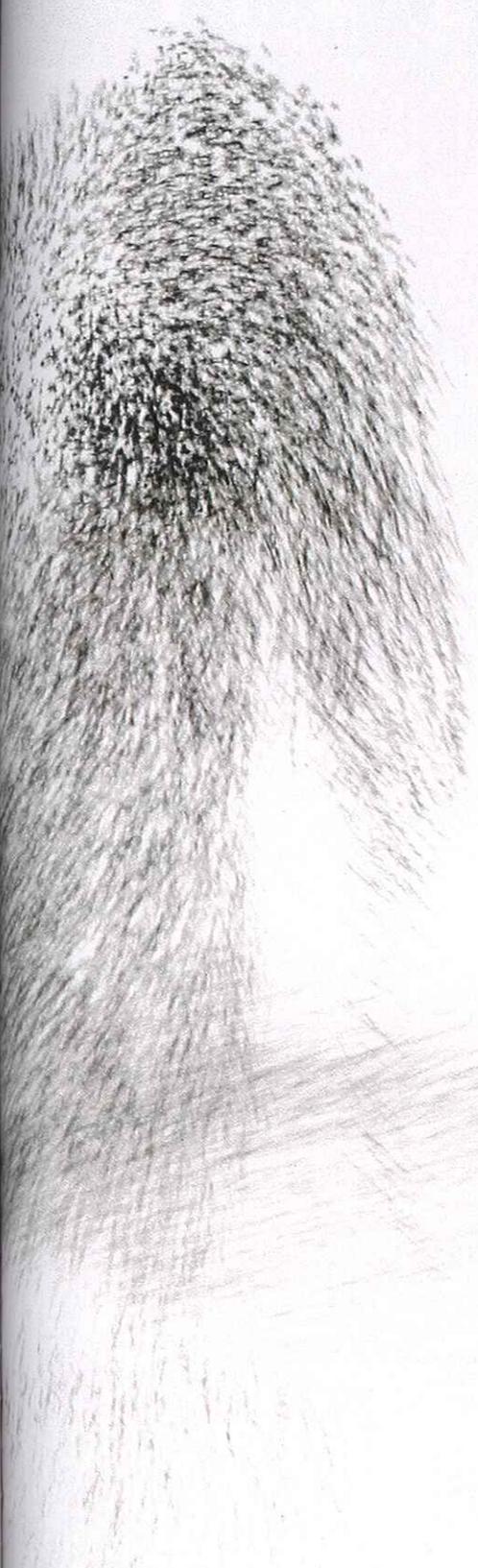


**Vogel-Wolke: Im Herbst erobern  
Stare zu Millionen den Himmel über  
Rom. Geflogen wird nach festen Regeln:  
Jedes Tier passt seine Flugmanöver  
ständig denen seiner sechs bis sieben  
nächsten Nachbarn an**



# Die Klugheit der Massen

**Als Einzelne sind sie schwach.** Im Schwarm jedoch bewältigen Vögel gewaltige Strecken, überwinden Ameisen jedes Hindernis, überleben selbst kleinste Fische. Als derart erfolgreich erweist sich das Prinzip in der Natur, dass es Forscher jetzt auf Maschinen übertragen: Sie bauen Roboter mit der Fähigkeit zur Teamarbeit



**Abwehrbewegung: Delfine attackieren einen Sardinenschwarm. Nur die Flucht im Kollektiv lässt den kleinen Fischen eine Überlebenschance. Für jede Sardine gilt dabei: Bleibe bei den anderen, vermeide Kollisionen und schwimme in dieselbe Richtung wie die Artgenossen**



Von Jürgen Bischoff (TEXT)

**Es ist, als sei ein Trupp** Glühwürmchen dabei, ein Tischfußballfeld zu erkunden: ein paar blaue Lichtchen, die in einer etwa anderthalb Quadratmeter großen Arena ziellos durch die Dunkelheit zu irren scheinen. Doch nur für wenige Minuten – dann beginnen sich die Bewegungen zu ordnen.

Die kleinen Leuchtdinge sind Roboter. Mini-roboter.

Ihre Arena befindet sich im Untergeschoss der Fakultät für Informatik auf dem Campus der Universität Stuttgart, einem riesigen Quader aus Metall und Glas, in dessen Innerem spiegelnde Metallflächen für irritierende Effekte sorgen. Im Keller jedoch herrscht Beton, und eben hier, im Labor des Instituts für Parallele und Verteilte Systeme (IPVS), ist das Spielfeld aufgebaut.

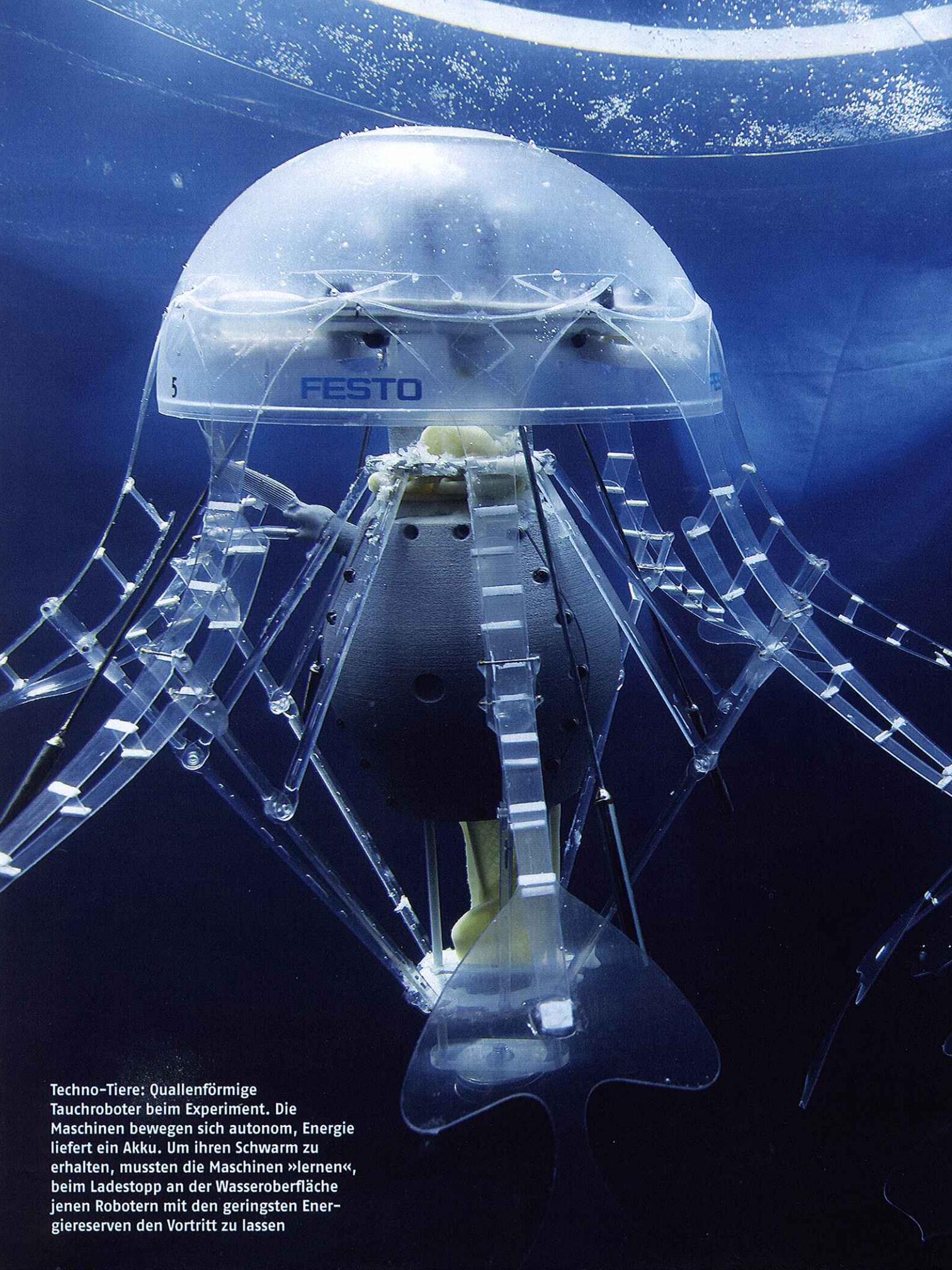
Ein jeder der etwa zehn Roboter, die zweirädrig darauf herumgeistern, ist nur wenig größer als vier Stücke Würfelzucker: 20 Millimeter hoch mit einer Grundfläche von 26 mal 28 Millimetern. In einem gepolsterten Aluminiumkoffer lagern noch viele Dutzend weitere dieser elektronischen Wuselwesen, mit genau 300 Stück existiert in Stuttgart der bei Weitem größte Roboterschwarm der Welt.

