

Hans-Arthur Marsiske

# Wie Maschinen denken lernen

## Von Roboterintelligenz, Kognition und Bewusstsein

Klüger sollen sie werden, die maschinellen Begleiter des Menschen. Was das im Einzelnen bedeutet, ist gar nicht so einfach zu benennen. Die verschiedenen Forschungsprojekte eint offensichtlich die Suche nach den Grundelementen des Denkens. Wie diese dann zu übergeordneten Architekturen bis hin zu Systemen mit komplexen Bewusstseinsstrukturen zusammengesetzt werden können, wird dagegen hoch kontrovers diskutiert.

**A**m Bewusstsein scheiden sich die Geister. Ist es „der vertrauteste und zugleich rätselhafteste Aspekt unserer Existenz“, den es mit wissenschaftlichen Methoden zu ergründen gilt? So sieht es Anil Seth, Leiter des neu gegründeten Sackler Centre for Conscious-

ness Science an der University of Sussex. Oder ist das Bewusstsein „ein Artefakt unserer abendländischen Sicht auf das Gehirn“, wie es Jochen Steil formuliert? Der Direktor des CoR-Lab (Research Institute for Cognition and Robotics) an der Universität Biele-

feld weist darauf hin, dass das Phänomen „Bewusstsein“ in vielen Sprachen nicht einmal einen Namen habe: „Geist, geistige Leistungen, Wahrnehmung werden benannt, aber kein Bewusstsein.“

Während Steil bei seiner Arbeit daher ganz auf den Begriff des Bewusstseins verzichtet, erschließt sich für Seth ein faszinierendes Forschungsfeld. Drei große Fragen locken ihn. Inwieweit verfügen außer dem Menschen noch andere Lebewesen über Bewusstsein? Wann bildet es sich in der individuellen Entwicklung eines Menschen heraus? Und schließlich: Ist es möglich, Bewusstsein mit Computer und Robotern künstlich zu erzeugen?

Eine europaweite Ausschreibung zum Thema wird durch das weit gefächerte Spektrum an Haltungen zusätzlich spannend. Bis Anfang November waren Forschungsteams aufgefordert, Projektvorschläge zum Thema „Beyond Autonomic Systems – the Challenge of Consciousness“ einzureichen. Ausgeschrieben wurde das Programm von CHIST-ERA, einem Konsortium von bisher zehn nationalen Forschungsorganisationen in Europa, das sich langfristigen Herausforderungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien widmet.

Dabei ist es offenbar schon im Vorfeld zu Kontroversen gekommen. Mit Italien, Deutschland, Irland und Belgien verweigerten vier Konsortiumsmitglieder dem Programm ihre Unterstützung. Anfragen zum Stand der Planungen werden gar nicht oder recht zurückhaltend beantwortet. So vertröstete Koordinator Raymond Fournier von der französischen Agence Nationale de la Recherche (ANR) auf März 2011, wenn die Anträge begutachtet seien.

Auf eine Definition des Begriffs „Bewusstsein“ wurde in der Ausschreibung verzichtet und stattdessen eine Liste mit Eigenschaften präsentiert, die von bewussten Systemen erwartet werden. Dazu gehören etwa die Fähigkeit, zukünftige Aktionen zu planen und sich dabei auf das Wissen über vergangene Aktionen zu stützen, aus den Wahrnehmungsdaten interne Modelle über sich selbst und die Umgebung zu bilden oder gezielt die Aufmerksamkeit zu steuern. Forschungsprojekte sollten mindestens zwei Aspekte aus dieser Liste aufgreifen.

Lediglich zwei Wissenschaftler haben auf der Homepage von CHIST-ERA öffentlich ihr Interesse bekundet. So möchte Claude Touzet von der Université de Provence in Marseille die von ihm entwickelte Theorie der neuronalen Kognition demonstrieren, derzufolge sich mit der Rechenleistung von 60 PCs das kognitive Verhalten eines Menschen nachbilden lässt. Dieses Rechnernetzwerk soll sich selbst organisieren, verbunden mit Sensoren und einer mobilen Plattform mit Roboterarm und Greifer. Mit gezieltem Training, das die Selbstorganisation unterstützt, will Touzet innerhalb von drei Jahren das kognitive Niveau eines siebenjährigen Kindes erreichen.

Ausschließlich auf die Softwareebene konzentriert sich Martin Randles an der Liverpool

3.1.2011

c't 2011, Heft 2

John Moores University. Er will Bewusstsein erzeugen, indem er „relativ simple Rechen-einheiten“ zu einem komplexen Netzwerk verknüpft. Das Systembewusstsein soll aus der Interaktion dieser Einheiten erwachsen.

