

Verwandlung eines Würfels in eine Trompete (Computersimulation): Eine Million Roboterkügelchen krabbeln selbständig ihrer Wege

COMPUTER

Magie des schlauen Sandes

US-Forscher arbeiten an winzigen Robotern, die sich millionenfach zusammenschließen, um beliebige Objekte detailgetreu nachzubilden – Sitzmöbel, Automodelle oder sogar Menschen. Ziel des verwegenen Projekts: Die Materie selbst soll programmierbar werden.

Zu sehen ist ein Würfel, nicht weiter verdächtig. Nur eines fällt auf: Der kantige Klotz scheint aus einer Unzahl winziger Kügelchen zu bestehen.

In Wahrheit beginnt gleich ein Schauspiel von seltener Güte: Hier sind eine Million Roboter versammelt, und sie warten auf das Kommando von Seth Goldstein.

Der Forscher drückt auf den Startknopf und tritt zurück. Sofort geraten die glatten Würfelflächen in Wallung, die Kügelchen krabbeln übereinander. Ruckelnd wechseln sie ihre Positionen, nach allen Seiten streben sie auseinander. Bald ist nur noch ein wimmelnder Klumpen zu erkennen, der zügig in die Länge wächst, eine Art Schalltrichter stülpt sich aus, gegenüber tritt ein Mundstück hervor, drei Ventile erscheinen. Und fertig ist die Trompete.

Schauplatz der Verwandlung ist ein Labor an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh. Zangen und Schraubenzieher liegen herum, dazwischen Teile von unbegreiflichen Apparaten, die einem ausgeschlachteten Ufo entstammen könnten. Hier arbeitet der Computerforscher Goldstein mit seinen Leuten an einem wahrhaft verwegenen Werk, geduldig und gegen alle Wahrscheinlichkeit: „Am Anfang dachten alle, wir spinnen.“

Was Goldstein den Zweiflern heute vorführen kann, ist nur eine Simulation am

Monitor, doch läuft sie wirklichkeitsgetreu bis ins Detail: Jedem einzelnen Kügelchen wohnt sein eigenes kleines Hirn inne, mit dem es selbständig seinen Weg sucht, bis die Trompetengestalt vollendet ist.

Und das ist erst der Anfang, wenn es nach Goldstein geht. Echte Kügelchen will er mit winzigen Prozessoren ausstatten, die ihre Bewegungen steuern. Roboter sollen entstehen, klein wie Sandkörnchen, die vorankommen, indem sie an ihren Nachbarn entlangklettern.

Goldstein ist guten Mutes. Der Tag wird kommen, glaubt er, da hat der Mensch ein Sack voller schlauen Allzwecksandes in der Ecke liegen. Auf Wunsch schließen sich die Roboter dann etwa zu einem Pokertisch zusammen, und nach dem Spiel gehen sie dienstfertig zu Boden, um die Form eines Gästebetts anzunehmen. Und wer weiß, eines Tages entsteigt dem Sack ein lebensechter Gesell nach Art des mythischen Golem, geht leise rasselnd auf seinen Schöpfer zu und reicht ihm mit einer Verbeugung die Hand.

„Die Simulation beweist, dass wir die Steuerung beherrschen“, sagt Goldstein. „Das war unsere größte Sorge.“

Anfangs schien es schier unmöglich, eine Schar von Millionen (und bald vielleicht gar Milliarden) zu dirigieren. Der Durchbruch kam, als die Forscher im Reich

der sozialen Insekten nach Vorbildern suchten. Jedes Kügelchen folgt nun einem einfachen Programm, ähnlich dem Verhalten einer Ameise. Und wie das Insekt kommuniziert es beständig mit den Mitkugeln. Fast ist es, als betrillerten die Roboter einander über ihre elektrischen Kontakte.

So eine koordinierte Massenaktion von Robotern hat es noch nicht gegeben. Andere Forscher bauten gelegentlich ein paar Dutzend Module, die sich dann etwa zu Schlangen gruppierten und ungelentk über den Boden krauchten. Niemand wäre auch nur annähernd auf den Einfall gekommen, eine Million Winzlinge zu verkoppeln.

