

Roboter mit Grips

In der Welt der Science-Fiction sind Roboter intelligent, in der Realität sind sie dumm. So mangelt es ihnen etwa an Flexibilität und den richtigen Reaktionen zur rechten Zeit. Genau das aber bringt **Jan Peters** seinen Maschinen bei. Der Informatiker, Maschinenbauer und Elektrotechniker leitet eine Arbeitsgruppe am **Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik** in Tübingen.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

In Jan Peters' Labor ist es ziemlich eng. Wie soll es auch anders sein, wenn mitten im Raum eine Tischtennisplatte steht. Das Erste, was man sieht, wenn man hereinkommt, ist ein schwerer Industrieroboter – ein Gelenkarm, mannshoch und so dick wie der Schenkel eines Sumo-Ringers. Ein zweiter Roboterarm hängt neben der Tischtennisplatte von der Zimmerdecke herab.

Peters und seine vier Mitarbeiter haben ihre Schreibtische an die Fenster geschoben. Ihre Computer brauchen nicht viel Platz. Wohl aber die Roboter. Bei Peters lernen sie Vor- und Rückhand, Geschicklichkeitsspiele oder unbekannte Objekte zu greifen – alles Dinge, die einer Maschine auch heute noch schwer zu vermitteln sind, obwohl es seit einem halben Jahrhundert programmierbare Roboter gibt.

Moderne Roboter können manches, keine Frage. Auf den Millimeter genau schweißen sie Karosseriebleche zusammen, 1000-mal am Tag, ermüdungsfrei. Roboterhündchen spielen Fußball, schlenzen die Kugel mit der Schnauze ins Tor und rollen sich klä-

fend auf den Rücken, wenn sie einen Treffer gelandet haben. Humanoide Roboter schreiten auf zwei Beinen voran, geben die Hand und sagen „Guten Tag“. Doch noch immer ist die Welt der Roboter so starr und unflexibel wie der Steinkreis von Stonehenge.