In Deutschland neigt die Mehrheit der Robotikforscher zur Position von Jochen Steil und meidet den Begriff „Bewusstsein“ komplett. Stattdessen wird lieber von „Kognition“ oder „kognitiven Systemen“ gesprochen. Diese Terminologie mag philosophisch weniger belastet sein, ist aber ansonsten kaum weniger schillernd. Jedes Forschungsteam scheint seine jeweils eigene Definition zu verwenden.

Michael Beetz, der an der Technischen Universität München den Exzellenzcluster CoTeSys (Cognition for Technical Systems) mit koordiniert, sieht ganz allgemein in der Bewegungssteuerung die Grundlage aller kognitiven Fähigkeiten. In Anlehnung an den britischen Forscher Daniel Wolpert spricht er von „motor chauvinism“. „Das Gehirn ist dazu da, die Motorsteuerung in Tieren zu erledigen, besonders dann, wenn es komplex und adaptiv wird“, sagt Beetz. „Selbst die größten Bäume haben kein Gehirn und brauchen auch keins, weil sie sich nicht zielgerichtet bewegen.“ Für besonders wichtig hält er prädiktive Fähigkeiten, die Vorhersagen darüber ermöglichen, wie sich Steuerungssignale, die an die Muskeln geschickt werden, auswirken werden. „Das hilft, mit der Menge an Sensordaten umzugehen, die auf uns einströmen. Denn solange diese Daten mit den erwarteten Signalen übereinstimmen, kann man sie eigentlich vergessen und muss sich nur noch um die außergewöhnlichen Daten kümmern.“

## Bewusstloses Denken

Diese prädiktiven Fähigkeiten kamen kürzlich bei einer Vorführung zum Einsatz, mit der die Münchner Forscher einiges Aufsehen erregten: Zwei Roboter bereiteten völlig autonom einen Pfannkuchen zu. Dabei gab es erleichternde Bedingungen, so mussten die Roboter etwa keine Eier aufschlagen und mit Milch und Mehl zu einem Teig verrühren, sondern verwendeten eine Fertigmischung. Die musste der erste Roboter aber zunächst einmal im Kühlschrank identifizieren, wofür er sich auf Bilder stützte, die er aus dem Internet bezog, und dann dem zweiten Roboter bringen, der am Herd wartete. Spannend wurde es, als die erste Seite fertig gebraten war und der Pfannkuchen gedreht werden musste. Beim Greifen des Bratenwenders musste der Roboter einkalkulieren, was er damit vorhatte. Das konnte durchaus die Konsequenz haben, dass der erste Griff suboptimal war.

„Die richtige Handlung, am richtigen Objekt, auf die richtige Art und Weise – das ist ausgesprochen kompliziert“, sagt Beetz und illustriert das mit einer beeindruckenden Liste von Fragen, die sich allein beim vermeintlich simplen Aufnehmen eines Objekts auf einem Tisch stellen: „Wo stelle ich mich



Ein Wesen ohne Bewusstsein und Gefühle? Beim Replikanten Roy (Rutger Hauer) ist das schwer zu glauben.

hin? Welchen Arm benutze ich? Wie greife ich nach dem Objekt? Welchen Griff wende ich an? Wie positioniere ich meine Finger auf dem Objekt? Wie viel Kraft wende ich an? Welcher Bahn folge ich, wenn ich es hochhebe? All diese Fragen müssen vom Roboter beantwortet werden und zwar so, dass da am Ende eine Zahl steht.“