Dessen Schöpfer – Informatiker, Physiker und Kybernetiker des IPVS – nennen die Baureihe „Jasmin“. Rund 20 Sensoren lassen die Maschinchen Lichter erkennen und Farben unterscheiden, liefern Informationen über Hindernisse, über Geschwindigkeit und Energiezustand. Infrarot und Mikro-Funkchips ermöglichen ihnen außerdem die Kommunikation untereinander. Denn die 300 Jasmins sind bei ihren Bewegungen vollständig autonom. Niemand steuert sie fern, keine Programmierung bestimmt, welche Route sie zu nehmen haben.

„Nur die Aufgaben, die sie lösen sollen, geben wir ihnen vor“, sagt Paul Levi. Der 65-jährige Physiker, seit 1992 Professor am IPVS, ist Leiter der Abteilung, in der die Winzlinge entstehen.

Im Laborraum sind die Lampen gelöscht, um die auf Lichtsignale reagierenden Elektro-Probanden nicht zu irritieren. Sie sollen in der Arena den kürzesten Weg zwischen zwei leuchtenden Flächen finden – die eine gleichermaßen Start und Ziel, die andere der Wendepunkt.

Anfangs fahren die Minis auf rein zufälligen Wegen durch den Raum. Dabei geschieht es immer wieder, dass ein Roboter den Wendepunkt berührt. Dadurch werden während seines Rückwegs unter



**Techno-Tiere: Quallenförmige Tauchroboter beim Experiment. Die Maschinen bewegen sich autonom, Energie liefert ein Akku. Um ihren Schwarm zu erhalten, mussten die Maschinen »lernen«, beim Ladestopp an der Wasseroberfläche jenen Robotern mit den geringsten Energiereserven den Vortritt zu lassen**



dem Spielfeld befindliche Leuchtdioden aktiviert – eine Lichtspur entsteht.

Je länger die gewählte Strecke, umso eher verlöscht die Lichtspur wieder. Vorher aber kreuzt sie ein anderer Rückkehrer und folgt der Spur von dort an. Je mehr Jasmins denselben Weg wählen, umso dauerhafter leuchtet die Spur – was wiederum die Chance erhöht, dass sie anderen die Richtung weist. Keine Viertelstunde, und fast alle Maschinenwesen sind auf der kürzesten Strecke zwischen Start- und Wendepunkt unterwegs.

Ein Bild aus der Natur drängt sich auf: das Treiben auf einer Ameisenstraße. Und tatsächlich haben sich die Wissenschaftler um Paul Levi bei den Krabbeltieren ihre Vorbilder gesucht. Denn auch viele Ameisenarten hinterlassen, wenn sie etwa eine Futterquelle gefunden haben, auf ihrem Weg für die Nachfolgenden duftende, aber flüchtige Marker, sogenannte Pheromone. Auf diese Weise findet schnell eine ganze Ameisenkolonie den optimalen Weg zum gedeckten Tisch.

„Wir forschen mit kooperativen autonomen Systemen“, sagt Levi – in anderen Worten: mit künstlichen Schwärmen. Denn ebenso wenig, wie eine einzelne Ameise sonderliche Geistesgaben besitzt, im Kollektiv aber wahre Wunder vollbringt – Futter findet, Lasten schleppt, Brücken und gewaltige Bauten errichtet –, ebenso wenig verfügt jedes der Stuttgarter Jasminchen auch nur über einen Funken Verstand. Doch im Schwarm gelingt es ihnen, zum Ziel zu finden und Hindernisse auf dem kürzesten Weg zu umfahren. „Sie erhalten Informationen und werten diese aus“, erläutert Levi, „und in diesem Sinne könnte man vielleicht schon von einem Anflug von Intelligenz reden.“

Von künstlicher Intelligenz.

**Ob Heuschrecken oder Sardinen, Honigbienen oder Stare** – die Schwärme im Tierreich faszinieren die Menschen seit Jahrtausenden. Doch erst in jüngerer Zeit haben Forscher begonnen, den Geheimnissen der Tierformationen wirklich auf den Grund zu gehen. Was steuert ihre Bewegungen? Warum behindern sich Ameisen nicht gegenseitig? Wie kommt es, dass Stare in ihren rasenden Wolken nicht massenweise zusammenstoßen?

Verblüffender noch: Woher weiß der Hering im Zentrum eines Schwarms, dass er ausweichen muss, weil von außen ein hungriger Seehund angreift? Eine übergeordnete Instanz hilft ihm dabei jedenfalls nicht. Denn ein Leittier, soviel ist seit dem Al-

tertum bekannt, kommt in einem Schwarm nicht vor. „Die Heuschrecken – sie haben keinen König; dennoch ziehen sie aus ganz in Haufen“, bemerkte schon König Salomo im Alten Testament.

Noch im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts hielt man die koordinierten Flugmanöver der Vögel für ein Ergebnis von Gedankenübertragung. Mittlerweile weiß man, dass Vögel diese Fähigkeit genauso wenig besitzen wie Menschen. Doch sollte es mehr als 50 Jahre dauern, bis Verhaltensforscher wenigstens die grundlegenden Regeln von Tierschwärmen verstanden hatten. Und bereits diese sind überraschend genug.

Für einen Fischschwarm zum Beispiel reichen drei Regeln, damit er funktioniert, erläutert der britische Biologe Iain D. Couzin von der Universität Oxford, einer der führenden europäischen Schwarmforscher: „Bleibe bei der Gruppe, vermeide Kollisionen und schwimme in die gleiche Richtung wie die Artgenossen in der Nähe.“ Eine zentrale Füh-

Schwarms, das wiederum auf das Verhalten seiner Mitglieder zurückwirkt.