LERNZIELE: MEHR FLEXIBILITÄT UND PASSENDE REAKTIONEN

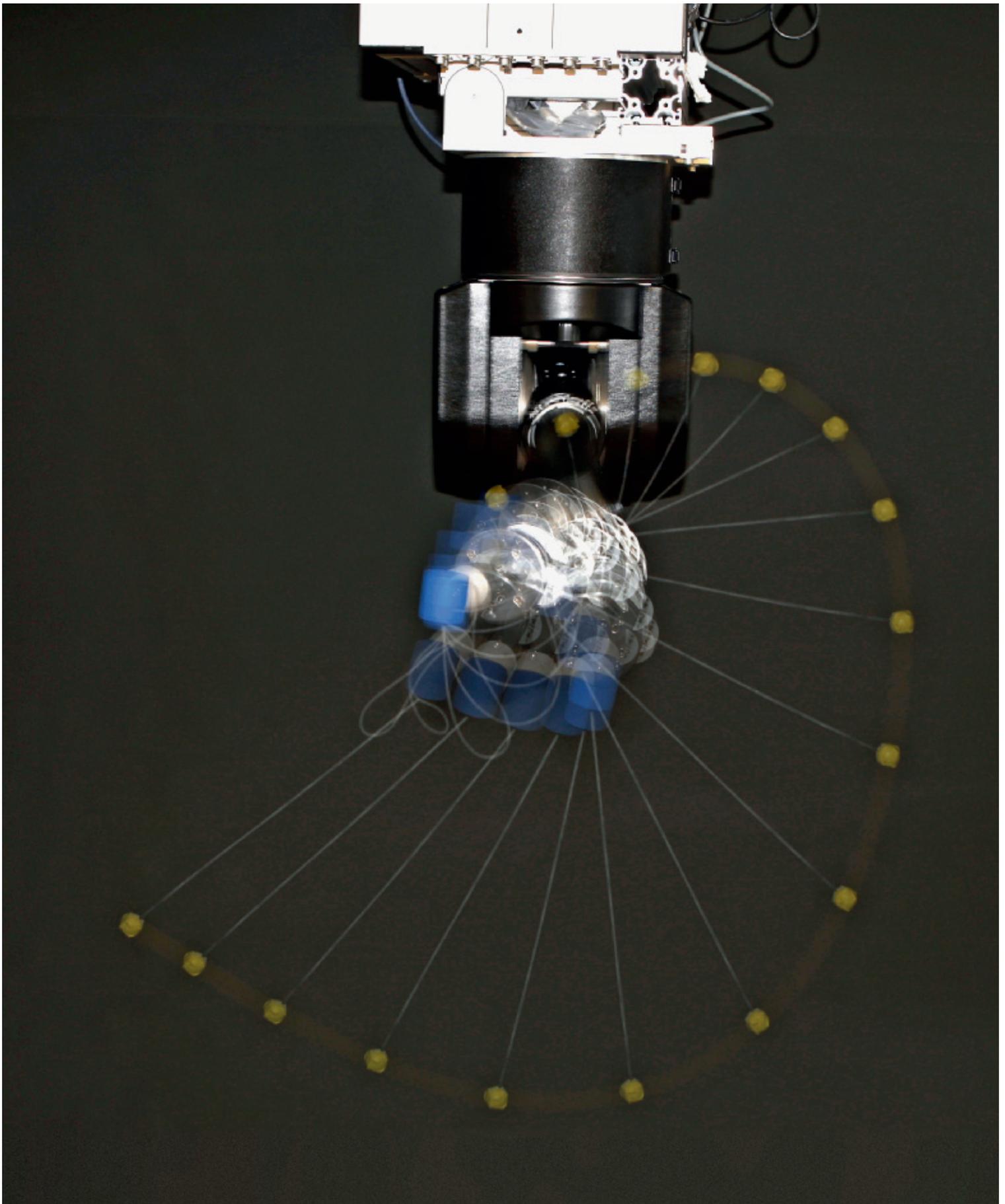
Fabrikröbter machen 1000-mal am Tag dieselbe Bewegung, nicht mehr und nicht weniger. Kullert ein Bauteil aus der Position, melden sie „Fehler“. Und damit sie niemanden verletzen, werden sie hinter Gittern und Lichtschranken in Arbeitszellen weggesperrt. Fußballhündchen verlieren sich im Raum, wenn man die Banden vom Spielfeld entfernt. Und der elektromechanische Humanoide kommt ins Straucheln, wenn er über einen flauschigen Veloursteppich läuft.

Dass Roboter dumm sind, stimmt auch heute noch. Ihre Dummheit manifestiert sich vor allem darin, dass sie sich nicht an unseren wechselhaften Alltag anpassen können. Wer seinem

humanoiden Kompagnon anerkennend auf die Schulter klopf, muss damit rechnen, dass der zu Boden kracht, weil er den unerwarteten Klaps nicht abfedern kann.

Mehr Flexibilität und die richtige Reaktion zur rechten Zeit – das ist das, was Roboter noch lernen müssen. Und genau das bringt Jan Peters seinen Maschinen bei. Peters ist Informatiker, Maschinenbauer und Elektrotechniker. Er leitet eine Arbeitsgruppe für Roboter-Lernen in der Abteilung für Empirische Inferenz am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen. Nebenan entwickeln Kollegen Theorien und Rechenvorschriften des statistischen Lernens. Andere bringen dem Computer bei, Strukturen wiederzuerkennen.

Jan Peters ist hier der Einzige, in dessen Labor zentnerschwere Roboter stehen oder an baumdicken Betonträgern von der Decke hängen. Was sich Peters und seine Mitarbeiter – Bioinformatiker und Ingenieure – ausdenken, wird direkt an die Maschine gesendet und in Bewegung umgesetzt. Die Tübinger Forscher versuchen, den



Kein Kinderspiel für einen Roboter: Um mit dem Becher (blau) den Ball zu fangen, imitiert der Arm zunächst die Bewegung, die ihm die Tübinger Forscher vormachen, und verbessert sich anschließend selbst.

» Die Tübinger Forscher versuchen, den Robotern das Lernen beizubringen. Die Maschinen sollen Bewegungen nicht einfach wie Programme abspulen, sondern je nach Situation flexibel neu zusammensetzen.

Robotern das Lernen beizubringen. Die Maschinen sollen Bewegungen nicht einfach wie Programme abspulen, sondern je nach Situation flexibel neu zusammensetzen.

