

# Der Golem aus dem Rechner

Robotiker träumen von Maschinen, die sich selbst entwerfen. Im Computer macht die technische Evolution erfolgreich ihre ersten Schritte **VON NIELS BOEING**

Seit Beginn der industriellen Revolution ersinnen Ingenieure Maschinen, die dem Menschen Arbeit abnehmen, nicht selten so gründlich, dass ganze Berufswege überflüssig werden. Nur sich selbst konnten Ingenieure bisher nicht ersetzen. Noch immer ist der Entwurf von Maschinen eine Kunst, die nicht vollständig automatisiert werden kann. Aber auch das soll sich ändern. Einige Forscher wollen lösen, was der US-Robotiker Hod Lipson das »Meta-Problem der Ingenieurwissenschaften« nennt: »eine Maschine bauen, die selbstständig andere Maschinen entwerfen und bauen kann.«

Lipson ist ein Vertreter der so genannten evolutionären Robotik. Der recht junge Forschungszweig will dem Maschinenreich Fähigkeiten verleihen, die bisher dem organischen Leben vorbehalten waren. Maschinen sollen wachsen, mutieren, sich an eine veränderte Umwelt anpassen und vervielfältigen.

»Wir wollen die Evolution für uns arbeiten lassen«, sagt Rolf Pfeifer, der das ALLab, das Labor für Künstliche Intelligenz, an der Universität Zürich leitet. »Unsere große Schwäche als menschliche Designer ist, dass wir Vorurteile haben. Ein Computer hingegen, der zum Beispiel genetische Algorithmen nutzt, hat keine Vorurteile. Der kann Lösungen entwickeln, auf die wir nicht kommen würden.«

Die Grundprinzipien der Evolution, Mutation und Selektion, machten Forscher schon vor Jahrzehnten für technische Probleme nutzbar. Der Berliner Bionik-Ingenieur Ingo Rechenberg entwickelte in den sechziger Jahren in Windkanalexperimenten seine »Evolutionstrategie«. Indem er die Form einer Tragfläche immer wieder mutieren ließ und nur die besten Varianten weiterverwendete, fand er jene Lösung für den geringsten Luftwiderstand.

Wissenschaftler wie Lawrence Fogel und John Holland erdachten verschiedene Ansätze für »evolutionäre Algorithmen«, mit denen die für ein bestimmtes Problem optimale Programme gefunden werden. Dank fortgeschrittener Rechner-Technik konnte der US-Computergrafiker Karl Sims dann 1994 erstmals virtuelle Wesen in einer Rechnerwelt demonstrieren, deren Gestalt und Steuerungsprogramm sich im Laufe mehrerer Generationen weiterentwickelten, um besser laufen oder springen zu können.

**Bis in einer Simulation** evolvierte Roboter entstanden, dauerte es noch mehrere Jahre – bis zum Golem-Projekt von Hod Lipson und Jordan Pollack. Das Akronym Golem steht für »Genetisch organisierte lebensähnliche Elektro-Mechanik«. Anders als im alten jüdischen Mythos des aus Lehm erschaffenen Golems, entstanden die Roboter-Kreationen nicht aus den Händen eines Töpfers, sondern in einem 3D-Drucker.

Lipson und Pollack schrieben zunächst ein Programm, das Gestalt und Steuerung des simulierten Roboters auf einer virtuellen Oberfläche beschreibt. Mögliche Elemente waren Verbindungsstreben mit Gelenken, eine Art hydraulisches Gestänge, das Bewegungen erzeugen kann, und künstliche Neuronen. Jeder von 200 Robotern in der Startpopulation bekam eine zufällige Anfangsausstattung. Einige Exemplare unterzogen die beiden außerdem einer Mutation: Verbindungsstreben wurden nach dem

Zufallsprinzip gekürzt oder verlängert, die Aktivität von Neuronen verstärkt oder geschwächt.

Nun testeten Lipson und Pollack, wie weit sich die so entstandenen Bündel – Anfangspopulation plus Mutanten – innerhalb einer bestimmten Zeit auf der Oberfläche fortbewegen konnten. Je weiter sie kamen, desto größer schätzten die Forscher die »Fitness« der Roboter ein. Von den schwächeren wurden anschließend so viele entfernt, dass eine neue Generation von 200 virtuellen Robotern übrig blieb. Bis zu 600 solcher Evolutionsschritte durchlief die Population. »Dabei entwickelten sich verblüffend unterschiedliche Formen«, sagt Lipson. »Überraschend war auch, dass viele symmetrisch waren, obwohl diese Eigenschaft in der Versuchsanordnung nicht belohnt wurde.«

Am Ende wurden die drei besten zur Materialisierung ausgewählt: Lipson und Pollack druckten ihre Verbindungsstücke in einem 3D-Drucker als Kunststoffteile aus, die sie gemäß der im Rechner evolvierten Anordnung mit der Hydraulik und der elektronischen Steuerung zusammenmontierten. Die seltsamen Kreaturen, die dann tatsächlich wie im Rechner simuliert über den Boden krochen, erinnerten an primitive urzeitliche Geschöpfe.