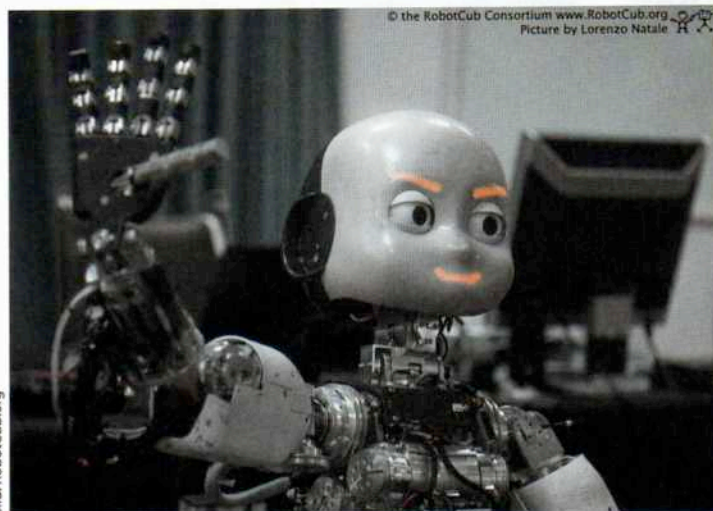
## Koordinierung

Bei der Pfannkuchendemo war noch vieles vorprogrammiert. Die Forscher wollten damit den Weg skizzieren, den sie vor sich haben, und die dort wartenden Forschungsprobleme identifizieren, erklärt Beetz. Es ginge darum, rationale Rekonstruktionen zu entwickeln, die mehr oder weniger plausibel menschliches Problemlösen nachbilden. Aber selbst wenn diese Rekonstruktionen täuschend echt aussehen und dem Roboter das Wenden des Pfannkuchens womöglich noch eleganter gelingt als einem Menschen, dürfe das nicht zu der Schlussfolgerung verleiten, dass in biologischen Systemen die gleichen Prozesse ablaufen wie in technischen.

Zwischen Technik und Biologie finden sich immer wieder verblüffende Analogien. Als Beispiel nennt Beetz den „probabilistischen Erwerb von Umgebungskarten“, bei dem Roboter mit Hilfe von Bayes-Filtern aus

ihren Sensordaten ein auf Wahrscheinlichkeitswerten beruhendes Modell der Umgebung aufbauen. Das auf den Mathematiker Thomas Bayes zurückgehende Filterverfahren hilft, Spam-Mails auszusortieren, und hat sich auch in der Robotik gut bewährt. Bei der Kartenerstellung können allerdings immer wieder mehrdeutige Sensordaten anfallen, wonach sich der Roboter sowohl an einem Punkt als auch an einem anderen befinden könnte. In der Wahrscheinlichkeitsverteilung spiegeln sich diese Punkte als lokale Maxima wider. Ganz ähnliche Muster konnten in der Gehirnaktivität von Ratten beobachtet werden. Hier kam es in mehrdeutigen Situationen zu einer Ballung neuronaler Aktivitäten, die nahelegen, dass die Natur im Prozess der Evolution die gleiche Lösung gefunden haben könnte wie die Ingenieure.

„Die Anwendung dieses probabilistischen Gedankens auf komplexe Datenstrukturen ist eine wahnsinnig mächtige Idee und findet gegenwärtig viele Anhänger“, sagt Beetz. Die Verbundwahrscheinlichkeit, die die relevanten Eigenschaften einer Modellwelt betrachtet und deren mögliche Kombinationen bewertet, erlaube es, jeder dieser möglichen Welten eine Wahrscheinlichkeit zuzuweisen. „Wir haben zum Beispiel gelernt, wie der Tisch gedeckt ist, und haben einen Generator für Mahlzeiten geschrieben. Dafür haben



Wenn ich groß bin, werde ich ganz schlau: Der iCub wurde speziell für die Erforschung der Kognition entwickelt.

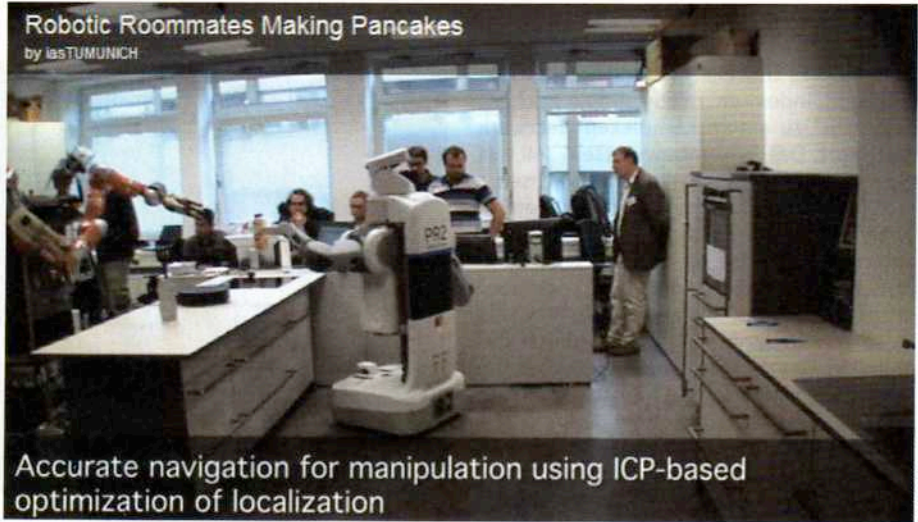
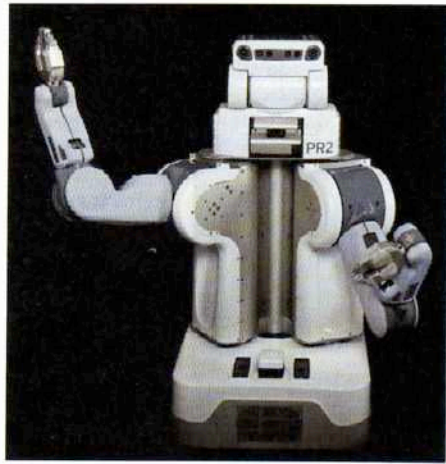