„Das ist wohl das Verrückteste, was bei uns gerade erforscht wird“, sagt Randy Bryant, Dekan der Fakultät für Computerwissenschaften, nicht ohne Stolz. Die Carnegie Mellon University, eine legendäre Roboterschmiede, hat immer schon Abenteuer angezogen. Doch Würfel, die zu Trompeten werden, erregen auch hier noch Aufsehen.

Goldstein hat eine Gruppe von rund 20 Köpfen um sich geschart, Kollegen darunter, Studenten, dazu etliche Forscher von Intel. Der Chipgigant betreibt in einem Gebäude gleich nebenan auf dem Campus weitläufige Labore. Dort wird ergründet, wie die Zukunft des Computers aussehen könnte. Die Firma will in der Lage sein zu



liefern, sollte die Welt eines Tages Billigchips für Abermilliarden schlauer Sandkörner begehren.

Die Forscher machen nicht nur Versuche im Simulator, sie haben auch schon mit der nötigen Hardware begonnen. Allerhand Fragen sind da noch zu klären: Wie lässt sich ein Sack voller Roboter mit Strom versorgen? Was ist die beste Technik der Fortbewegung? Die Kügelchen müssen stark aneinander haften und dennoch rasch wieder freikommen; nur so sind die Gebilde, die sie schaffen, zugleich in sich beweglich und stabil.

Die neuesten Einfälle werden an selbstgebastelten Prototypen erprobt. So entstanden im Laufe der Zeit große heliumgefüllte Ballons, Würfel mit ausfahrbaren Greifern oder auch Zylinder, die mit Elektromagneten bekränzt sind. Wenn diese Magneten gezielt ringsum an- und ausgeschaltet werden, wickeln sich die Zylinder ruckelnd umeinander – das ist die Grundidee der Fortbewegung. Für die winzigen Roboter, die geplant sind, wäre die Magnetkraft allerdings zu plump; die Forscher wollen stattdessen elektrostatische Ladungen einsetzen.

Noch sind die Apparate eher grob und ungeschlachtet; es kommt vorerst nur aufs Prinzip an. Aber die Miniaturisierung schreitet bereits voran. Im Labor erproben sie jetzt ein mit Elektronik ausgekleidetes Röhrchen von einem Millimeter Durchmesser; geliefert hat es die Erfurter Firma X-Fab.

Die Millimetergrenze ist eine wichtige Wegmarke. Roboter, die kleiner sind, können schon realistische Illusionen schaffen. Damit auch die Farbgebung stimmt, soll jedes Kügelchen zudem eine Leuchtdiode enthalten, vergleichbar dem Pixel

eines Monitors. So wäre es möglich, beliebige Oberflächen zu imitieren. Selbst brauchbare Doppelgänger ferner Mitmenschen kämen in Reichweite.

Diese Idee war es, die überhaupt den Anstoß fürs Projekt gegeben hatte: Goldstein und sein Kollege Todd Mowry malten sich damals Telekonferenzen aus, deren Teilnehmer alle am gleichen Tisch sitzen – die einen in echt, die anderen als scheinleibhaftige Kopien, die über eine Datenleitung zugeschaltet werden.

Die Frage ist freilich: Wer würde so viel Aufwand treiben, nur um einem Kollegen aus der fernen Filiale einmal – bloß nicht zu fest! – auf die Schulter klopfen zu können? Mehr Marktpotential hätte eventuell ein Callbot, der zum Telex lädt. Es wäre nicht das erste Mal, dass die Sexindustrie bei neuen Techniken voranstürmt.

Auf Anwendungen kommt es in diesem frühen Stadium allerdings ohnehin nicht an. Noch herrscht ungetrübt die Freude an der Magie. Die Forscher dürfen hoffen, dass sie die nächste Epoche des technischen Illusionstheaters vorbereiten. Es war

mal eine Sensation, dass Bildschirme beliebige Bilder aus dem Nichts hervorzaubern – nun aber wird die Materie selbst programmiert: Illusionen zum Anfassen.

Das Ding, das zum Leben erwacht, beschäftigt die Menschheit ja schon lange. Die Ahnenreihe reicht vom Golem aus Lehm bis zu den spektakulären Werbespots von Citroën, die zeigten, wie sich Automobile in unternehmungslustige Roboter verwandeln. Die Forscher in Pittsburgh stellen sich ebenfalls in diese Tradition. Ihr Projekt nennen sie „Claytronics“, zu Deutsch Lehmtronik.

