



# DER ZOO DER SMARTEN ROBOTER

Dem Rätsel der Intelligenz auf der Spur: Am AI-Lab konstruieren Wissenschaftler smarte Roboter. Simulierte Evolutionsprozesse bringen die Forscher auf unerwartete Ideen für den Bau der künstlichen Kreaturen. Von Roger Nickl

Evolution und Hightech: Stanley Kubricks genialer Science-Fiction-Film «2001: A Space Odyssey» ist ein cineastischer Essay über die Entwicklung von Mensch und Technik – von der grauen Vorzeit bis in eine ungewisse Zukunft. Am Anfang steht eine folgenreiche Entdeckung. Einstellung 1, afrikanisches Trockenland: In den Savannen der Urzeit erfinden unsere Vorfahren das Werkzeug. Dann ein kühner Schnitt, der Filmgeschichte geschrieben hat. Vier Millionen Jahre Evolution schrumpfen auf den Bruchteil einer Sekunde zusammen – Einstellung 2, das dunkle Weltall: Zu Johann Strauss' «Schöner blauer Donau» rotieren futuristische Raumstationen im Walzertakt. In der Ferne blaut die Erde. Am Ende der evolutionären Entwicklung steht HAL, ein intelligenter, denkender und sprechender Computer mit eigenwilligem Innenleben. Was Kubrick 1968 als Zukunftsvision formulierte, ist auch heute, vier Jahre nach 2001, noch Science-Fiction. Die Herstellung von selbstständig rasonnierenden und kommunizierenden Maschinen liegt noch in weiter Ferne. Und dennoch: In den Forschungslabors rund um den Globus beschäftigen sich Wissenschaftler intensiv mit den Rätseln der künstlichen Intelligenz und mit der Entstehung von künstlichem Leben. Die Gesetze und Prinzipien der Evolution spielen dabei eine wichtige Rolle.

## NICHT NUR EINE FRAGE DES KOPFS

Die Frage, wie intelligentes Verhalten entsteht, wird seit Mitte der 1980er Jahre mit dem Bau von Robotern zu beantworten versucht. «Embodiment» heisst das Leitmotiv dieses Ansatzes. Die Grundidee: Intelligentes Verhalten ist an einen Körper gebunden, der mit seiner Umwelt in Wechselwirkung steht. Deshalb bauen die AI-Forscher immer komplexere Roboter und testen sie in Modellsituationen. Was sich dabei zeigt: Oft verhalten sich bereits ganz simpel

gebaute Roboter für einen Beobachter auf erstaunlich komplexe Weise.

«Intelligenz hängt nicht nur davon ab, wieviel jemand im Kopf hat, intelligentes Verhalten beginnt viel früher», sagt Rolf Pfeifer. Pfeifer ist der Leiter des Artificial Intelligence Lab (AI-Lab) an der Universität Zürich, einem der weltweit führenden Institute in der Künstliche-Intelligenz-Forschung. Für den Bau von künstlichen Kreaturen zentral ist die optimale Abstimmung von Körperform, Gehirn, Materialien und Umwelt. Entsprechend bauen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am AI-Lab ihre Roboter. Ihr Ziel: «Bottom-up», wie es in wissenschaftlichem Neudeutsch heisst, mehr über die Entstehung von Intelligenz und in einer fernen Zukunft vielleicht auch über die Entstehung von Sprache und Bewusstsein zu erfahren.

Ein ganzer Roboterzoo ist so über die Jahre am Zürcher AI-Lab entstanden: Stumpy, der tanzende Roboter, der an der diesjährigen Welt-

Roboterbaby soll helfen, mehr über die Entstehung von kognitiven Prozessen zu erfahren.

«Cheap Design» heisst eines der Schlagworte, auf denen die Philosophie der AI-Forscher gründet. «Wenn wir Menschen beispielsweise vorwärts gehen, schwingt das entlastete Bein völlig passiv», erklärt Rolf Pfeifer, «da wird keine Muskelenergie verschwendet. Die Pendelbewegung nützt die Schwerkraft aus, das kostet wenig Energie und braucht keine Steuerung.» Viele konventionellere Robotikprojekte sind gerade an solchen Fragen gescheitert: Denn will man jede kleinste Bewegung eines Roboters zentral steuern, steigt der Rechenaufwand bereits bei einfacheren Aufgaben wie dem Gehen in astronomische Höhen. Am AI-Lab versuchen die Forschenden deshalb die Rechenleistung konsequent zu minimieren, das Design also möglichst «billig» zu halten. Denn, so ein weiterer Wahlspruch der Künstliche-Intelligenz-Forscher: «Die Physik ist gratis.» Die Lehrmeisterin par excellence für solch effiziente Designs ist die Natur selbst. Viele der Projekte der AI-Forscher sind denn auch von biologischen Systemen inspiriert.