EIN WEG ZWISCHEN ROBOTIK UND MASCHINELLEM LERNEN

Vermutlich macht es auch der Mensch nicht anders: Einfaches Zugreifen beherrschen schon Babys. Im Lauf der Zeit lernen sie, das Greifen nach Bedarf abzuwandeln. Schnell zupacken, fest oder feinfühlig fassen – am Ende beherrscht der Mensch mehr als 60 Greifvarianten. Doch wie macht man eine Maschine aus Kabel und Stahl so klug wie ein Kleinkind? Die Tübinger wählen dazu einen Weg zwischen zwei Welten, die seit Jahren eher ne-

beneinander existieren, der Robotik und dem maschinellen Lernen. Peters nimmt die goldene Mitte.

Die klassische Robotik entwickelt Maschinen, die auf bestimmte Zwecke zugeschnitten sind, wie der Roboter in der Autofabrik. Der Programmierer legt genau fest, welche Bewegungsbahnen der Roboter abfährt, wie viel Kraft er benötigt, um eine Motorhaube zu heben, und wie er seine Gelenke drehen soll. Das Ergebnis ist der klassische Diener, der stumpf seine Befehle ausführt. Das maschinelle Lernen befasst sich weniger mit kiloschwerer Roboter-Hardware. Es ist eher virtuell.

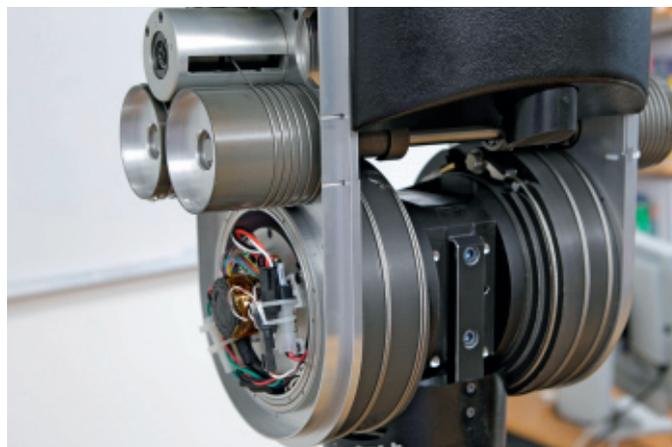
Ein Computer lernt etwa, bestimmte Muster zu identifizieren. In Briefverteilzentren etwa lesen heute Schrifterkennungsprogramme in Bruchteilen von Sekunden Adressen aus. Sie haben

gelernt, wie der Buchstabe „A“ aussieht, und wägen sehr genau ab, ob ein unleserliches Etwas tatsächlich noch ein „A“ oder eher ein anderer Buchstabe ist. Peters rührt beides zum lernfähigen Roboter zusammen. „Weltweit gibt es ungefähr 5000 Wissenschaftler, die sich mit *Machine Learning* befassen, etwa 6000 forschen in der Robotik“, sagt Peters. „Aber nur sechs Forschergruppen verknüpfen wirklich beides – und eine davon sind wir.“