Würde jemand den Vögeln die Flugrichtung vorgeben, wären Kollisionen unvermeidlich. Ein Schwarm funktioniert nur, wenn seine Mitglieder eigenen Interessen folgen.

Wie weit das führen kann, entdeckte Couzin bei den amerikanischen Mormonengrillen in der Wüste von Utah, die manchmal in bis zu acht Kilometer langen, bandförmigen Formationen über den Wüstenboden kriechen: „Nahrungsmangel macht die Tiere zu Kannibalen“, berichtet Couzin. „Sie bewegen sich, weil sie das Tier vor sich erwischen wollen – und gleichzeitig verhindern, dass sie von hinten gefressen werden.“

**Mitte der 1980er Jahre** schließlich begannen Physiker und Informatiker, die Regeln des natürlichen Schwarmverhaltens am Computer nachzubilden. Ihr Ziel war es, diese auf technische wie auf

wirtschaftliche Steuerungsprozesse zu übertragen – so, wie sich Ingenieure auch in der Material- und Konstruktionsforschung seit Langem ihre Vorbilder in der Natur gesucht haben, ob bei der Herstellung von Saugnäpfen, Flugzeugflügeln oder wasserabweisenden Oberflächen.

1986 programmierte der amerikanische Computergrafiker Craig Reynolds erstmals einige kleine Animationen, die er „Boids“ nannte und denen er dieselben simplen Regeln mitgab, wie sie für Fische und Vögel gelten. Es funktionierte: Auf dem Bildschirm verhielten sich die Boids so, wie sich ein natürlicher Schwarm bewegt.

Als Erster übertrug 1992 der Regisseur Tim Burton Reynolds' Algorithmus auf die animierten Fledermäuse im Film „Batmans Rückkehr“. Später entwickelten sich daraus erste Versuche mit Robotern.

Es ist eine naheliegende Überlegung: Weil die Schwarmregeln so einfach sind, eignen sie sich möglicherweise auch besonders gut als Verhaltensmatrix für Maschinen. Über den Weg der Selbstorganisation könnten viele autonom agierende Roboter Probleme in Angriff nehmen, für die jede einzelne dieser Maschinen zu dumm ist.

„Schwärme aus kleinen und kleinsten Robotern“, sagt Paul Levi vom IPVS in Stuttgart, „könnten für

## Ein echter Schwarm funktioniert nur ohne Chef. Ein Leittier, das die Richtung vorgibt, würde die Ordnung unweigerlich zerstören

rung hingegen werde nicht gebraucht, denn bei Einhaltung dieser Regeln benötigt keines der Individuen den Überblick über die Gesamtsituation, um angemessen etwa auf einen Raubfisch zu reagieren.

Ähnlich wie die Fische verhalten sich auch Vögel. Eine Gruppe um den römischen Physiker Andrea Cavagna entdeckte nach jahrelanger Beobachtung, dass sich Stare, die jeden Herbst zu Millionen in großen Wolken den Himmel über der Hauptstadt bevölkern, die meiste Zeit auf die sechs bis sieben nächsten Nachbarn links und rechts konzentrieren, egal, wie weit sie entfernt sind. Mit diesen koordinieren sie ihre Flugbewegungen und gleichen sie nach Störungen sofort wieder an.

Damit sind die faszinierenden Wolkenmuster der ziehenden Sänger das Ergebnis eines steten Bemühens um Ausgleich: Aus den individuellen Aktionen der Tiere – einzelne Vögel müssen Feinden ausweichen, auf Luftwirbel reagieren, eine Fliege aufschnappen – entsteht das Gesamtverhalten des

viele Anwendungsfragen wichtig werden, etwa in der Medizin, in den Materialwissenschaften, in der Biologie. Es ist eine Technologie, die die Gesellschaft von morgen verändern wird.“

Die Techno-Schwärme besitzen gegenüber zentral gesteuerten Systemen nämlich einen gewaltigen Vorteil: Versagen bei diesen einzelne Elemente, liegt in den allermeisten Fällen gleich die komplette Anlage flach; beim Einsatz von Schwarmtechnologie dagegen kann der verbleibende Rest die Lücken schließen – und weiterarbeiten.

Wissenschaftler entwerfen an Computern und in ihren Labors bereits krabbelnde, rollende, tauchende oder fliegende Roboterschwärme, die zum Beispiel bei Katastropheneinsätzen helfen oder die Umwelt überwachen sollen.

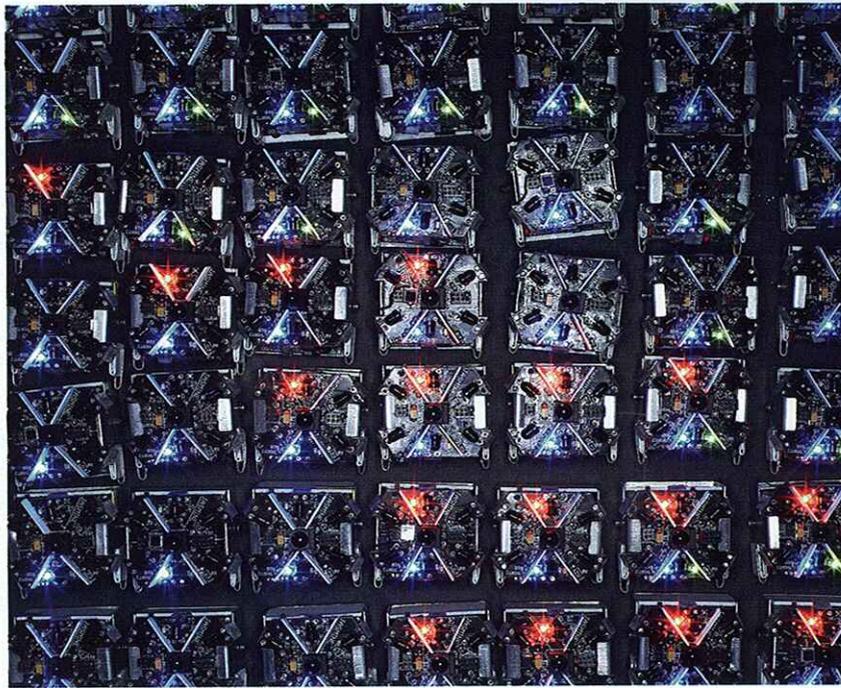
Forscher der NASA erdachten einen Schwarm von 33 000 Kleinstrobotern, die sich im Erdorbit eigenständig zu gewaltigen Solarkraftwerken zusammenfügen. Europas Raumfahrtbehörde ESA plant, Gruppen sogenannter Pico-Satelliten von der Größe eines Zauberwürfels als Sammelteleskope durchs All fliegen und zur Erledigung von Forschungsjobs auf anderen Himmelskörpern Mikro-Maschinen auschwärmen zu lassen.

Nicht erstaunlich, dass solche Visionen auch das Interesse des Militärs wecken: In den USA hat die US-Army vor Kurzem umgerechnet fast 25 Millionen Euro für die Entwicklung miniaturisierter Kunstinsekten bewilligt – als nahezu unsichtbare Scouts für Bodentruppen beim Häuserkampf.