Bild: Willow Garage

Ist der Pfannkuchen rund, damit das Denken seine Richtung wechseln kann? Rosie und PR2 erkunden die kognitiven Stolpersteine der Küchenarbeit.

wir uns gemerkt, wer hat teilgenommen, wann war die Mahlzeit, welche Objekte haben wo gestanden. Wenn wir jetzt sehen, welche Objekte auf dem Tisch sind, können wir sagen, welche Objekte wahrscheinlich fehlen oder welche Mahlzeit wahrscheinlich serviert wird. Oder wenn wir wissen, dass Hans und Mary frühstücken wollen, können wir sagen, was wahrscheinlich auf den Tisch gestellt werden sollte. Das Starke an dieser Idee ist, dass ich all diese Fragen auf Grundlage von nur einigen Beispielen probabilistisch beantworten kann.“

## Denken und Sprechen

Neben der Bewegungssteuerung bieten Sprache und Kommunikation einen weiteren wichtigen Ansatzpunkt zur Erforschung der Kognition. Er steht an der Universität Bielefeld im Vordergrund, neben München der zweite wichtige Standort zur Erforschung künstlicher Kognition in Deutschland. Hier haben die Studien zur kognitiven Robotik denn auch vor 20 Jahren mit einem gemeinsamen Forschungsbereich von Informatikern

und Linguisten begonnen. „Kommunikation gehört für mich unbedingt zur kognitiven Robotik“, sagt Jochen Steil und meint damit nicht nur die Interaktion zwischen Roboter und Mensch, sondern auch die Interaktion mit der Welt insgesamt.

Die enge Verbindung von Sprache und Denken entspricht nicht nur der Alltagserfahrung, sondern wird auch durch psychologische Studien gestützt. Demnach finden im Durchschnitt etwa 70 Prozent aller verbalen Erlebnisse in aller Stille als innere Monologe in den Köpfen der Menschen statt. An der University of Nevada, Las Vegas, ließ Russell Hurlburt Testpersonen auf ein akustisches Zeichen hin aufzeichnen, was sie in dem Moment gerade dachten. Es stellte sich heraus, dass bis zu 80 Prozent der geistigen Erfahrung verbaler Natur war, seltener visuell oder emotional. In anderen Experimenten hat sich gezeigt, wie stark Sprache die Wahrnehmung formt: So konnten Versuchspersonen Objekte sicherer erkennen, wenn sie sie benennen konnten. Der Psychologe Gary Lupyan von der University of Wisconsin, Madison, räumt diesen kognitiven Aspekten sogar Vor-

rang vor der kommunikativen Bedeutung von Sprache ein. Die Verbindung innerer Bilder mit Worten mag unseren frühen Vorfahren bei der Nahrungssuche geholfen haben, auch ohne dass die Menschen damals schon viel miteinander gesprochen haben. „Wenn Sie nach einer Beere suchen, sind Ihre Chancen, sie schnell zu finden, höher, wenn Sie ihren Namen kennen“, sagt Lupyan.

Ganz ähnlich formuliert es Steil für Roboter, wenn er sagt: „Kognitive Robotik will semantisch sinnvolles Verhalten erzeugen.“ Darunter versteht er die Fähigkeit, Gegenständen Identitäten und Manipulationsmöglichkeiten zuzuschreiben, die auf andere Situationen übertragbar sind. Die Realisierung solcher Systeme sei durchaus schon in Reichweite. „Was bisher aber ganz fehlt, ist das, was die klassische Künstliche Intelligenz bereitstellt, also Planung, rationales Schließen, vom Abstraktionsniveau her hoch angesiedelte Funktionen.“ Die Organisation von Verhalten und Wissen innerhalb der Maschine sei die eigentliche Schwierigkeit. „Auf welcher Ebene brauchen wir etwa Repräsentation? Müssen wir einzelne Bewegungen repräsentieren? Reicht es, wenn wir nur den Arm repräsentieren? Oder können wir ganz darauf verzichten? Müssen Objekte in der Welt ständig repräsentiert werden oder erst dann, wenn der Roboter sie sieht? Erst wenn ich das geklärt habe, kann ich mit den klassischen Methoden der Künstlichen Intelligenz etwas anfangen.“