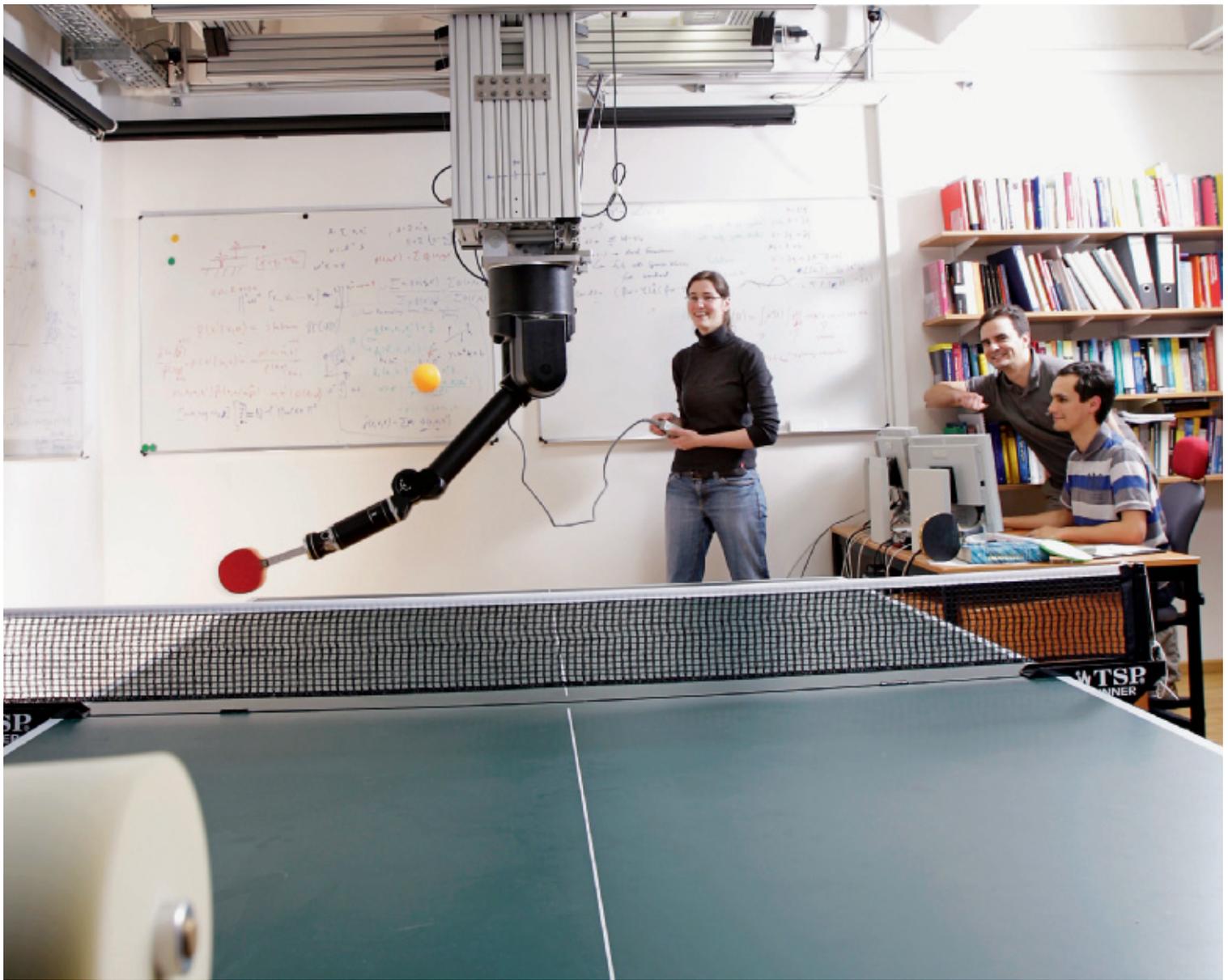
EIN ROBOTER LERNT FANGEN

Tatsächlich wird am Beispiel Roboter ziemlich schnell klar, wo die Grenzen des maschinellen Lernens liegen – beim Fang-den-Ball etwa. Bei diesem Geschicklichkeitsspiel hängt an einem kleinen Holzbecher eine Kordel mit

An die Hand genommen: Katharina Mülling führt den Roboterarm, um ihm den Schlag mit einem Tischtennisschläger zu zeigen (links). Bowdenzüge an den Gelenken des Roboters machen den Arm nachgiebig und ermöglichen einen gefahrlosen Kontakt mit ihm (rechts).



Fotos: Axel Griesch (2)



einer Kugel, die durch geschicktes Hin- und Herschwingen in den Becher geschleudert wird. Wollte man einem Roboter einfach durch maschinelles Lernen Fang-den-Ball beibringen, bräuchte man Engelsgeduld, denn die herkömmlichen Lernverfahren pirschen sich gleichsam vom Punkt null an das Problem heran. Sie testen Tausende von Varianten durch, verändern die Beschleunigung des Arms, die Drehung aller Gelenke, die Bewegungsrichtungen.