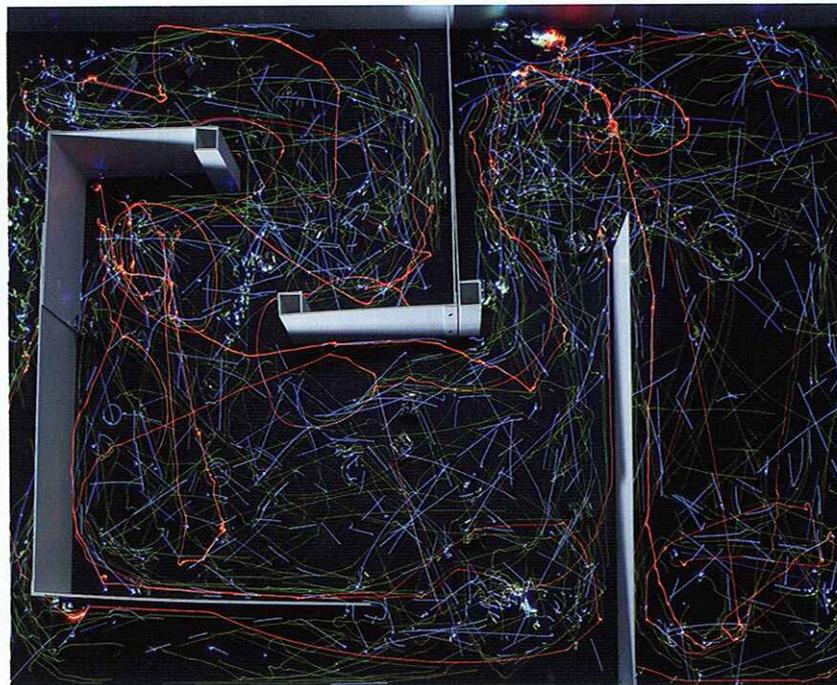
**In Europa arbeiten inzwischen Physiker, Biologen und Informatiker** unter anderem aus Deutschland und Belgien, aus Österreich und der Schweiz, aus Großbritannien und den Niederlanden in wechselnden Kooperationen an immer neuen Varianten der technischen Umsetzung von Schwarmintelligenz. Die Europäische Union fördert dieses Innovationsfeld mit Millionensummen.

„Die Schwarmforschung ist einer der seltenen Fälle, in denen Europa gegenüber den Amerikanern die Nase vorn hat“, sagt Marco Dorigo, 47. Der aus Mailand stammende Informatiker, Forschungsdirektor am Institut für Künstliche Intelligenz (IRIDIA) der Freien Universität in Brüssel, ist einer der Pioniere auf dem Gebiet künstlicher Schwärme.

Seinen Arbeitsplatz im fünften Stock des Universitätsgebäudes an der Brüsseler Avenue Adolphe Buyl erreicht man zwar nur über einen klapprigen Fahrstuhl im Schleichgang. Doch diese Ouverture



**Leuchtkörper:** »Jasmin« haben Stuttgarter Wissenschaftler jene 300 Maschinchen genannt, die den zurzeit größten Roboterschwarm der Welt bilden. In verschiedenen Umgebungen wird mit den Minis die Entwicklung von künstlicher Intelligenz durch Kooperation erforscht. Auf ihren Wegen (u. in Langzeitbelichtung) kommunizieren die Würfel mithilfe von Leuchtdioden: Rotes Licht signalisiert Aktion, blaues die Bereitschaft zum Informationsaustausch



täuscht. Hinter einer gut gesicherten Metalltür liegen die Zukunftslabors von IRIDIA.

Auf den ersten Blick wirken sie wie eine Ameisenausstellung: Ameisen auf Postern und Plakaten, auf Fotos und Urkunden. Auf dem Sideboard in Dorigos Büro hat sich gar eine ganze Kolonie versammelt: aus Draht gebogen, aus Knetmasse geformt. Ameisen sind Dorigos wissenschaftliche Inspiratoren.

Mit ihrer Hilfe hatte sich der Italiener als einer der Ersten an eine Aufgabe gemacht, die Generationen von Mathematik- und Informatikstudenten als das „Problem des Handlungsreisenden“ bekannt ist: den kürzesten Weg zwischen einer vorgegebenen Anzahl von Städten zu finden.

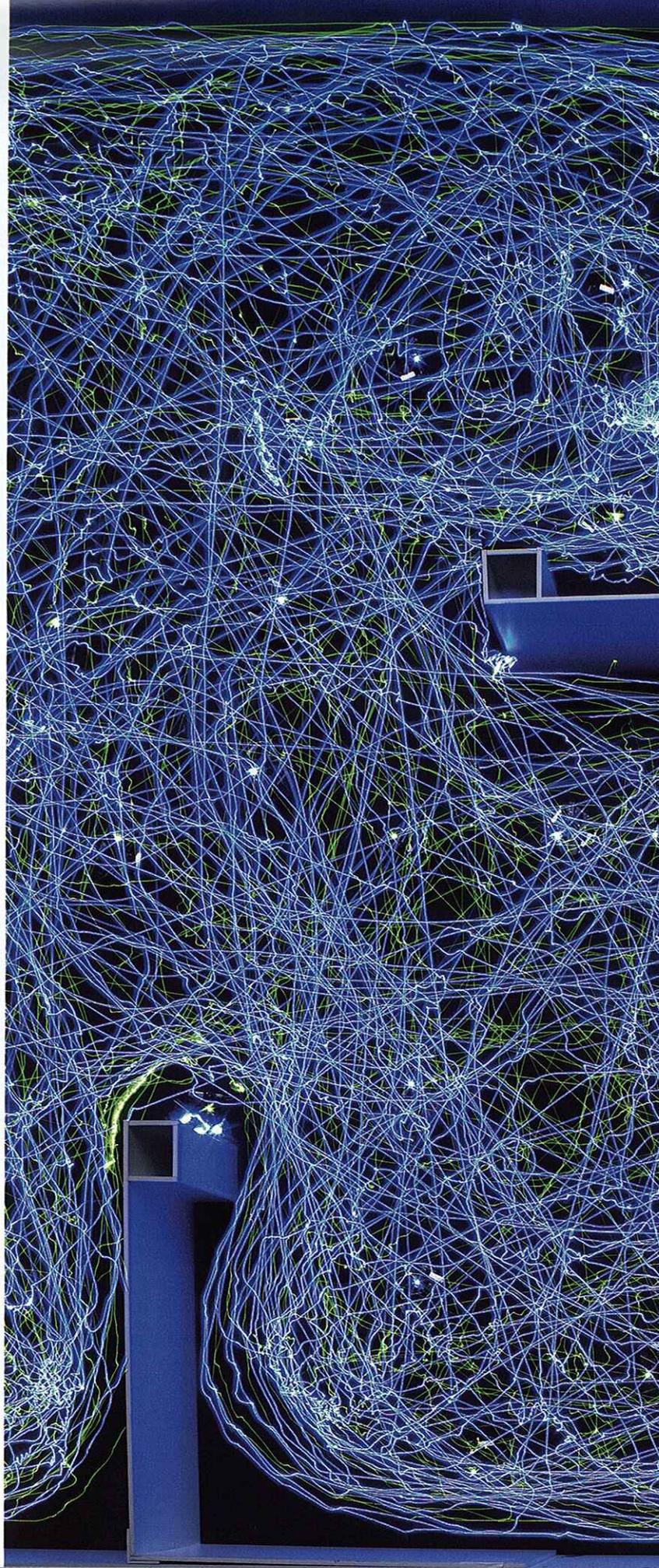
Der Wissenschaftler nimmt ein Blatt Papier und beginnt, es mit Punkten und Linien zu füllen: „Bei drei Punkten, also drei Städten, ist die Sache noch einfach – es gibt nur eine mögliche Lösung. Doch die Anzahl der Wege steigt faktoriell – bei 30 Orten hat man  $4,4 \times 10^{30}$  Möglichkeiten.“ Das ist eine 44 mit 29 Nullen, in Worten: 4400 Quadrilliarden.