## Parallelentwicklung

Bei der Entwicklung dieser höheren kognitiven Funktionen setzt die Forschergemeinde seit etwa zwei Jahren verstärkt auf Open Source. Thomas Rühr, der an der TU München im CoTeSys-Projekt mitarbeitet, hält das für einen viel versprechenden neuen Ansatz, der das gesamte Gebiet entscheidend voranbringen könnte, weil dann nicht jeder „das Rad neu erfinden“ müsse. Derzeit arbeiten elf Teams weltweit, darunter auch die Münchner, mit dem Roboter PR2 von der

**Kognition dient der Bewegungssteuerung, meint Michael Beetz. Selbst die größten Pflanzen brauchen daher kein Gehirn.**



kalifornischen Firma Willow Garage, der mit dem Open-Source-Betriebssystem ROS (Robot Operating System) läuft. Die 400 000 US-Dollar teuren Roboter wurden aufgrund von Forschungskonzepten kostenlos zur Verfügung gestellt.

Auf die gleiche Weise wurden auch 20 iCubs verteilt. Bei dem humanoiden Roboter, der nach dem Vorbild eines dreijährigen Kindes gestaltet wurde, ist nicht nur die Middleware YARP (Yet Another Robot Platform) Open Source, sondern auch die komplette Hardware sowie alle darauf aufbauenden Softwareentwicklungen.

Steil ist gleichwohl skeptisch und hängt die Erwartungen niedriger. Es sei ein Unterschied, ob ein Betriebssystem wie Linux als Open Source entwickelt werde oder Robotersoftware. Bei Linux gebe es klare technische Fragestellungen, etwa die Entwicklung von Gerätetreibern. Dagegen ließe sich nicht so klar beschreiben, was bei einem Roboter zum Beispiel ein gutes Sehsystem ausmache. „Da gibt es dann vielleicht zehn Gruppen, die an einem solchen System arbeiten. Welches davon die für alle verbindliche Basis werden soll, ist aber nicht so einfach zu definieren. Die einen schauen vielleicht mehr auf die Aufmerksamkeit, die anderen auf 3-D-Tracking, wieder andere auf die Rekonstruktion von 3-D-Gestalt aus 2-D-Bildern. Dafür braucht man jeweils spezielle Algorithmen, die sich nicht unbedingt miteinander vertragen. Selbst im Bereich der Aufmerksamkeitssteuerung gibt es verschiedene Ideen, das zu realisieren. Da sind parallele Entwicklungen unvermeidlich und das muss auch so sein.“

## Gedankenarchitektur

Die problematische Frage bleibt für Steil die Organisation der Teilfähigkeiten. Je nachdem ob eine zentrale Instanz die Aufträge an die Subsysteme verbe oder die Teilkomponenten untereinander Nachrichten austauschten, werde ganz unterschiedliche Soft-

ware gebraucht. So werde die vom iCub-Konsortium entwickelte Drei-Schichten-Architektur in Bielefeld nicht verwendet, weil die dort gewünschten Funktionen damit nicht realisierbar seien. „Fragen der Architektur gehören zu den schwierigsten Forschungsfragen“, sagt er und kommt noch einmal auf das Problem der Repräsentation von Objekten zurück. „Ist deren momentane Ansicht wichtig? Haben sie eine spezielle Identität? Ist ein 3-D-Modell erforderlich? Ein EU-Projekt verfolgt die These, das Wesentliche an einem Objekt sei das Wissen, wie ich damit umgehen muss. Demnach müssten die Handlungsmöglichkeiten repräsentiert werden, das Aussehen ist vielleicht gar nicht so interessant.“

Steils Arbeitsgruppe verfolgt die Idee, dass man für die Aufmerksamkeit gar keine Objekte braucht, sondern etwas, was die Forscher Proto-Objekte nennen. Das ist mehr als ein Pixel, aber viel weniger als ein Objekt, eher ein „Blob“, eine Art virtuelle Blase, die ein paar Eigenschaften des Objekts grob skizziert. „Wir wissen etwa, ob er sich bewegt und vielleicht eher länglich geformt ist“, sagt Steil. Eine solche Beschreibung reiche für die meisten Objekte des Alltags. „Nun geht es aber weiter: Muss ich in meinem System diese Blobs die ganze Zeit erinnern und verwalten? Auf welcher Ebene muss ich sie mit Detailwissen anreichern? Wann wird der Markenname wichtig, der auf einer Tasse steht? Für all das brauche ich dann entsprechende Software. Je nachdem, welcher Philosophie ich anhänge, komme ich zu ganz anderen Lösungen.“