„Claytronics ist eines unserer Mondflugprojekte“, sagt Dekan Randy Bryant. Mondflug heißt: fraglicher Nutzen, fraglicher Erfolg, sicherer Ruhm. Das alles hat die Vision von der programmierbaren Materie zu bieten. Um die Machbarkeit derart winziger Roboter macht sich Goldstein dabei die wenigsten Sorgen. „Die Entwicklung läuft ohnehin darauf hinaus“, sagt er.

Schon heute ist der Prozessorkern eines modernen Mobiltelefons nur noch einen



DAVID ASCHENAVAS

Roboterforscher Goldstein: „Am Anfang dachten alle, wir spinnen“

Schnell geschrumpft

Die Miniaturisierung der Mikroelektronik

1971: Der erste in Serie gebaute Mikroprozessor von Intel hat **2300 Transistoren**.

2008: Einer seiner Nachfolger rechnet bereits mit **731 Mio. Transistoren**.
Mit der Chipstruktur von 1971 wäre das aktuelle Modell rund **6 m² groß**.

2009: Ein „Claytronics“-Baustein („Catom“) mit Mikroprozessor, Sensor und Leuchtdiode hat die Größe eines **Tischtennisballs**.

Prognose: Die „Catome“ schrumpfen in 10 bis 20 Jahren auf **Sandkorngröße**.

DER SPIEGEL

halben Millimeter groß. In ein, zwei Jahrzehnten dürfte die Technik klein und vor allem billig genug sein für die Massenproduktion sandkorngroßer Roboter. Bei einem Stückpreis von zehn Cent kostet ein Millionensortiment rund hunderttausend Dollar. Forschungslabore können da durchaus schon einsteigen.

Fast unlösbar schien dagegen anfangs die Frage, wie die schlauen Körnchen sich steuern lassen. Ein Zentralgehirn, so viel war gewiss, kann unmöglich Millionen von

mierbaren Materie. Aber jetzt glaube ich, dass es möglich ist.“

Einfach war es nie, Goldsteins Leute bewegen sich von Anfang an auf Neuland. Es gab nicht einmal eine Programmiersprache, die für das Zusammenspiel von Hunderttausenden winziger Hirne taugte; die Gruppe musste sich eine eigene Sprache ausdenken.

Auf diese Sprache bilden sich die Forscher nun einiges ein. Sie könnte der Computertechnik aus einer Sackgasse heraushelfen.

Deren Problem ist, dass der einzelne Hochleistungsprozessor an Grenzen stößt: Kleiner geht es kaum mehr. Zugleich wächst der Aufwand, die empfindlichen Wunderwerke herzustellen, weil der geringste Fehler alles verdirbt. Die Leistung lässt sich also auf herkömmliche Weise kaum mehr steigern – es sei denn, man spannt einfach beliebig viele Chips zusammen. Viele Fachleute sehen darin die Zukunft; sie sprechen von „verteilterm Rechnen“. Und dafür braucht es geeignete Software.

Solche Chips dürfen ruhig schlicht und billig sein, und wenn jeder zehnte schon kaputt aus der Fabrik kommt, ist auch das nicht so schlimm: Die brauchbaren Elemente finden sich zusammen, die schadhafte werden ignoriert. Gut möglich, meint Dekan Bryant, dass eines Tages die Rechenleistung nach Gewicht verkauft wird: „Wer mehr braucht, bestellt einfach ein Pfund hinzu.“

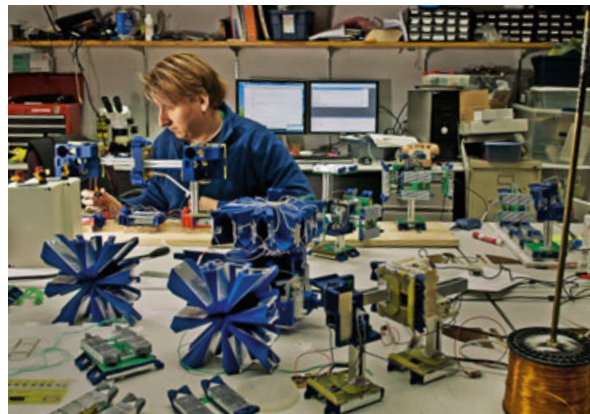
Sollte der Computer tatsächlich zum Schüttgut werden, darf sich Seth Goldsteins Gruppe zu den Pionieren zählen. Die Arbeit am schlauen Sand nimmt die größten Zukunftsprobleme bereits vorweg. Zum Beispiel: Wie versorgen sich rechnende Säcke oder Sandkisten mit Energie?