Marco Dorigo hat eine Software geschrieben, in der er aus jeder virtuellen Stadt virtuelle Ameisen loslaufen, virtuelle Pheromone verteilen und virtuell nach der besten Lösung suchen ließ. Die Überlegung: Einige Strecken erhalten dabei mehr Pheromone als andere – entweder weil sie von mehr Individuen benutzt werden oder weil sie kürzer sind. „Am Ende ergibt sich der optimale Weg.“

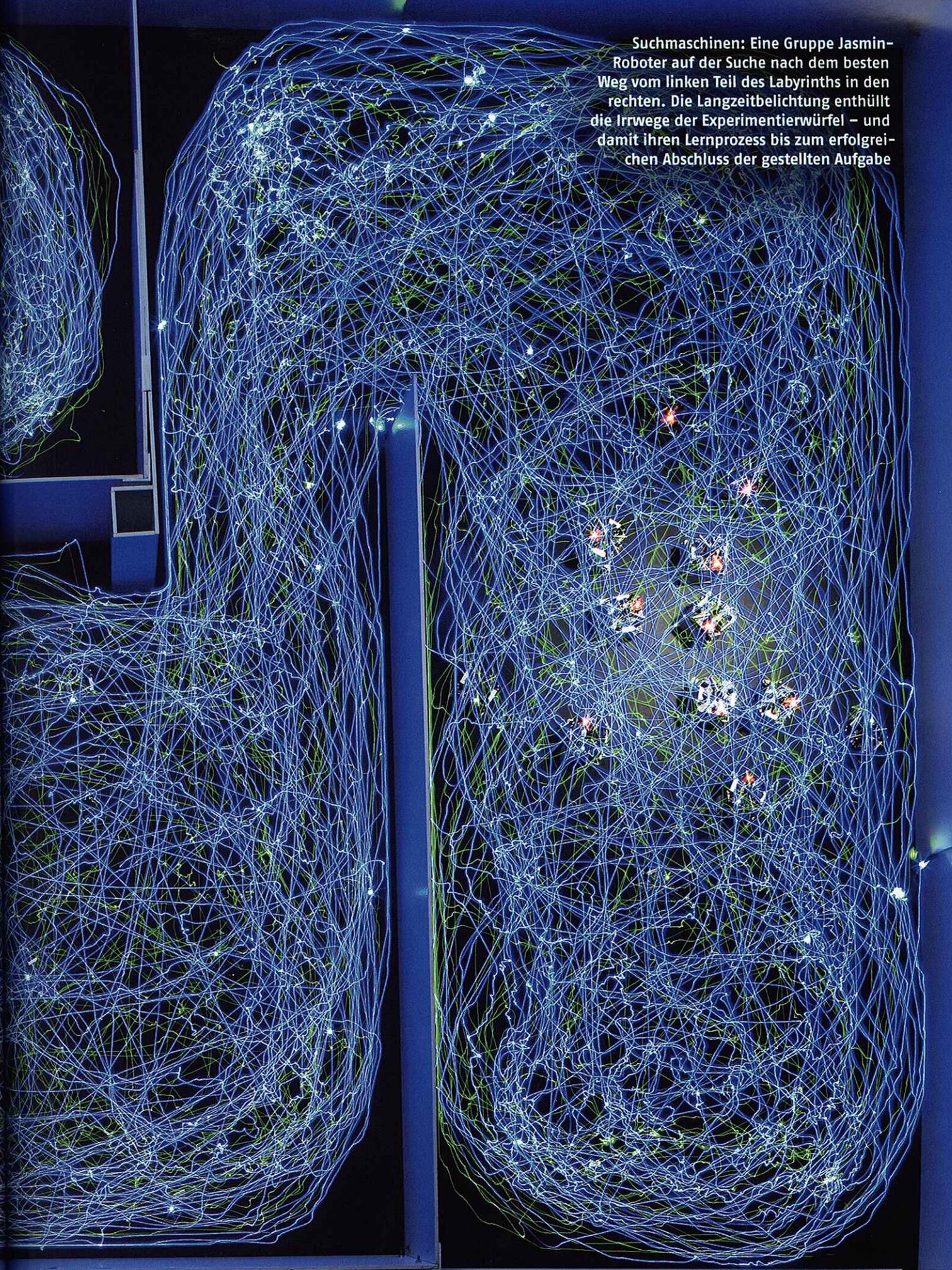
Schnell zeigte sich, dass die in Software übersetzte Schwarmintelligenz der Sechsbener auch ein probates Mittel abgab, um Wirtschaftsabläufe zu optimieren. Speditionen, Fluggesellschaften, Lebensmittelkonzerne oder Mobilfunkanbieter – überall sorgt die Routenfindung nach Insektenart heute für verbesserte und billigere Transportwege.

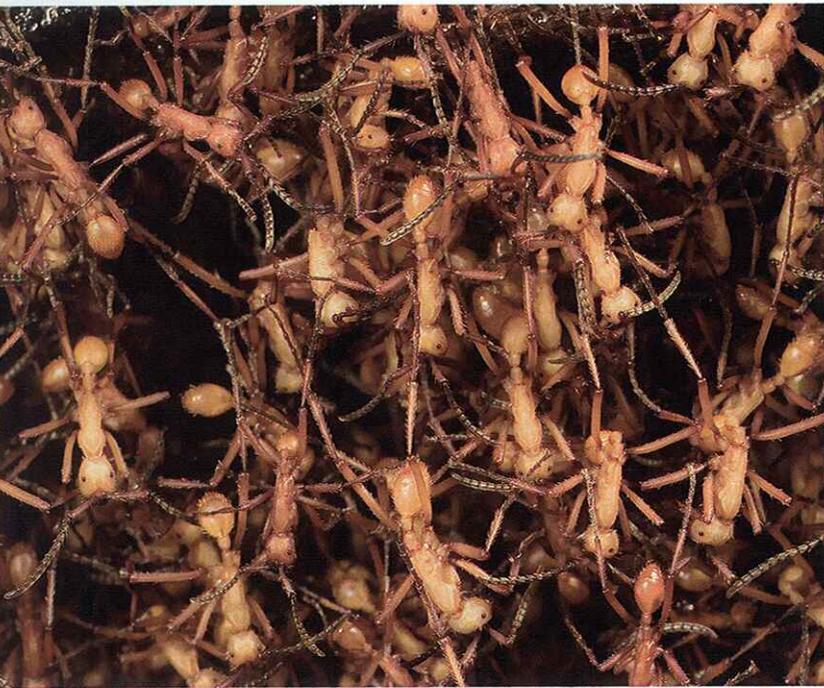
So steuert etwa die Ameisen-Software der Schweizer Firma AntOptima, ein Ableger des Dalle-Molle-Instituts zum Studium Künstlicher Intelligenz in Lugano, die rund 1000 Lastwagen umfassende Fahrzeugflotte des italienischen Nudelherstellers Barilla ebenso wie die Logistik des Schweizer Handelsriesen Migros.