„Ein solcher Roboterarm lässt so viele Möglichkeiten zu, dass man niemals in überschaubarer Zeit zu einem Ergebnis kommt und den Ball fängt“, sagt Jan Peters. Auch die Programmierung à la Industrieroboter ist problematisch, weil die Analyse der komplexen Schwungbewegung sehr aufwendig ist: Zunächst

pendelt die Kugel sanft hin und her, dann schleudert man sie mit einem Ruck herum und in den Becher – aus dem Hin und Her wird eine ungleichmäßige, ruckartige Bewegung. „Genau diese komplexen Bewegungen sind mit traditionellen Mitteln so schwierig zu programmieren“, sagt Peters.

ERST IMITIEREN UND DANN SICH SELBST VERBESSERN

Also hat er ein Roboter-Lern-System aus mehreren Komponenten entwickelt. Es zerlegt das Lernen und Abrufen von Bewegungen in mehrere leicht verdauliche Pakete – und nutzt zudem ungewöhnliche Methoden wie das Imitieren. Denn zunächst einmal muss man dem Roboter klarmachen, was er eigentlich tun soll. Am schnellsten

Im Match gegen eine Ballkanone macht sich der Roboter schon gut. Um mit einem menschlichen Partner spielen zu können, muss er noch üben. Katharina Mülling, die einen Not-Aus-Schalter hält, Jan Peters und Jens Kober überwachen sein Training.

» Zunächst einmal muss man dem Roboter klarmachen, was er eigentlich tun soll. Am schnellsten geht das, indem man der Maschine die Bewegung vormacht – wie der Tennislehrer, der den Schüler bei der Hand nimmt und mit ihm die Vorhand einstudiert.

geht das, indem man der Maschine die Bewegung vormacht – wie der Tennislehrer, der den Schüler bei der Hand nimmt und mit ihm die Vorhand einstudiert.

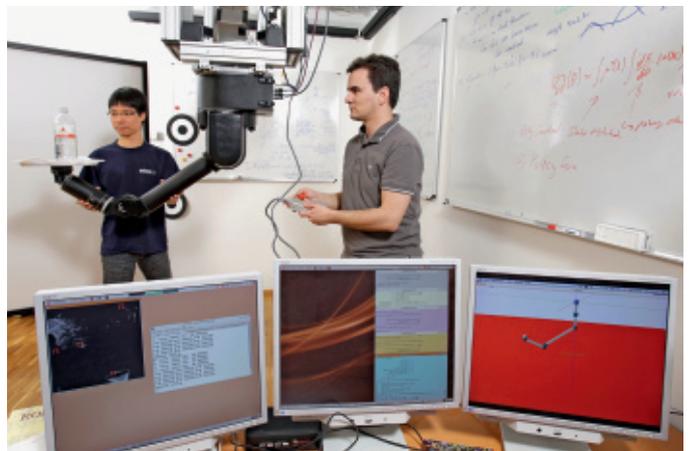
Beim Fang-den-Ball-Spiel führte Peters' Mitarbeiterin Katharina Mülling den Arm von Laborroboter WAM und schwang den Ball in den Becher. WAM

kannte damit den ungefähren Bewegungsablauf. Dann folgte Schritt zwei. Wie ein Tennisschüler musste WAM die Bewegung perfektionieren, um den Ball ganz allein in den Becher zu bug-sieren. In der Sprache der Roboter-Experten heißt das *Reinforcement Learning* – selbstverstärkendes Lernen. „Letztlich besteht das Ziel des Roboters dar-

in, den Abstand zwischen Kugel und Becher zu verringern“, erklärt Jan Peters. „Liegt die Kugel schließlich im Becher, ist der Abstand minimal.“

Das Experiment gelang: Nachdem Katharina Mülling WAM gezeigt hatte, was zu tun ist, brauchte er nur etwa 60 Versuche, bis er den Bogen raus und die richtigen Beschleunigungen und

Härtetest für jeden Kellner: Jan Peters und Duy Nguyen-Tuong stoßen den Roboterarm an, damit dieser lernt, den Schubser auszugleichen und die Flasche auf dem Tablett zu balancieren.