Steil kann sich vorstellen, dass Kognition am Ende auf einfache Grundelemente zurückgeführt werden könnte. Wie die Bewegungen des iCub durch Kombinationen von Elementarbewegungen realisiert werden sollen, könnte auch komplexe Kognition letztlich aus dem Zusammenspiel vergleichsweise einfacher Bausteine resultieren. Aussagen über das Wesen der Kognition an sich sollten daraus

aber nicht vorschnell abgeleitet werden. „Wir wissen nicht, ob das Gehirn das tatsächlich so macht, ob das unsere Vorstellung von Kommunikation ist oder ob wir anders nicht sinnvoll darüber nachdenken können“, gibt Steil zu bedenken. „Wir können ja nicht in Milliarden von Neuronenverbindungen denken. Blöcke und Kombinationen von Blöcken dagegen können wir mental handhaben.“

Ähnlich sieht es auch Beetz: „Wir können versuchen, rationale Rekonstruktionen zu entwickeln, die mehr oder weniger plausibel sind und menschliches Problemlösen nachbilden. Damit ist dann nicht gesagt, dass in biologischen Systemen die gleichen Prozesse ablaufen. Ich bezweifle auch, ob man die Frage überhaupt so stellen sollte.“ Von Robotern mit eigenem Bewusstsein hält er ohnehin nichts. Er sieht sie als Werkzeuge, die für den Menschen ganz bestimmte Aufgaben erledigen sollen.

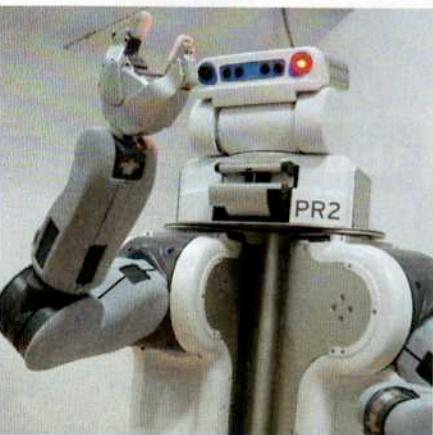
## Roboterträume

Allerdings dürfen diese Werkzeuge auch mal träumen, wenn auch in sehr begrenztem Rahmen. „Das Durchspielen von Aktionen in hypothetischen Situationen wird es wohl in ein oder zwei Jahren schon geben“, vermutet Beetz. „Wenn etwa ein Roboter bei der Haushaltstätigkeit einen Fehler gemacht hat, vielleicht indem er einen weichen Gegenstand falsch gegriffen hat, sodass er ihm entglitten ist, könnte es sein, dass er nachts, wenn nichts zu tun ist, die Situation in Simulationen noch einmal durchspielt. Am nächsten Tag kann er das dann in der Realität ausprobieren. Das käme einem Traum nahe, aber auf einem sehr begrenzten, technischen Niveau.“

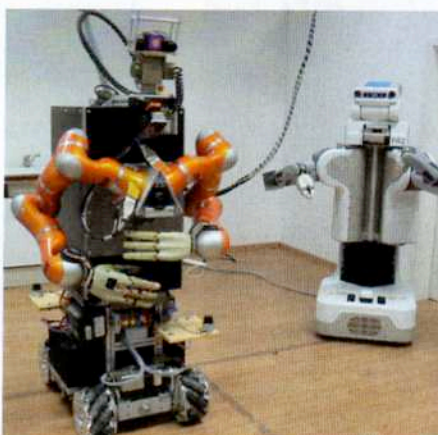
Ganz ähnlich sieht es Steil: „Aus meiner Sicht ist träumen nichts Besonderes. Es ist eine Aktivität des Gehirns, eine Art Simulation, die auch im wachen Zustand abläuft. Interne Simulationen, die der Planung und der Konsolidierung von Wissen dienen, werden sicherlich auch Roboter durchführen.“

Ob Philip K. Dick mit dieser Antwort zufrieden gewesen wäre? „Träumen Androiden von elektrischen Schafen?“ fragte er im Titel seines 1968 erschienenen Romans, der dem Film „Blade Runner“ zugrunde liegt. Wer erlebt hat, wie Rutger Hauer nach seinem bewegenden Schlussdialog den Griff um die Taube lockert und sie in die Freiheit entlässt, wird wohl eher dazu neigen, dem künstlichen Menschen etwas mehr als nur „interne Simulationen“ zuzugestehen.