Entwickler in den britischen Labors des Computer-Multis Hewlett-Packard nutzten die Sechsbener-Technik zur Beschleunigung der Verbindungen in internationalen Telefonnetzwerken: Horden programmierter Scouts erkunden die Netze und hinterlassen überall – als Techno-Pheromone – kurzzeitig existierende Info-Bits. Den so entstehenden Bit-Pfaden folgen dann die Telefonverbindungen. Ist ein



Suchmaschinen: Eine Gruppe Jasmin-Roboter auf der Suche nach dem besten Weg vom linken Teil des Labyrinths in den rechten. Die Langzeitbelichtung enthüllt die Irrwege der Experimentierwürfel – und damit ihren Lernprozess bis zum erfolgreichen Abschluss der gestellten Aufgabe





**Vorbildfunktion:** Ameisen schließen sich zusammen, um Futter zu bewegen oder Abgründe zu überbrücken. So schaffen sie gemeinsam, was jedes Tier für sich allein nie könnte. Forscher in Belgien und der Schweiz übertrugen dieses Beispiel natürlicher Schwarmintelligenz auf kleine, gelehrige Roboter. So lernten diese S-Bots unter anderem, durch Kopplung ihrer Greifer Bodenwellen zu überwinden, die für einzelne Gefährte zu steil waren



Netzknotten überlastet, „verdunsten“ die ausgelegten Marken, und die Gespräche nehmen den nächstbesseren Weg.

Auch die derzeit größte Billigfluglinie der Welt, die US-amerikanische Southwest Airlines, hat nach dem Muster ihre Betriebsabläufe optimiert. Anfangs nur für die Luftfracht gedacht, erwies sich das Modell dort als so erfolgreich, dass es die Firma auch bei der Flugabfertigung am Sky Harbor International Airport in Phoenix, Arizona, ausprobierte.

Rund 200 Southwest-Flugzeuge starten und landen hier täglich auf zwei Rollbahnen und benutzen Gates an drei Terminals. Um die Aufenthaltszeiten der Maschinen zu verkürzen, ließ die Gesellschaft ein Computermodell des Flughafens programmieren. Jedes Flugzeug darin besaß die Fähigkeit, sich zu erinnern, wie viel Zeit es benötigt, um an ein bestimmtes Gate heran- und von dort auch wieder wegzukommen. Die schnellsten Abfertigungsplätze wurden dann gespeichert, die langsamsten dagegen wieder vergessen.

„Die Flugzeuge ähnelten Ameisen auf der Suche nach dem besten Gate“, erläutert der Southwest-Manager Doug Lawson, der für die Software verantwortlich zeichnet. Er fütterte sie mit Echtzeitdaten der Ankunfts- und Abflugzeiten und ließ immer neue Simulationen ablaufen. So „lernten“ die Flugzeuge nach und nach, unnötige Wartezeiten auf dem Rollfeld zu vermeiden – Erkenntnisse, die Southwest unmittelbar auf den täglichen Flugbetrieb anwenden konnte.

**In Brüssel arbeitet das Team** von Marco Dorigo allerdings nicht nur an virtuellen Ameisen. Ähnlich wie in Stuttgart sind aus ihnen echte Roboter aus Metall und Gummi entstanden – Ergebnis des von der EU-Kommission unterstützten Projekts „S-Bots“, „S“ wie *swarm*. Ziel war dabei, den Minirobotern eine Art soziales Verhalten beizubringen und sie dadurch in die Lage zu versetzen, auch kompliziertere Aufgaben zu lösen, als nur Wege zu finden.

Eine Gruppe um den italienischen Kybernetiker Dario Floreano, 44, Direktor des Labors für Intelligente Systeme (LIS) der Polytechnischen Hochschule Lausanne, übernahm die Konstruktion der künstlichen Insekten. Mit der Zeit entstanden 35 Maschinchen, 15 Zentimeter hoch, die sich nach Raupenart auf radgetriebenen Gummiriemen bewegen.

Eine 360-Grad-Kamera sorgt für die grobe visuelle Wahrnehmung des Umfelds. Sensoren lassen die Roboter unter anderem ihre Lage im Raum er-

kennen, und verschiedenfarbige Leuchtdioden geben Auskunft über ihren jeweiligen Aktivitätszustand: ob sie noch in Bereitschaft sind oder bereits in Aktion, ob sie Hilfe benötigen oder ihre Aufgabe erledigt haben.

Das Besondere an den S-Bots aber ist ein kleiner roter Greifer, mit dem sie sich aneinander oder auch an anderen Gegenständen festklammern können. „Ein bisschen so, wie es Ameisen mit ihren Beinen tun“, sagt Dario Floreano.

Am Ende verfügten die Forscher über einen Schwarm surrender und blinkender Plastikinsekten, die sich in der Folgezeit als äußerst gelehrt erwiesen. Zuerst lernten sie das Erkennen und Umfahren von Hindernissen und Abgründen. Dann, sich aneinander zu koppeln und gemeinsam in dieselbe Richtung zu rollen.

Als Nächstes übten die S-Bots, sich gegenseitig vor dem Sturz vom Übungsplatz zu bewahren: Geriet eine der Maschinen in die Nähe des Abgrunds, blinkte sie Alarm. Andere registrierten das Signal und eilten mit ihren Greifern zu Hilfe. Bald verstanden es die S-Bots auch, sich untereinander über zentimeterhohe Bodenwellen zu helfen, um ein programmiertes Ziel zu erreichen. Und schließlich schafften sie es, gemeinsam Gegenstände, die auf ihrem Übungsplatz verteilt waren, zu ihrem „Nest“ zu bugsieren.

„Sie waren in der Lage, das Objekt zu lokalisieren und es durch die Vereinigung ihrer Kräfte ins Ziel zu bewegen“, berichtet Floreano. Dabei mussten sie imstande sein, auftretende Konflikte zu lösen: Was, wenn verschiedene S-Bots in verschiedene Richtungen ziehen? Dafür hatte ihnen Floreanos Team eine besondere Fähigkeit einprogrammiert: „Sie konnten die Summe all jener Kräfte registrieren, die ihren eigenen Aktionen entgegenwirkten, und sich dann der kräftigeren Partei anschließen.“

Sollte also ein Objekt zu einem vorher bestimmten Punkt gebracht werden, versuchten die S-Bots erst, es dorthin zu ziehen. Zogen auf der anderen Seite aber schon Roboter mit mehr Kraft, schoben sie eben, um das Ziel zu erreichen.

Es war exakt so wie bei den Ameisen: Jeder S-Bot handelte als Egoist – doch gemeinsam bewegten sie Dinge, die einer allein nie geschafft hätte. „Ihr

künstliches neuronales Netzwerk befahl ihnen, bei der Mehrheit zu bleiben“, erläutert Floreano. „Und genau daraus ergibt sich koordiniertes Handeln: Die Kontrollsysteme aller Individuen richten sich auf eine einzige Lösung aus.“

Um diese geht es auch bei einem anderen Projekt, das die Institute von Dorigo und Floreano gemeinsam entworfen haben: „Swarmanoid“. „Dabei handelt es sich praktisch um die Entwicklung von Arbeitsteilung. Und zwar in einem Schwarm aus heterogenen Objekten“, sagt Floreano.