Doch auch die Golem-Kriecher hatten noch zwei wesentliche Beschränkungen. »Während der Entwicklung des Bauplans zur neuen Gestalt war das System isoliert«, sagt Rolf Pfeifer. Es fehlte ihre Wechselwirkung mit der Umgebung wie in der Natur, in der Lebewesen ständig auf ihre Umwelt reagieren müssen. Und sie konnten noch nicht richtig wachsen. »In der jetzigen Phase der evolutionären Robotik versuchen wir, auch das Wachstum der Maschinen zu kodieren.«

**Aus Zufallszahlen** haben er und sein ehemaliger Doktorand Josh Bongard – inzwischen Professor an der Universität Vermont – ein Genom entworfen, das kugelförmige Zellen eines simulierten Roboters entstehen lässt. Je nach Zahlenwert werden die Zellen geteilt und mit Neuronen, Sensoren oder Motoren bestückt. Das Genom wird dabei regelmäßig mutiert. Die Aufgabe, an der die Kreatur wachsen soll, ist, einen Quader auf einer Ebene möglichst weit zu schieben.

Die Simulation startet mit einer einzigen Zelle. Nach mehr als 80 Evolutionsschritten ist der »Block-

pusher« auf 50 Zellen gewachsen. sich ein Tentakel aus dem Rumpf ausgebildet, der gegen den Quader drücken kann – eine Differenzierung der Gestalt in verschiedene Körperteile, wie sie bei Lebewesen seit je vorkommt. Zwar lassen sich die Blockpusher bislang nicht in reale Roboter umsetzen. Doch im EU-Projekt Pace arbeiten Pfeifer und andere Forscher daran, auf chemischer Basis künstliche, programmierbare Zellen zu schaffen, die eine echte Evolution durchlaufen können.

Einen ähnlichen Ansatz, der aber auch die Interaktion mit der Umgebung einbeziehen will, verfolgen die italienischen Forscher Stefano Nolfi und Raffaele Bianco. Sie nutzen einen Schwarm von zunächst vereinzelt, sensorgesteuerten Minirobotern mit einem Durchmesser von etwa 10 Zentimetern, die sich zu größeren Einheiten verbinden können. In ihrer Bordsteuerung befindet sich eine Software mit einem künstlichen neuronalen Netz, die als digitales Genom dient.

**In diesem digitalen Erbgut** ist auch eine Selbstschaltung einprogrammiert, die nach jedem Zeitintervall von 100 Millisekunden mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,013 Prozent eintreten kann. »Stirbt« ein Roboter, wird er aus dem Versuchsgelände genommen und mit einem mutierten Genom wieder hineingesetzt. So wird die genetische Ausstattung der auf Rollen umherflitzenden Geräte permanent verändert.

Anders als bei den Golem-Kreaturen oder den Blockpushern müssen die Roboter keine konkrete Aufgabe lösen, sondern einfach nur überleben. Prallen zwei aufeinander, wird derjenige zum Sieger erklärt, der mit größerer Wucht auftrifft. Er koppelt den Unterlegenen an sich und überträgt seine Software in dessen Steuerung – das stärkere Genom, das eine wuchtigere Bewegung ermöglicht hat, vermehrt sich also. Trifft das Zweiergespann auf einen dritten Roboter und gewinnt abermals, wird dieser ans Ende angehängt. Auf diese Weise können sich allmählich immer größere Anordnungen bilden, die nicht unbedingt wie ein Zug in gerader Linie aneinander gekoppelt sind. Auch geknickte Formationen sind möglich, die überleben, wenn sie ihre Bewegung bes-

**ROBOTIKFORSCHER** arbeiten an Maschinen, die eines Tages wie Lebewesen eine Evolution durchlaufen und dabei eine geeignete Gestalt entwickeln

ser koordinieren als andere.