An der Überführung solcher Roboterträume von der Science-Fiction in die Realität arbeitet Andrei Khrennikov. Der aus Russland stammende Mathematiker erforscht an der Linnaeus University im schwedischen Växjö dynamische Systeme. Mit Rechenformeln, die sich bei der Beschreibung von Vorgängen im Inneren von Atomen schon bewährt haben, will er im Computer die psychische Struktur des Menschen nachbilden. Dazu fängt er ganz unten an, quasi beim Fundament. „Bevor wir Träume erzeugen können, brauchen wir ein Unbewusstes“, sagt Khrennikov. „Das



Bin ich wirklich nur ein Werkzeug?  
Der PR2 scheint zu zweifeln, als er seine Hand betrachtet, die beim Menschen auch als das „Werkzeug des Geistes“ bezeichnet wird.



Nicht schön, aber vielseitig: Rosie (links), der mit Kuka-Leichtbauarmen und DLR-Händen ausgestattete Roboter, und PR2 von Willow Garage sind die Stars am Robotiklabor der TU München.



Neben dem PR2 und dem iCub wird auch der Nao von Aldebaran Robotics gern als Plattform für Kognitionsforschung genutzt. Sein Vorteil: Er ist viel billiger als seine großen Geschwister.

ten bekommen. Das Zusammenleben mit ihnen dürfte auf Dauer interessanter und angenehmer sein als mit einer seelenlosen Maschine, auch wenn sie anfälliger für neurotische Reaktionen sind und gelegentlich mal eine Sicherung durchbrennen kann, wenn der Mensch die Spülmaschine falsch eingeregelt oder die Wohnung mit dreckigen Schuhen betreten hat.

Psychische Probleme seien der Preis, den wir für unseren hochkomplexen Verstand bezahlen, meint Khrennikov. Aber nur dank unseres Unbewussten seien wir in der Lage, mit neuen, unvorhergesehenen Situationen kreativ umzugehen. Langfristig sieht er daher auch im Cockpit von Flugzeugen oder im militärischen Einsatz Roboter, in denen unbewusste Mechanismen wirken. Wenn es dabei zu Störungen kommt, wird dann nicht mehr der Ingenieur gerufen, sondern der Psychoanalytiker.

### Grenzen des Denkens?

Der erfährt dann vielleicht endlich, wovon Roboter so träumen. Während sich umgekehrt mehr und mehr Menschen an Robotertherapeuten wenden könnten. Für Khrennikov ist das „die Natur der Symmetrie“.

Michael Beetz findet eine solche Vision dagegen eher erschreckend. „Ich würde Roboter mehr als Werkzeuge betrachten“, sagt er. „Eine Motivation meiner Forschung ist es, Menschen in einer alternden Gesellschaft die Möglichkeit zu geben, länger unabhängig zu sein.“ Auf die Frage, ob Roboter wirklich denken oder das Denken nur simulieren, antwortet er: „Wenn ich unter Denken ein Wissen verstehe, das ich nicht explizit habe, sondern aus anderem Wissen herleite, in eine explizite Form bringe und in konkrete Aktionen umsetze, dann würde ich sagen, Roboter denken schon heute. Wenn ich Denken als ganzheitlichen Prozess betrachte, wie er bei Menschen stattfindet, dann würde ich hoffen, dass Roboter nie denken.“

Aber können sich die kognitiven Fähigkeiten von Robotern auf Dauer überhaupt eingrenzen lassen? Steil ist überzeugt, dass sich diese Frage schon im Lauf der nächsten zehn Jahre ganz konkret stellen wird. Grund dafür sind die rasanten Fortschritte bei Robotikprothesen. „Je mehr sich die Verbindung von Körper und Gehirn mit Technik der Anwendungsreife nähert, müssen wir darüber diskutieren, wie weit wir dabei gehen wollen“, sagt er. In nicht allzu ferner Zukunft werde es Prothesen geben, die dem Menschen eine größere Leistungsfähigkeit verleihen als mit natürlichen Gliedmaßen.

