



VORBILD AMEISEN
Die Art, wie sie ihr Futter suchen, hat sich für Forscher als besonders inspirierend erwiesen.



SCHWARM-FORSCHUNG
Mit Greifern verbundene Roboter überqueren eine Spalte: Am Projekt Swarm-Bots ist auch die ETH Lausanne beteiligt.

Wie die Natur

Tiere bewegen sich in Massen, sind Teamarbeiter und vernetzt. Ihre Kniffe nutzen Forscher – für Roboter, Software und das Internet. Von Andrea Strässle

Plötzlich sind sie da: Hunderte von schlanken Leibern, ausdruckslose Augen, spitze Mäuler. Barrakudas. Einer metallisch blinkenden Wolke gleiten die Raubfische durchs Wasser – bis sie schlagartig alle die Richtung wechseln, wie von einem unsichtbaren Taktstock dirigiert.

Fisch- und Vogelschwärme, Ameisen- und Bienenvölker verblüffen mit ihrem

Sinn für Ordnung und Teamwork nicht nur Laien, sie bringen auch die Wissenschaft voran. Informatiker lassen sich von Bienen zu Datenverwaltungs-Software inspirieren, virtuelle Ameisen legen die Route von Lastwagen fest, und Roboterschwärme sollen dereinst durch technische Anlagen patrouillieren. Selbst die Menschheit gerät ins Schwärmen: Laut Kommunikationsforschern gebärdet sich

die weltweit vernetzte Gesellschaft immer mehr wie ein Ameisenhaufen.

Wie kommt die Ordnung in einen Schwarm? Das untersucht Hanspeter Kunz vom Labor für künstliche Intelligenz der Universität Zürich. Allerdings gibts in seinen Räumen weder Bienen- noch Menschenschwärme. Er muss mit einer Wolke schwarzer Striche auskommen, die sich über seinen Computerbildschirm bewegen. Kunz untersucht an diesem simulierten Fischschwarm, wie es eine Sardine schafft, im Pulk weder den Anschluss zu verlieren noch blaue Flecken einzufangen.

«Die scheinbare Choreografie des Schwarms ergibt sich aus unzähligen kleinen Bewegungen, mit denen jeder Fisch auf das Verhalten seiner Nachbarn rea-

giert», erklärt Kunz. Dazu brauchen Sardine wie Barrakuda erstaunlicherweise nur drei Regeln zu beachten, fand der amerikanische Programmierer Craig Reynolds heraus: Kommt dir jemand zu nahe, entferne dich; passe dein Tempo den Nachbarn an; versuche dich gegen das Zentrum hin zu bewegen.

Inspirierende Futtersuche

Hält sich jeder Fisch an diesen Kodex, ergibt sich wie von Zauberhand ein Schwarm. «Ohne Anführer, ohne Hierarchie», sagt Kunz. Sein künstlicher Schwarm besteht aus kleineren und grösseren Fischen, die sich ähnlich wie in der Natur je nach Körpergrösse im Zentrum oder am Rand des Schwarms einordnen.

Wie gross sie im Vergleich zu ihren Kollegen sind, brauchen die einzelnen Fische dafür nicht zu wissen. Es reicht die Annahme, dass grössere Fische mehr Abstand um sich herum bevorzugen als kleinere. Damit weichen sie rascher aus als die kleinen – und manövrieren sich automatisch an den Rand.

Damit zeigen Sardinen und Barrakudas so genannte Schwarmintelligenz: Eine Gruppe von Individuen meistert dank einiger simpler Regeln ohne zentrales Kommando komplexe Aufgaben. Kolonien bildende Insekten sind Meister darin. Die einzelne Ameise ist beileibe keine Intelligenzbestie. Trotzdem unterhält ein Ameisenvolk ein raffiniertes Strassensystem, organisiert sich in Futtersuche

und Futtertransport und versorgt seine Nachkommen.