»Unser Ziel ist, langfristig eine Hardware-Evolution mit offenem Ausgang«, sagt Nolfi. Auch die italienische Evolution existiert bislang nur in simulierter Form, soll aber bald mit den Mikrorobotern des europäischen Swarm-Bot-Projekts realisiert werden. Nolfi ist zuversichtlich, dass das Gelingen wird: »Wir haben andere Experimente mit dem Simulationsprogramm bereits erfolgreich mit den Swarm-Bots umsetzen können.«

Während Pfeifer und Nolfi vor allem die Möglichkeiten von Mutation, Selektion und Wachstum im Maschinenreich untersuchen, arbeitet Hod Lipson inzwischen daran, die vierte wichtige Eigenschaft von Lebewesen zu meistern: sich selbstständig zu vervielfältigen, zu »replizieren«. Den ersten wichtigen Impuls hierzu gab vor mehr als 50 Jahren der ungarisch-amerikanische Mathematiker John von Neumann. Nachdem er in den vierziger Jahren bahnbrechende theoretische Arbeiten für die Architektur digitaler Computer geleistet hatte, entwickelte er in einem mathematischen Gedankenexperiment den so genannten zellulären Automaten.

**Der zelluläre Automat** war ein zweidimensionales Objekt in einer Art Schachbrettwelt. Seinen Elementen wurden Regeln mitgegeben, nach denen sie weitere Elemente hinzufügen konnten. Das Verblüffende: Bei geeignetem Regelsatz konnte der Automat eine Kopie von sich selbst erzeugen. Von Neumann nutzte dieses Modell, um zu zeigen, dass die Kombination aus einem universellen Konstruktionsapparat und einem universellen Computer eine bemerkenswerte Eigenschaft hat: »Selbstreproduktion«, sagt Neil Gershenfeld, Physiker am MIT Media Lab.

Was im zellulären Automaten nur ein Konzept ist, hat Lipson im vergangenen Jahr mit einem einfachen Roboter demonstriert, der aus vier würfelförmigen Bausteinen, den »Molecubes«, besteht. Die haben zwei Hälften, die dank eines Elektromotors in der Diagonale gegeneinander verdrehbar sind. Ein Mikrocontroller in jedem Würfel kennt die möglichen Bewegungen ebenso wie die Form des gesamten Roboters. Startet man ihn, biegt er sich und sucht nach einem neuen Molecube. Den nimmt er dann auf, windet sich, teilt sich, greift einen weiteren Würfel, fügt ihn bereits abgelegten Würfeln hinzu, verbindet sich wieder mit ihnen – eine verwirrend anzuschauende Prozedur, an deren Ende zwei Roboter auf dem Tisch stehen.

Diese Anordnung war noch recht simpel, zumal die Molecubes darauf programmiert waren, an zwei bestimmten Stellen nach weiteren Würfeln zu suchen. »In einem anderen Versuch haben wir einen Roboter in einem Evolutionsprozess überhaupt erst die Fähigkeit zur Selbstreplikation entwickeln lassen«, sagt Lipson. »Dabei entstanden interessante Konstruktionen, die ziemlich spontan lernten, sich zu verviel-

fältigen, allerdings nur in einer Simulation.« Nun will Lipson diese Experimente mit einigen hundert kleineren Einheiten, nicht größer als 0,4 Millimeter, real wiederholen.

**Um Maschinen zu erschaffen**, die andere Maschinen bauen können, genügt es aber nicht, diese aus einem Satz von bereits vorgefertigten Modulen zu bauen. Sie müssten im Prinzip bei Bedarf neue Module aus Rohmaterialien selbst herstellen können. Deshalb arbeitet Lipson gleichzeitig auch an der Weiterentwicklung eines universellen »Fabricators« (ZEIT Nr. 38/06), mit dem sich solche Elemente ausdrücken lassen.

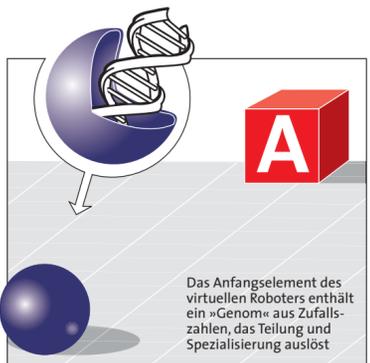
Das Gerät, das er und seine Kollegen gebaut haben, ist nicht nur in der Lage, Plastikteile zu fertigen, wie das auch im industriellen Rapid Prototyping geschieht. Es kann mit Hilfe eines metallionenhaltigen Kunstharzes Schichten drucken, die als elektronische Komponenten dienen. Setzt man die unter Spannung, verbiegen sie sich und mit ihnen auch das umgebende Plastik, es entsteht ein Bauteil, das in der Robotik als Aktuator bezeichnet wird. »Wir haben nicht nur den ersten Aktuator gedruckt, sondern kürzlich auch einen Transistor«, sagt Lipson. Sogar eine flache Batterie lässt sich mit dem 3D-Drucker inzwischen fertigen. »Damit haben wir schon wichtige Komponenten beisammen.« Er prophezeit, in einem Jahr könne er vollständige funktionsfähige Geräte ausdrucken.