Eine Begrenzung der Robotiktechnologie liefe dann letztlich darauf hinaus, die Entwicklung der menschlichen Möglichkeiten zu begrenzen. Das dürfte gesellschaftlich sehr schwer durchzusetzen sein. Vielleicht wäre es da am Ende vernünftiger, die Roboter ihren eigenen Weg gehen zu lassen. Mit etwas Glück werden sie dann schließlich klüger als die Menschen und setzen sich selbst Grenzen. (jk)

Bewusstsein baut auf dem Unbewussten auf. Der Fehler der Forschungen zur künstlichen Intelligenz, die seit den sechziger Jahren versuchen, das menschliche Denken nachzubilden, besteht darin, das auszublenden.“

### Unbewusst

Die Lehre von Sigmund Freud, wonach im menschlichen Geist eine Fülle widersprüchlicher Ideen wirkt, liefert die Grundlage für das Modell. Kontinuierlich arbeitende Prozessoren erzeugen darin pausenlos neue Ideen. „Das Gehirn ist ständig aktiv“, betont Khrennikov. „Auch während des Schlafs und bei tiefer Meditation. Selbst bei Koma-Patienten, die auf keinerlei äußere Reize reagieren, wurde eine hohe Gehirnaktivität gemessen, die von bewussten Denkprozessen zunächst nicht zu unterscheiden ist.“ Das Unbewusste schaltet nie ab.

Die Prozessoren beschreibt der Mathematiker als „gewöhnliche Iterationen“, also Wiederholungen einer immer wieder gleichen Rechenformel, bei der die Ergebnisse eines Rechenschritts in die Ausgangswerte für den nächsten einfließen. Solche Rechnungen lassen sich auch als geometrische Formen darstellen und können auf einen Punkt zustreben, der als Attraktor bezeichnet wird. Er stellt die Lösung der Iteration dar, die das Unbewusste an das Bewusstsein übermitteln will.

Auf dem Weg dorthin wirken aber verschiedene Filter. Die Ideen werden zunächst danach bewertet, ob sie überhaupt interessant genug sind, um bewusst zu werden. Zum anderen wird geprüft, ob sie verboten sind. „Spannend wird es“, so Khrennikov, „wenn eine Idee gleichzeitig als sehr interessant und streng verboten eingestuft wird. Sie kann dann nicht direkt ins Bewusstsein übertragen werden, sondern durchläuft im Unbewussten weiterhin die Zyklen von Iteration und Attraktion, tritt in Wechselwirkung mit anderen Prozessoren und kann auf indirekte Weise das Bewusstsein beeinflussen.“ Mit dem Modell ließen sich die von Freud be-

schriebenen psychischen Phänomene beschreiben wie Neurosen, Träume oder Fehlleistungen.

Khrennikov vergleicht sein Vorhaben mit der Entwicklung des mathematischen Modells vom physischen Raum, die an die 300 Jahre gedauert habe. Dank der heutigen Rechenkapazitäten könnte die Modellierung des Geistes etwas schneller gelingen, räumt er ein. Aber die Herausforderung sei ähnlich: „Am Anfang steht eine völlig neue Mathematik. Denn das Konzept des kartesischen Raums mit der geraden Linie als kürzester Verbindung zwischen zwei Punkten ist ungeeignet, um den geistigen Raum zu beschreiben.“

### Geistige Räume

Khrennikov spricht von „sich verzweigenden, baumartigen Strukturen im nicht-archimedischen oder ultra-metrischen Raum“. Entfernungen haben hier eine völlig andere Bedeutung als im „euklidischen metrischen Raum“ mit seinen drei Dimensionen, der unseren Alltag bestimmt. Im Unbewussten können dadurch Ideen miteinander in Wechselwirkung treten, die im Bewusstsein strikt voneinander getrennt würden. Die Folge sind die berühmten freudschen Versprecher wie „rückgratlose Aufklärung“ oder zum „Vorschwein“ gekommene Tatsachen und ebenso die oft fremdartige Welt der Träume.

Die Gültigkeit seines Modells will Khrennikov mit Hilfe von Robotern demonstrieren, die im Kontakt mit anderen Robotern und Menschen ihre Persönlichkeit entwickeln sollen. Das müssen nicht unbedingt physische Roboter sein, es ginge ebenso mit virtuellen Persönlichkeiten im Internet. Dem Mathematiker geht es vorrangig um Grundlagenforschung. Die Nachbildung der menschlichen Psyche im Computer soll helfen, sie besser zu verstehen.

Khrennikov ist gleichwohl überzeugt, dass unbewusste Komponenten auch bei Haushaltsrobotern von Vorteil sein können, die dadurch mehr den Charakter eines Gefähr-