Diesmal spricht er von etwas, das in der Natur nicht vorkommt – von einem Schwarm quasi autonom agierender Gliedmaßen: fliegende Eye-Bots, die mit Minikameras eine Umgebung visuell erfassen und die Informationen auswerten; Hand-Bots, die klettern, Objekte ergreifen und bewegen können; Foot-Bots, welche die Hand-Bots transportieren sollen, dabei aber auch unter niedrige Gegenstände blicken können. „Das System ist in erster Linie für

## Wenn Maschinen ein Problem im Kollektiv bewältigen, müssen auch sie vor allem eines gelernt haben: Konflikte zu lösen

geschlossene Räume gedacht“, sagt Floreano. Um vielleicht Menschen in einsturzgefährdeten Gebäuden zu lokalisieren, nach einem Erdbeben etwa.

Mit Swarmanoid löst sich das Kunstprodukt erstmals vom natürlichen Vorbild und entwickelt – im Wortsinn – ein Eigenleben.

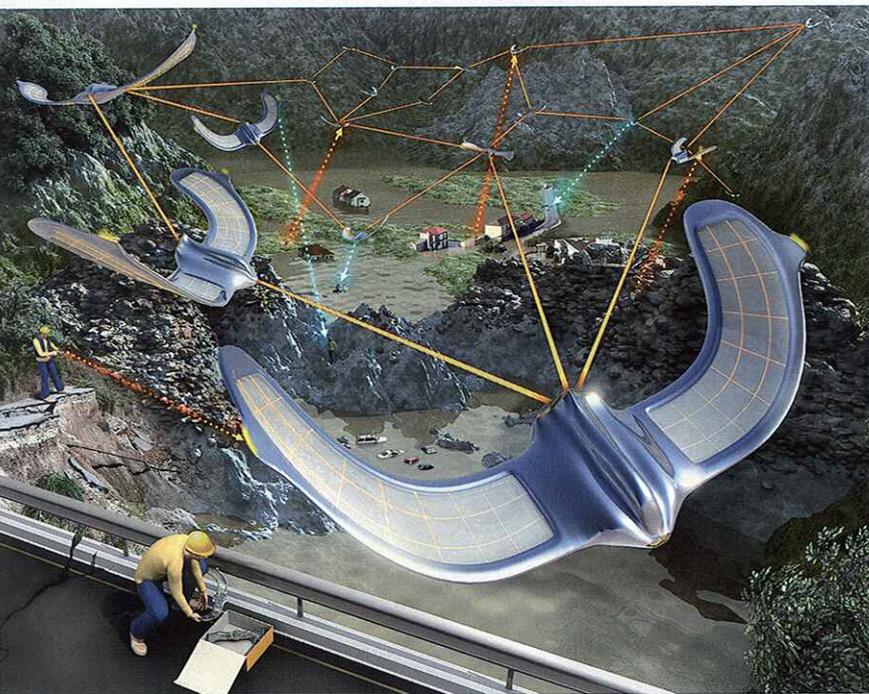
Floreanos Plan: „In anderthalb bis zwei Jahren wollen wir einen Schwarm haben, mit dem wir arbeiten können.“ An der Polytechnischen Hochschule bauen Doktoranden und Studenten bereits an den Prototypen, am Eye-Bot zum Beispiel, der bisher nur aus einem Kohlefasergestell von 55 Zentimeter Durchmesser besteht, das von vier Propellern wie ein Hubschrauber in der Luft gehalten wird.

Der Australier James Roberts, der die kleinen Flieger entworfen hat, führt einen Prototyp vor, noch mithilfe der Fernsteuerung: Das Gerät saust durch den Raum, wechselt blitzschnell Höhe oder Flugrichtung. „Die Batterien halten gut 20 Minuten“, sagt der 26-jährige LIS-Doktorand; was zu wenig ist

für einen ausgedehnten Rettungseinsatz. „Deshalb werden wir die Eye-Bots mit einer Technik ausstatten, die es ihnen erlaubt, sich zum Beispiel an der Zimmerdecke festzuhalten, solange sie einen Raum untersuchen. Durch diesen Trick wird ihre Energie für mehrere Stunden reichen.“

In seiner letzten Ausbaustufe soll der Swarmoid-Schwarm aus 20 fliegenden Augen, 20 rollenden Füßen und aus zehn Greifern bestehen.

**Auch Severin Leven** arbeitet an einem Rettungssystem. Der 30-jährige Deutsche plant zusammen mit einer Doktorandin aus der Schweiz das „Smavnet“. Der Name ist ein Akronym aus „Swarming Micro Air Vehicle Network for Communication Re-



**Rettungsnetz: Ist etwa in einer Katastrophenregion das Funknetz zusammengebrochen, soll, wie in dieser Illustration, bald ein Schwarm fliegender Ortungsroboter Ersatz aufbauen können**

lay“. Auf Deutsch: Flugkörper-Schwarm zum Aufbau von Kommunikationsnetzen.

Auf der Wiese vor dem Labor für Intelligente Systeme hat Leven den Prototyp ins Gras gelegt: einen Flügel aus Styropor in Form eines Papierfliegers, jedoch mit 80 Zentimeter Spannweite, einem Elektromotor und, zumindest für den Anfang noch, einem GPS-Empfänger. Trupps dieser Apparate, ausgebaut zu autonomen Robotern, sollen in Katastrophen- oder Konfliktgebieten mobile Kommunikationsnetze aufbauen – wobei sie selbst das Netz sind.

Leise surrend erhebt sich der Urtyp aller künftigen Smavs in die Lüfte. Es dauert ein paar Minuten, dann kann Leven die Fernbedienung einklappen lassen: Am Himmel findet der Roboter seinen Weg jetzt allein – im Wechsel umkreist er zwei zuvor eingemessene GPS-Punkte, etwa 150 Meter voneinander entfernt. Ein Greifvogel und ein paar Krähen, die sich über der Wiese gerade eine Luftschlacht liefern, ziehen sich in eine höhere Etage zurück.

„Natürlich“, sagt Leven, „wird Smavnet ohne GPS auskommen. Alle Roboter erhalten ihr eigenes Kommunikationsmodul und werden so programmiert sein, dass sie im Einsatzgebiet verbleiben, indem sie sich untereinander koordinieren.“

Das Szenario: ein Erdbeben, ein Tsunami, ein Vulkanausbruch – was auch immer. Alle Mobilfunknetze tot, alle Internetverbindungen zerstört. Von der Basisstation der Nothelfer aus starten die Smavs. Rund 20, sagt Leven, brauchte man, um einen Quadratkilometer abzudecken.

Der erste Roboter fliegt etwa 100 Meter weit, schlägt dann eine Kreisbahn ein, sucht nach eventuellen Funksignalen am Boden und sendet zugleich ein Standortsignal an die Retter in der Basis. Der zweite Flieger überholt ihn, fliegt weitere 100 Meter und funkt ebenfalls sein Signal, wobei er den ersten als Relais benutzt. Und so weiter.