Die Futtersuche hat sich für Forscher als besonders inspirierend erwiesen: Ausschwärmende Ameisen markieren ihre Route mit Duftstoffen, so genannten Pheromonen. Wird eine Ameise fündig, kehrt sie schnurstracks zum Bau zurück und verstärkt dabei ihre bereits gelegte Duftspur. Beim Nest angekommen, duftet ihre Spur stärker als jene der Kolleginnen und lockt weitere Ameisen an. So schlagen die Tierchen automatisch den kürzesten bekannten Weg zur Futterquelle ein.

Diese geniale Strategie hat es Luca Gambardella angetan. Im Büro des Ko-Direktors des Instituts Dalle Molle für künstliche Intelligenz (IDSIA) bei Lugano hat sogar ▶

der Kerzenständer Ameisenform, und an der Tür zeigt eine Kinderzeichnung eine Ameisenkolonie. Gambardella's Team überträgt die Suchmethode der Ameisen in Software, die etwa Routenpläne für Spediteure erstellt. In solchen Programmen schwärmen künstliche Ameisen aus, probieren zufällig verschiedene Touren aus und hinterlassen dabei eine Datenspur, die nach dem Vorbild der Pheromone mit der Zeit verblasst. «So lässt sich in wenigen Minuten eine Lösung für ein Problem finden, für das man mit klassischen Methoden Stunden braucht», sagt Gambardella.

Der Forscher ist kein abgehobener Theoretiker. Seit 2001 bringt der Spin-off Antoptima die Forschung aus dem IDSIA in die Unternehmen. Die Ameisensoftware interessiert. Nach einem Pilotprojekt mit dem Tessiner Öllieferanten Pina Petrol sind weitere Firmen auf die Ameise gekommen: Neben dem italienischen Logistikunternehmen Number 1 vertraut auch das Migros-Verteilzentrum Suhr mit 250 Lieferfahrzeugen und 600 Verkaufs-

stellen der künstlichen Datenspur.

Das Ameisenprinzip taugt nicht nur zur Routenoptimierung. Die Tessiner entwickelten auch ein Programm für die Containerabfertigung im Hafen von La Spezia und ein Konzept für den Güterverkehr Parmas. Daneben tüftelt das IDSIA an mobilen Ad-hoc-Netzwerken. In solchen Netzen können mobile Geräte wie Handys miteinander kommunizieren, ohne dass eine übergeordnete Infrastruktur (etwa ein Antennennetz) nötig ist. Das Netz muss unter ständig wechselnden Umständen ohne Zentrale in kürzester Zeit günstige Datenübermittlungswege finden – eine Aufgabe wie gemacht für Ameisenagenten.

Schlaue Schwärme beflügeln nicht nur die Forscher im Tessin: Andere Gruppen bekämpfen mit Ameisenstrategien Datenstaus im Internet. Oder sie leiten aus der Art, wie Insekten ihre Larven sortieren, eine Methode ab, um Bankdaten zu analysieren. Die Arbeitsteilung bei Bienen brachte wieder andere zu einer effizienteren Arbeitsverteilung in Fabriken.

Wenn Schwärme ein derartiges Potenzial bergen: Was läge näher, als sie als Ganzes künstlich erstehen zu lassen? Forscher des IDSIA und der ETH Lausanne haben mit europäischen Kollegen im Projekt Swarm-Bots Kleinroboter entwickelt, die kooperieren. Die Kerlchen sehen aus wie etwas zu gross geratene Hockeypucks auf Raupen und Rädern, ausgerüstet mit Kamera, Infrarot-, Licht- und anderen Sensoren sowie Mikrofonen. Ein Roboter kann sich zum Beispiel über einen Greifer an Kollegen festbeissen und so eine Roboterschlange initiieren. Wie eine Seilschaft von Bergsteigern quert so eine Formation aus sechs Robotern eine Spalte zwischen zwei Gesteinsbrocken, die für einen Single-Roboter nicht zu bezwingen wäre.