Drehbewegungen gefunden hatte. Heute locht er jede Kugel erfolgreich ein. Keine schlechte Leistung, meint Max-Planck-Forscher Peters: „Wir hatten hier schon Besucher, die ganz zerknirscht waren, weil sie es minutenlang vergeblich probiert hatten.“

GELENKE, DIE DEN ROBOTER NACHGIEBIG MACHEN

So weit wären das beinahe noch klassische Ansätze. Doch das Tübinger Roboter-Lern-System, das „Motor-Skill-Learning-System“, geht weiter. Zunächst speichert es die erlernten Bewegungen, die *Primitives*. Diese werden von einem Software-Baustein, dem *Supervisor*, verwaltet. Das Ziel der Forscher: Je nach Situation gibt der *Supervisor* den Befehl, bestimmte *Primitives* abzuspielen. In den meisten Fällen ist es nötig, die *Primitives* an die neue Situation anzupassen oder mehrere erlernte *Primitives* zu vermischen, um sekundenschnell richtig zu reagieren – so wie der Tennisspieler die einstudierte Vorhand ständig variieren muss, am ausgestreckten Arm, beim Volley oder beim Hechten. „Der Mensch kennt viele Situationen, in denen er erlerntes Verhalten plötzlich anpassen muss“, sagt Peters, „etwa, wenn man zum ersten Mal auf Inline-Skates steht.“

Inzwischen spielt WAM nicht mehr nur Fang-den-Ball, sondern auch Tischtennis. Noch übt er nach *Reinforcement-Learning*-Strategie. An die Tischtennisplatte hat Jan Peters eine Ballkanone geschraubt. Die passt die Bälle gleichmäßiger zu, als es ein Mensch je könnte. Die Schüsse pariert WAM mit Leichtigkeit. Mit einem menschlichen Gegenspieler aber kann er noch nicht mithalten. Denn Tischtennis ist ein ungeheuer schneller



Eine Sache der Konzentration: Manuel Gomez Rodriguez übt, den Roboterarm mithilfe seiner Gehirnströme zu dirigieren. Elektroden leiten die Befehle direkt aus seinem Gehirn ab.

Sport – und ausgesprochen komplex. Ein Schmetterball auf die Platte gedroschen, ein Heber bis zur Tischkante: WAM muss seinen Arm enorm beschleunigen und in Sekundenbruchteilen positionieren, wenn er treffen soll.

Anders als in herkömmlichen Robotern sitzen in WAMs Gelenken keine starren elektromechanischen Antriebe, sondern flexible Bowdenzüge wie in der Fahrradbremse. Damit kann WAM Positionen weich ansteuern und sogar nachgeben, wenn er mit seinem menschlichen Trainingspartner zusammenstößt – eine Voraussetzung für das Miteinander von Technik und Mensch. „Wenn ein Bowdenzug reißt,

sind wir locker eine Stunde mit der Reparatur und mit Schrauben beschäftigt. Aber die Vorteile eines solchen nachgiebigen Roboters sind riesig“, sagt Peters.

MOTOR-PRIMITIVE GEBEN FLEXIBILITÄT IN ECHTZEIT

Im Moment lernen die Forscher und WAM, mit welchen Kräften und wie schnell die Gelenke beim flotten Tischtennis angesteuert werden müssen, wie elastisch die Bowdenzüge reagieren und wann sich der Arm schließlich korrekt bewegt. Noch tüfteln sie. Sicher ist, dass das Motor-



Mathematische Handlungsanweisungen: Katharina Mülling und Jan Peters leiten die Formeln ab, mit denen der Roboter arbeitet. Währenddessen diskutieren Jens Kober und Oliver Kroemer, welche Bewegungen der Roboter beherrschen muss, um Blumen gießen zu können.

Skill-Learning-System das Tischtennis-spiel in mehrere *Primitives* zerlegen wird. Will man Flexibilität in Echtzeit, scheint das die Lösung der Wahl zu sein. Jede aufwendigere Berechnung wäre zu langsam. Zu einer sauberen Rückhand gehört auch, dass der Roboter den Ball schnell erfasst. WAM überwacht die Position des Balls mit mehreren Kameras. Eine flinke Bildverarbeitungssoftware ist da ein Muss.