Die jüngste Idee dazu, noch unveröffentlicht: Der Strom kommt berührungslos durch die Luft; ein neues Verfahren, entwickelt am MIT in Cambridge bei Boston, nutzt dafür pulsierende Magnetfelder. Goldsteins Kollege Daniel Stancil, ein Fachmann für Elektrizität, arbeitet in seinem Labor bereits an der Umsetzung.

So richtet die Magie des schlauen Sandes viele Kräfte auf ein gemeinsames Ziel. Ein Mindestmaß an Verrücktheit ist dabei sicherlich hilfreich.

Nur für Kinder ist das alles ganz normal. Vierjährige träumen wie selbstverständlich von Wunschmaschinen, die ihnen jeden Gegenstand bauen, und von magischen Wänden, aus denen sie immer neue Spielsachen hervorziehen können. Goldsteins Kinder sind da keine Ausnahme: „Sie freuen sich schon“, sagt der Forscher, „auf Computerspielfiguren, die ihnen durchs Haus folgen.“

MANFRED DWORSCHAK



SCOTT GOLDSMITH

„Claytronics“-Labor: Werden Computer zum Schüttgut?

Befehlsempfängern einzeln dirigieren. Allein der Austausch von Daten und Steuerkommandos würde Unmengen Energie und Zeit kosten. Die Roboter müssen sich also auf eigene Faust durchschlagen – und sie müssen dabei auch noch mit denkbar wenig Grips auskommen, damit die Sache nicht zu teuer wird.

Ein solcher Roboter, begraben irgendwo in einem Sack, steht vor drei Rätseln, jedes für sich schon beängstigend: Wo bin ich? Wo muss ich hin? Und wie komme ich von hier weg?

Jahre des Grübelns gingen ins Land, bis die Forscher alle drei Fragen abhaken konnten. Die Roboter tun sich nun auf ausgeklügelte Weise mit ihren Nachbarn zusammen, die ihrerseits wieder ihr weiteres Umfeld heranziehen. In der Simulation genügt es nun bereits, dass die Kügelchen den Plan der angestrebten Gestalt übermittelt bekommen. Sie wuseln dann herum, beständig Informationen austauschend, bis das Ziel erreicht ist.

Und wie durch Zauberhand kommt es bei all dem Durcheinander weder zu Verklumpungen noch zu unauflösbaren Blockaden. Das ist dem Studenten Michael De Rosa zu verdanken. Er hatte den rettenden Einfall, dass die Kügelchen nicht einfach losrucken sollten. Sie gruppieren sich stattdessen zuvor um kleine Hohlräume oder Blasen. Dann beginnen diese Blasen zu wandern, bis die gewünschte Form erreicht ist – sie wird quasi aufgeschäumt.

„Eine geniale Idee“, sagt Abteilungsleiter Peter Lee. „Ich hatte ja schwere Zweifel, ob das je was wird mit der program-

Rätsel aus der Renaissance

Who is who auf dem berühmten Wandbild „Die Schule von Athen“? Ein Forscher aus Ulm hat eine verblüffende Neudeutung vorgelegt.

Kaum 27 Jahre war Raffael alt, als er sich anschickte, die Privatzimmer des Stellvertreters Christi in Rom mit einem leuchtenden Bildnis zu verschönern. Der Papst wollte Gelehrsames. Also malte ihm der Künstler eine Parade der Superhirne.

Insgesamt 58 Personen sind auf dem Fresko „Die Schule von Athen“ zu sehen – fast alles maßgebliche Philosophen und Wissenschaftler von der Antike bis zur Zeit Raffaels. Einige halten Zirkel oder Globus in der Hand, andere Bücher.

Nur: Wer ist da wer?

Seit über 400 Jahren wird versucht, die Figuren zu enttarnen. Euklid und Zarathustra sollen der seltsamen Versammlung angehören. Der Typ im weißen Gewand gilt manchen als Jesus, der Turbanträger daneben als der arabische Überbringer der Ziffer Null. Eindeutig identifiziert sind aber nur sieben Personen, darunter Platon, der