---

*«Die Evolution läuft nicht zielgerichtet ab, trotzdem hat sie phänomenale, hochkomplexe Designs entstehen lassen.» Rolf Pfeifer, AI-Forscher*

---

ausstellung im japanischen Aichi das Publikum begeisterte, gehört dazu. Und Sahabot, ein rollender Roboter, der sich wie eine Wüstenameise am polarisierten Licht orientieren kann und so auch über grosse Distanzen hinweg immer den Weg zurück zu seinem «Bau» findet. Ebenso zur Familie gehört Melissa – ein mit Sensoren ausgestatteter Zeppelin, mit dem das Schwarmflugverhalten von Bienen simuliert werden kann. Eines der aktuellsten Forschungsvorhaben ist das EU-Projekt «Robotcub». Die Forscher wollen einen Roboter in der Grösse eines zweijährigen Kindes bauen, der sowohl krabbeln als auch sitzen kann. Das

«Die Evolution läuft nicht zielgerichtet ab», sagt AI-Forscher Pfeifer, «trotzdem hat sie phänomenale, hochkomplexe Designs entstehen lassen.» Das Fundament, auf dem diese Kreativität gründet, sind die Prinzipien von Mutation, Selektion und Rekombination. Im Verlauf von Millionen von Jahren ist der Natur damit immer wieder gelungen, neue Organismen und überraschende biologische Systeme hervorzubringen, die ideal an ihre Umgebung angepasst sind. Diese Kreativität versuchen die Wissenschaftler in den Labors zu nutzen, indem sie evolutionäre Entwicklungsprozesse am Computer simulieren. «Unser Denken ist stark von

unserer physischen und sozialen Umwelt geprägt, zudem stösst es bei der Entwicklung von neuen Technologien zunehmend an Komplexitätsgrenzen», ist Rolf Pfeifer überzeugt. Solche Probleme hat der Computer nicht: Er hat keine Vorurteile und kann grosse Datenmengen einfach verarbeiten. Deshalb versprechen sich die Wissenschaftler von seiner Hilfe neue, unerwartete Ideen und optimierte Lösungen für ihre Robotikprojekte.

#### RECHNEN, TESTEN, SELEKTIONIEREN

Der Grundgedanke der simulierten Evolution ist relativ simpel. Wie ihr natürliches Vorbild beruht sie auf den Prinzipien der Mutation, Auswahl und Rekombination. Um ein einfaches Beispiel zu machen: Soll ausgehend von einem virtuellen, rechteckigen Klotz am Computer die optimale Form einer Linse evolviert werden, so werden zuerst deren Eigenschaften, der so genannte «Genotyp», kodiert. Der Klotz wird also beispielsweise in 100 Segmente eingeteilt; jedem dieser Segmente wird ein Wert etwa für den Brechungsindex, für den Krümmungsradius oder die Dicke zugeordnet. Diese Werte werden dann bei 50 bis 500 Klötzen per Zufallsprinzip variiert und deren Fitness anschliessend getestet. Es wird also überprüft, wie gut sie die gestellte Aufgabe – im Fall der Linse das optimale Fokussieren eines Lichtstrahls – lösen können.

Die erfolgreichsten «Individuen», aber auch – um die Vielfalt aufrechtzuerhalten – einige weniger erfolgreiche, werden darauf nach dem Zufallsprinzip reproduziert. Das heisst, ihre Genome werden gemischt. Es entsteht eine neue Generation. Nachdem ein Teil der Nachkommen der Mutation unterzogen, die Wertekombinationen also wieder zufällig verändert worden sind, werden sie einem erneuten Test unterzogen. Häufig werden so 1000 und mehr Generationen am Computer gerechnet, getestet und selektioniert – aus dem Klotz entsteht allmählich eine ideale Linsenform. «Obwohl die Änderungen zufällig stattfinden, entsteht ein optimiertes Design», sagt Rolf Pfeifer, «das ist erstaunlich.» Mit Hilfe der simulierten Evolution entstehen Designlösungen, auf die ein Ingenieur nicht unbedingt gekommen wäre.