Trotz dieser beeindruckenden Vorführung: Noch sind Schwarmroboter nicht praxistauglich. Ausserhalb einer definierten Umgebung kommen sie schlecht zu recht. «Im Vordergrund steht heute, dass



sich mehrere Roboter organisieren und kooperieren können», sagt Joerg Seyfried von der Universität Karlsruhe. Diese koordiniert das Projekt I-Swarm, an dem die ETH Lausanne mitarbeitet. Das Ziel: Bis 2008 sollen sich auf der Fläche eines A4-Blattes einige hundert Roboter mit drei Millimeter Kantenlänge tummeln. Gegen-

Aus den einzelnen Interaktionen entsteht ein nutzbringendes Ganzes.

wärtig steht das Konsortium bei einer Robotergrösse von drei Zentimetern und Trupps von bis zu 50 Stück, welche die Umgebung erkunden oder Muster formen. Der Bauplan für den Drei-Millimeter-Zwerg steht: Die Winzlinge werden via Infrarotkanal kommunizieren, auf drei Beinen aus Folie stehen und sich über gezielte Vibrationen des Chips fortbewegen.

Gelingt es, Kleinstroboter künftig günstig in Serie zu produzieren, kommen die Forscher einer ihrer Visionen näher: Roboterschwärme, die selbstständig Pipelines, Brücken oder Turbinen kontrollieren und Schäden melden. Bricht sich ein Roboter das Bein, ists halb so wild – der Schwarm gleicht die Lücke aus. «Doch da-



Wellensittiche, Containerlager: Fortschritt dank dem Schwarmprinzip.

von sind wir noch Jahre bis Jahrzehnte entfernt», schätzt Seyfried. Trotzdem träumen Verwegene davon, Roboter im Nanobereich in Menschen einzuschleusen, um Krankheitsherde aufzuspüren oder Minioperationen auszuführen.

Geisteswissenschaftler beobachten derweil: Nicht bloss Roboter, auch die Menschen organisieren sich zunehmend nach Art der Bienen und Ameisen. Laut dem US-Soziologen Howard Rheingold prägt das Schwarmprinzip zunehmend den Alltag unserer global vernetzten Gesellschaft. Der Medientheoretiker schuf den Begriff «Smart Mobs» – schlaue Meute. Das ist eine Art menschlicher Sardinenschwarm: eine grössere Anzahl Menschen, die ge-

meinsam ein Ziel verfolgen, ohne dass sie sich näher kennen.

Das Schwarmprinzip spielt, wenn Globalisierungsgegner Proteste via SMS und Websites koordinieren. Und wenn Kriegsgegner in US-Städten ohne übergeordnete Führung, dafür via Handy im Nu Gleichgesinnte für eine Anti-Irakkrieg-Demo mobilisieren. Eine unpolitische Spielart sind Blödelaktionen so genannter Flashmobs: Wildfremde Menschen finden sich an einem vereinbarten Ort ein, um allesamt beispielsweise den Ruf des südamerikanischen Krähenstirnvogels nachzuzahlen – um danach wieder ihrer Wege zu gehen.

Besonders gut funktioniert kollektives Schaffen im virtuellen Raum. Das kos-

tenlose Internetlexikon Wikipedia ist ein Beispiel menschlicher Schwarmintelligenz. An Stelle einer festen Redaktion darf jeder Benutzer Einträge verfassen. Der simplen Methode zum Trotz stellte die Zeitschrift «Nature» kürzlich in Wikipedia nur eine unwesentlich höhere Fehlerquote fest als in der renommierten Encyclopaedia Britannica. Wikipedia-Einträge werden schliesslich ständig von anderen Schwarmmitgliedern kontrolliert, ergänzt und korrigiert – Selbstorganisation par excellence.