Auf diese Weise sind nicht nur die Einsatzkräfte informiert, sondern auch alle Smavs „wissen“, wo sie sich gerade in Bezug auf ihre jeweils nächsten Schwarmmitglieder befinden. „Die Intensität der Signale gibt ihnen an, wie weit entfernt die anderen Flieger sind und ob sie sich gerade auf sie zu oder von ihnen weg bewegen“, sagt Dario Floreano. „Wir übertragen das Konzept der Pheromone von der Erde in den Himmel.“

Entdeckt einer der Flieger ein Funksignal, das vom Boden kommt, weil etwa Überlebende versuchen, per Handy Hilfe herbeizurufen, nimmt er es auf und leitet es mithilfe des Schwarms an die Basisstation weiter. So entsteht ein Mobilfunknetz – wenigstens für eine kurze Zeit, die ausreichen sollte, um Rettung zu holen.

Das Besondere von Floreanos Experiment liegt in der dritten Dimension. Bisherige Schwarmexperimente wie Jasmin oder S-Bots waren auf flache Arenen beschränkt, wo die Roboter sich mittels Licht relativ leicht lokalisieren und untereinander kommunizieren konnten. Sobald aber die dritte Dimension hinzukommt, zumal in unübersichtlicher Umgebung, wird die Sache erheblich komplizierter. An

der Universität Stuttgart löst man das Problem mit Infrarot- und Drucksensoren: Blau leuchtet das Wasser in dem runden 3000-Liter-Aquarium, das die Esslinger Maschinenbaufirma Festo während der Hannover Messe 2008 präsentiert. Hinter dem Glas bewegt sich unter sanftem Wedeln ihrer Kunststofftentakel eine Gruppe aus fünf quallenförmigen Maschinenwesen. Sie schwimmen umeinander, tauchen ab bis fast zum Grund, scheinen gelegentlich auf halber Höhe auszuruhen, bis sie sich irgendwann an die Oberfläche bewegen: zur Ladestation.

Die Pläne für diesen künstlichen Quallenschwarm stammen ebenfalls aus der Roboter-Werkstatt des Institutes für Parallele und Verteilte Systeme. Das Geld für das Projekt „AquaJelly“ hat die Festo AG beigesteuert, die die tauchenden Roboter als Technologieträger nutzt. Für die Forscher am IPVS stand dagegen ein anderer Aspekt im Vordergrund:

bracht, erlauben die Rundum-Kommunikation mit den anderen Individuen bis zu einer Entfernung von 80 Zentimetern.

Es funktionierte.

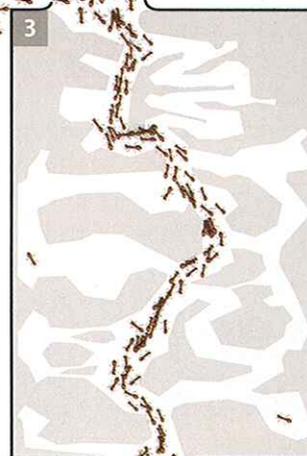
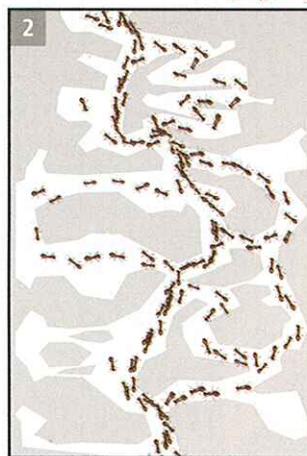
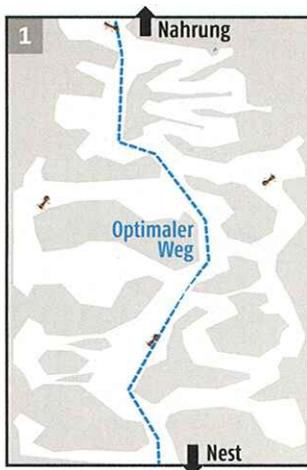
Einmal im Wasser, bewegen sich die Roboterquallen nur bis auf Tentakelabstand, tauschen Informationen über ihre Energiezustände aus – und vor allem: Sie lassen schwächeren Individuen an der Ladestation den Vortritt. „Natürlich gab es im Dauerbetrieb noch technisch bedingte Ausfälle“, sagt Serge Kernbach, „aber der Schwarm hat gezeigt, dass er eine Überlebensstrategie entwickeln kann.“

Dass er mithin Roboter hervorbringt, die altruistisch handeln.

**Robotikexperten und Kybernetiker:** In ihrer Welt von morgen gehören autonom agierende, kommunizierende und kooperierende Maschinen

## AMEISEN-NAVIGATION

1) Bei der Nahrungssuche hinterlassen Ameisen Duftstoffe, die Pheromone. 2) Ist eine Futterquelle gefunden, dienen diese nachfolgenden Tieren zur Orientierung. Die Marker jener Ameisen, die lange Umwege krabbeln, verfliegen jedoch, ehe das Ziel erreicht ist.



3) Hingegen steigt die Pheromonkonzentration auf der optimalen Strecke, die so nach und nach zur Ameisenstraße wird

„Wir wollten vor allem untersuchen, wie künstliches Schwarmverhalten bei dreidimensionaler Bewegung machbar ist“, erklärt der Kybernetiker Serge Kernbach, 37. „Das größte Problem war die Kommunikation unter Wasser und die Entscheidungsfindung der Individuen.“

Denn die Verhaltensregeln, die die Wissenschaftler ihren AquaJellys ins Programm schrieben, waren zwar sehr einfach, erlaubten den Robotern in der Konsequenz aber auch Fehlverhalten: Bleibe bei den anderen, aber halte Sicherheitsabstand; verschaffe dir genug Energie, aber erhalte den Schwarm. Ein klassischer Zielkonflikt: Es gibt für fünf Tauchroboter nur zwei Ladestationen.

Die Wissenschaftler rüsteten also die Quallen mit Drucksensoren aus, die ihnen den genauen Abstand zur Oberfläche angeben. Elf Infrarot-Dioden, ringförmig unter ihrer transparenten Kuppel ange-

so selbstverständlich zum Alltag wie heute schon Navigationssysteme, die Autofahrer auf Abwegen zur Umkehr drängen, oder wie Herdplatten, die sich ausschalten, sobald man den Topf wegnimmt.

Und nicht nur bei Katastrophen sehen sie die Schwarmroboter im Einsatz – auch als Klinikhelfer, als Pipeline-Kontrolleure oder als selbstständig agierende Verkehrsmittel.

Wirklich eine schöne Vorstellung: Man gibt auf dem Display seines Robotervehikels ein Ziel ein und reist im Schwarm. Ganz ohne Kollisionsgefahr, hingegen an den maschinellen Altruismus. □

*Bis vor Kurzem hat JÜRGEN BISCHOFF, 55, Ameisen immer als eher lästige Gesellen empfunden. Vor allem dann, wenn sie die Ferienwohnung oder den heimischen Balkon in Besitz nahmen, als wären es die ihren. Seit seinen Recherchen bei den Schwarmforschern sieht der GEO-Autor die kleinen Krabblen differenzierter. Zumal sie ganz selbstverständlich eine Kunst pflegen, die vielen Menschen heutzutage völlig abgeht: Sie halten fest zusammen, wenn die Lage schwierig wird.*