EINE BELOHNUNG FÜR DEN „GUTEN ROBI“

Sechs Arbeitsgruppen weltweit – das ist eine überschaubare Wissenschaftler-Gemeinde. Jan Peters und seine Kollegen kennen die anderen gut, Forscher in den USA und in Japan. Der Max-Planck-Forscher hat lange an der University of Southern California in Los

Angeles gearbeitet, dort seinen Ph. D. gemacht. Er sagt *Rewarding*, wenn er meint, dass das *Reinforcement Learning* wie beim Pawlow'schen Hund nach dem Prinzip der Belohnung abläuft. Klappt der Versuch, gibt es Futter. Peters: „Der Roboter lernt, wie er ein ‚guter Robi‘ wird.“

Je nachdem, welches Ziel er hat, kann er seine *Primitives* dann abändern. Er folgt einem Ziel, dem *Goal*. Entsprechend lässt sich mit einer Goal-Funktion der gespeicherte Bewegungsablauf variieren. Peters' Mitarbeiter Jens Kober hat das zunächst in der virtuellen Welt ausprobiert und seinem Computer beigebracht, mit einem Dartpfeil bestimmte Sektoren auf einer imaginären Scheibe zu treffen. Vor wenigen Wochen war er in Japan und übertrug die Befehle auf den Laborroboter. „Zwar langte der einige Male

daneben, weil die Mechanik der Greifhand nicht immer mitspielte, aber einige Pfeile trafen exakt ins richtige Eck“, sagt Kober.

ARBEITSTEILUNG WEIST EINEN VIELVERSPRECHENDEN WEG

Supervisor, Primitive-Archiv und Goal-funktion sind nur einige Elemente des Roboter-Lern-Systems. Noch einige andere Instanzen wirken mit, bevor der Bewegungsbefehl gegeben wird. Doch es zeigt sich, dass alle Komponenten flexibel zusammenarbeiten und dass Arbeitsteilung in Sachen Roboterbewegung offensichtlich ein vielversprechender Weg ist. Schon heute gibt es Assistenzroboter, denen man durch Anleitung und Imitation Bewegungen beibringen kann. Doch in der Regel arbeiten die nur als dritte Hand, heben

und halten schwere Bleche oder Motorenenteile. Sekundenschnelle Flexibilität ist da kaum gefragt.

„Wenn uns in Zukunft tatsächlich Assistenzroboter im Haushalt oder bei der Pflege helfen sollen, dann müssen sie genau das leisten können – sich schnell an wechselnde Umgebungsbedingungen anpassen“, sagt Peters. Der Bedarf an solchen Assistenten scheint groß zu sein. Weltweit surren bereits fünf Millionen iRobot-Staubsauger durch die Haushalte. Schnelle Flexibilität ist aber auch hier nicht gefragt. Der Reinlichkeits-Robi brummt mitunter eine halbe Stunde durchs Wohnzimmer, ehe er zur Ladestation zurückgleitet. WAM hätte für ihn vermutlich nur ein müdes Lächeln übrig. ◀

www.robot-learning.de

GLOSSAR

Empirische Inferenz

Die 2001 am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik gegründete gleichnamige Abteilung forscht nach Möglichkeiten, die Gesetzmäßigkeiten aufzudecken, die empirischen Daten zugrunde liegen. Hierzu entwickeln die Forscher Algorithmen und wenden sie auf vielfältige Probleme wie etwa das Computersehen und die Bioinformatik an.

Humanoider Roboter

Die Konstruktion eines solchen Roboters ist dem menschlichen Körper nachempfunden. So verfügt er in der Regel über einen Kopf sowie über zwei Arme und zwei Beine. Bewegungsabläufe und Gelenkpositionen orientieren sich ebenfalls an jenen des Menschen.

Maschinelles Lernen

Ein künstliches System, etwa ein Roboter, lernt nicht auswendig, sondern aus Beispielen, und erwirbt so die Fähigkeit, anschließend zu verallgemeinern. Das System erkennt Gesetzmäßigkeiten in den Lerndaten und kann schließlich auch unbekannte Daten beurteilen oder auf neue Situationen reagieren.

Pawlow'scher Hund

Der russische Nobelpreisträger Iwan Petrowitsch Pawlow (1849 bis 1936) führte das erste empirische Experiment zum Nachweis der klassischen Konditionierung durch. Dabei beobachtete er den Zusammenhang von Speichelfluss und Verdauung. So lösten bei Zwingerhunden schon die Schritte des Besitzers Speichelfluss aus, obwohl es noch gar kein Futter gab.