Eigenes Wissen weniger wichtig

Virtuelle Marktplätze, Online-Netzwerke für Businesskontakte, Bewertungsseiten, Ranking und Blogging basieren allesamt auf dem Schwarmprinzip: Viele einzelne Benutzer hinterlassen ähnlich einer Ameise eine (Daten-)Spur, die von beliebig vielen gelesen und ergänzt werden kann. Aus den einzelnen Interaktionen entsteht ein nutzbringendes Ganzes.

Nach Ansicht des deutschen Trendforschers Peter Wippermann revolutioniert Schwarmintelligenz Gesellschaft und Wirtschaft: «Bürger und Konsumenten werden als Masse smarter als die Spezialisten in Management und Politik.» Der Einzelne sei immer weniger auf eigenes Wissen angewiesen – das Web liefert Informationen speditiver und umfassender.

Hirn abschalten gilt trotzdem nicht. Der Mensch wird seine geistigen Kräfte einfach anders einsetzen, sagt Wippermann. «Auch das Kopfrechnen haben wir dem Rechner übergeben – trotzdem nimmt er uns nicht das Denken ab.» Beruhigend. Denn bei aller Bewunderung für Barrakudas und Ameisen – so ein Schwarm ist ganz schön gleichgeschaltet. ◀

RAUMFAHRT

Ameisentaktik im Weltall

Dank einer neuartigen Aussenhaut sollen Raumschiffe dereinst Schäden an ihrer Hülle selbst erkennen und reparieren. Die australische Forschungsorganisation CSIRO und die US-Raumfahrtbehörde Nasa entwickelten eine intelligente Hülle, die die Kommunikationsstrategie der Ameisen nutzt. Der Prototyp besteht aus 200 Zellen, die nur mit ihren Nachbarn kommunizieren; eine Zentrale gibt es nicht. Jede Zelle trägt stossempfindliche Sensoren und einen Prozessor, der Lösungen zu möglichen Problemen gespeichert hat. Ähnlich wie Ameisen Duftstoffe ausscheiden, um anderen den Weg zum Futter zu weisen, verschicken die Zellen Informationen über Defekte an ihre Nachbarn. Im Verbund können die Minihirne so das Ausmass eines Schadens ausmachen und Reparaturen einleiten. Der Vorteil einer Haut aus eigenständigen Zellen: Trifft bei herkömmlichen Netzen ein Fremdkörper die Zentrale, ist das ganze Überwachungssystem lahm gelegt. Eine Schutzhülle im Insektenstil lässt sich nicht so leicht ausschalten.

GLOSSAR

SCHWARMINTELLIGENZ Die scheinbare gemeinsame Intelligenz sozialer Insekten. Dabei bringt eine grosse Anzahl kommunizierender Einzelakteure gemeinsam Leistungen hervor, welche die geistigen Fähigkeiten des Einzelnen übersteigen.
EMERGENZ Das Phänomen, dass ein Ganzes Eigenschaften oder Fähigkeiten zeigt, die sich nicht aus der Summe der Einzelteile erklären lassen. Schwarmintelligenz ist ein solches emergentes Phänomen.

AUTONOME MOBILE ROBOTER Roboter, die unabhängig von einer externen Steuerung handeln und sich fortbewegen können. Die steuernde Software und Hardware befindet sich im Roboter selbst, Energie bezieht er aus Akkus oder Solarzellen.
NANOBOTS Autonome Kleinstroboter in der Grösse von Blutkörperchen, die dereinst in den menschlichen Körper eingeschleust werden könnten, um etwa Krebszellen aufzustöbern und zu vernichten.

SMART MOB Eine «kluge» Menschenmenge, die sich dank moderner Kommunikationsmittel rasch und flexibel zusammenschliesst, um ein Ziel zu erreichen. Sei dies, durch Proteste den philippinischen Präsidenten Joseph Estrada aus dem Amt zu jagen (wie es im Januar 2001 geschehen ist). Oder sei es, um in der Partyszene einer Stadt auf eine besonders angesagte Location aufmerksam zu machen.