Das Prinzip der simulierten Evolution ist nicht neu: Bereits in den 1960er Jahren began-

nen Forscher Optimierungsprobleme zu lösen, indem sie evolutionäre Prozesse auf dem Computer nachahmten. Heute ist das Verfahren auch in der Industrie üblich – effiziente Turbinenblätter werden damit genauso entwickelt wie optimierte Antennen für den Mobilfunk. Am AI-Lab der Universität Zürich wurde das Verfahren jedoch weiter differenziert und verfeinert. Besonders neuere Erkenntnisse der Entwicklungsbiologie haben dazu beigetragen. «Früher war man der Ansicht, dass gewisse Gene für bestimmte Merkmale kodieren – ein Gen für die Augen- und eines für die Haarfarbe, ein weiteres für die Körpergrösse und noch eines für Nasenform», erklärt Rolf Pfeifer, «auch die in der Industrie angewendeten Algorithmen basieren auf dieser direkten Abbildung des Genotyps auf den Phänotyp. Die Entwicklungsbiologie hat nun allerdings gezeigt, dass die Dinge viel komplizierter sind.» Eine direkte Abbildung vom Genotyp auf den Phänotyp gibt es in diesem Sinne nicht. Vielmehr stehen die Gene während des Wachstums in komplexen Wechselwirkungen, den so genannten genetischen Regulatornetzwerken.

Am AI-Lab wurde deshalb schon früh versucht, solche komplexen Wachstumsprozesse am Computer zu simulieren. Ein Vorteil dieser Methode: Der virtuelle Evolutionsprozess ist im Gegensatz zu den älteren Verfahren wesentlich

---

*Mit Hilfe der simulierten Evolution entstehen Designlösungen, auf die ein menschlicher Ingenieur nicht unbedingt gekommen wäre.*

---

offener, unabsehbarer und scheint auch kreativer. Und dennoch: Die Hightech-Simulationen der Wissenschaftler sind immer noch sehr vereinfacht und äusserst abstrakt. Von der komplexen Wirklichkeit der Natur sind sie weit entfernt. «Aus Simulationen können wir letztlich nur so viel herausholen, wie wir zu Beginn reingesteckt haben», sagt Pfeifer. Die Forscher kommen also auch auf diesem Weg nicht ganz von ihren Vorurteilen los. Ganz im Gegenteil zur natürlichen Evolution, die nach dem Prinzip Zufall unzählige Möglichkeiten erproben kann. «Im Fall der Ausscheidungsstoffe etwa hat – so eine Hypothese – die Natur gemerkt, dass diese

auch der Übermittlung von Signalen dienen können. Hormone als Botenstoffe sind vermutlich auf diese Weise entstanden», erklärt der AI-Forscher.

#### KÜNSTLICHE ZELLE

Das kreative Potenzial der Natur ist ein Grund dafür, dass die AI-Forscher evolutionäre Prozesse nun nicht mehr nur am Computer, sondern in der «realen Welt» simulieren wollen. Genau dies ist das Ziel des interdisziplinären EU-Projektes «PACE», an dem auch Pfeifers Labor beteiligt ist. PACE steht für «Programmable Artificial Cell Evolution». Die Absicht ist visionär. Das Team von Chemikern, Biologen und AI-Forschern will im Labor durch Selbstorganisation mit Hilfe von künstlichen Substanzen eine künstliche Zelle entstehen lassen, die einen Stoffwechsel besitzt und sich selbst reproduzieren kann. Die Wissenschaftler hoffen, damit mehr über die Voraussetzungen für die Entstehung von Leben zu erfahren. Daran, dass die hochgesteckten Ziele in nächster Zeit erreicht werden, zweifelt Rolf Pfeifer allerdings: «Es gibt noch sehr viele Unbekannte.»

Forschungsprojekte im Mikro- und Nanobereich sowie die Verschmelzung von Technologie und Biologie sind die neuesten Trends in der AI-Forschung. Stehen wir bald vor der Geburt von künstlichen Organismen, die uns

künftig unseren Rang an der Spitze der Evolution streitig machen? Rolf Pfeifer winkt ab. «Die Forschung steckt in diesen Bereichen noch in den Kinderschuhen», sagt er. Bis es künstliches Leben oder Computer wie Kubricks HAL geben wird, werden Wissenschaftler wohl noch unzählige Generationen von künstlichen Kreaturen entwickeln und evolvieren müssen. Die Evolution im Eilzugtempo gibt es bislang nur in der virtuellen Welt – sei es im Computer oder im Kino.

KONTAKT Prof. Rolf Pfeifer, pfeifer@ifi.unizh.ch