zu bewerkstelligen.

Die Evolution von Robotern in etwas, das dem Menschen ähnlicher wird, ist möglicherweise unvermeidlich. Experten stimmen darin überein, dass an der Funktionsweise des

Gehirns nichts Magisches ist – nichts, das aus sich heraus zu komplex ist, um herauszufinden, wie es funktioniert, und es zu kopieren. Was Kawato in seinem Labor gelernt hat, ist, dass das Zusammenwachsen von Mensch und Maschine uns etwas über uns selbst lehren kann. ■

**Gregory T. Huang** ist Redakteur der US-Ausgabe von Technology Review.

## links + bücher

[www.epigenetic-robotics.org](http://www.epigenetic-robotics.org) Diskussions- und Informationsplattform zum Thema Epigenetic Robotics

[www.tokyolectures.org](http://www.tokyolectures.org) Vorlesungen zur Embodied Artificial Intelligence und Robotik-Entwicklungen in Japan

<http://cogprints.soton.ac.uk> Aufsätze zu Kognitionsforschung und Robotik im Volltext

**R. Pfeifer, C. Scheier: Understanding Intelligence,** MIT Press, 2001 Grundlagen der Embodied AI