Auch Stefano Nolfi glaubt, dass erste reproduktionsfähige Hardware schon in naher Zukunft Wirklichkeit werden könnte. »Bis zu selbstreplizierenden Maschinen, die in einem Evolutionsprozess auch noch verschiedene Gestalten und Verhaltensweisen entwickeln, ist es allerdings noch ein weiter Weg«, schränkt er ein.

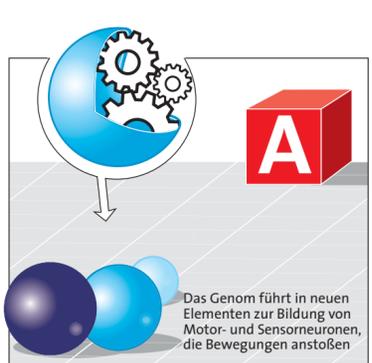
Dass dies überhaupt in den Bereich des Möglichen gerückt ist, weckt allerdings Assoziationen mit Maschinenwesen, die in Filmen wie *Terminator* oder *Matrix* dem Menschen das Leben schwer machen. Es ist erst sechs Jahre her, dass der amerikanische Informatiker Bill Joy in einem aufsehenerregenden Essay im Magazin *Wired* vor Gefahren warnte, die aus einer Verschmelzung von Robotik, Künstlicher Intelligenz und Nanotechnik folgen könnten. Damals wurde seine Warnung von der wissenschaftlichen Gemeinde als übertriebener Pessimismus abgetan. Im Lichte der rasanten technischen, aber auch konzeptionellen Fortschritte in der evolutionären Robotik kann man aber nur hoffen, dass die beteiligten Forscher seine Überlegungen ernst nehmen.

Hod Lipson sieht als potenzielle Anwendungen für evolvierbare, selbstreplizierende Roboter vor allem Raumfahrtmissionen. »Anstatt ein unveränderbares Gerät auf den Mars zu schicken, das möglicherweise kaputtgeht, könnte man einen modularen Roboter mit weiteren Bauteilen hinschicken, der sich selbst reparieren kann. Der könnte auch andere Roboter bauen, wenn unvorhergesehene Umstände dies erfordern«, sagt Lipson. Seine Molecubes wurden von der Nasa gefördert. Und wo die Nasa mitmischt, dürfte das Pentagon nicht weit sein.

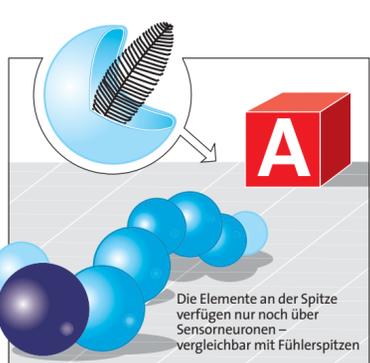
Weitere Informationen im Internet [www.zeit.de/2007/03/robotic](http://www.zeit.de/2007/03/robotic)



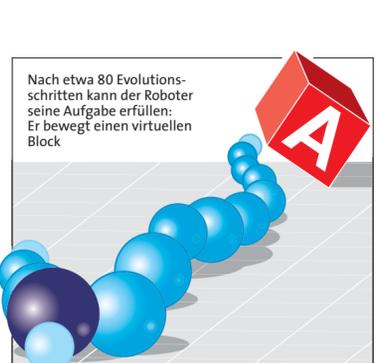
Das Anfangselement des virtuellen Roboters enthält ein »Genom« aus Zufallszahlen, das Teilung und Spezialisierung auslöst



Das Genom führt in neuen Elementen zur Bildung von Motor- und Sensorneuronen, die Bewegungen anstoßen



Die Elemente an der Spitze verfügen nur noch über Sensorneuronen – vergleichbar mit Fühlerspitzen



Nach etwa 80 Evolutionsschritten kann der Roboter seine Aufgabe erfüllen: Er bewegt einen virtuellen Block



Die »Blockpusher« von Josh Bongard und Rolf Pfeiffer waren das erste Roboterkonzept, in dem nicht nur dessen Verhalten, sondern auch das Wachstum kodiert wurde. In reale Roboter lassen sich die Blockpusher jedoch noch nicht umsetzen