

SONDERDRUCK  
aus

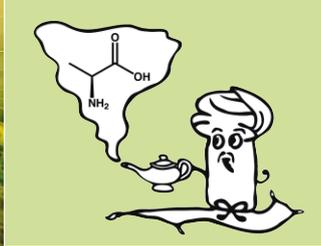
4 | 2021

**VBio**

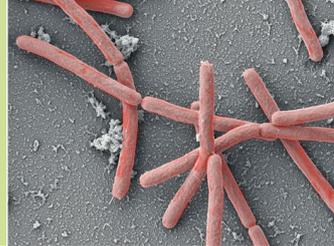
Verband | Biologie, Biowissenschaften  
& Biomedizin in Deutschland



**NACHHALTIGKEIT**  
Genomeditierte  
Lebensmittel



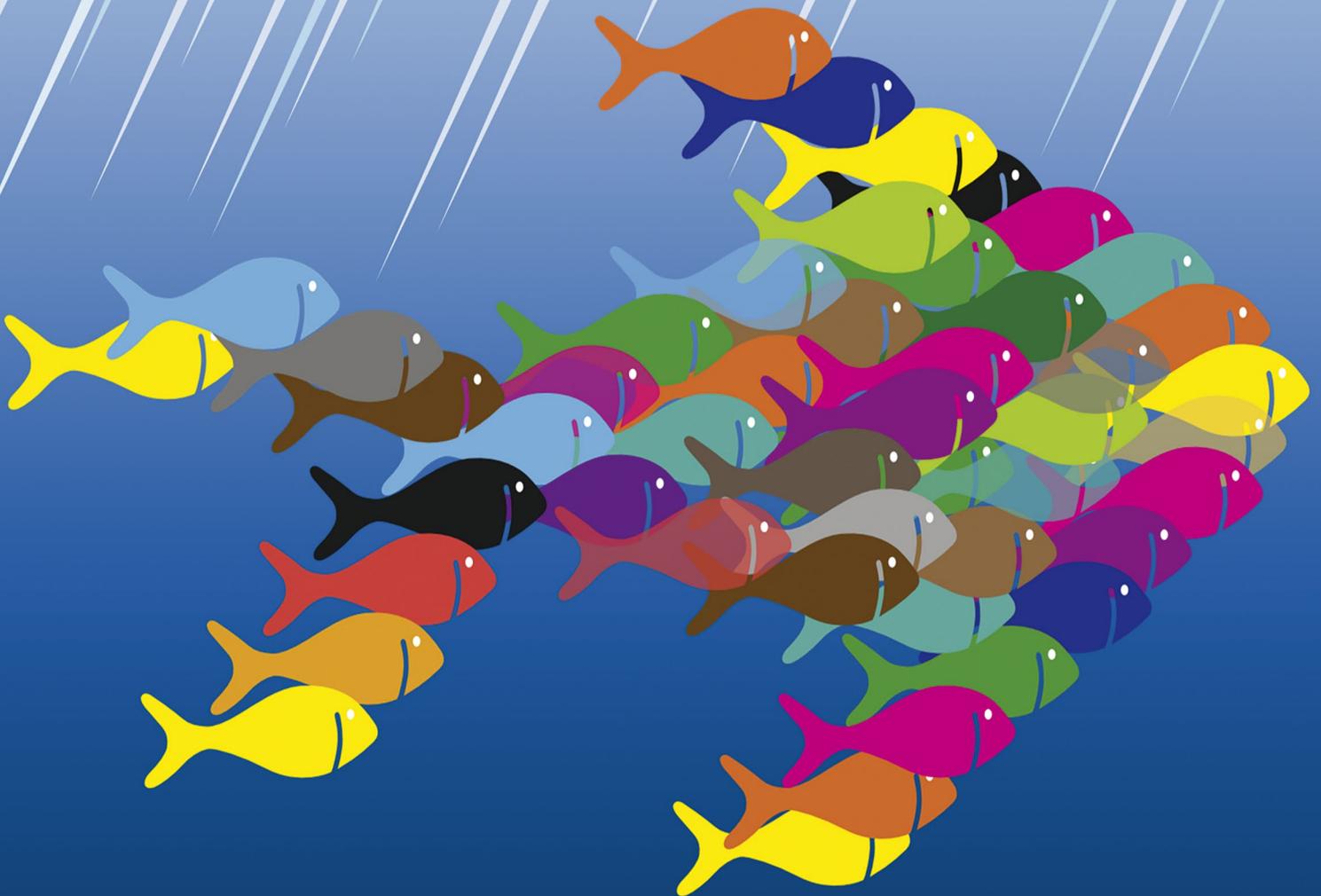
**BIOTECHNOLOGIE**  
Nicht-kanonische  
Aminosäuren



**MIKROBE DES  
JAHRES**  
*Methanothermobacter*

# BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT



**Schwarmintelligenz**



Foto: Sarah Swenty (USFWS).

## Vernetzung schafft Zugang zur nächsten Ebene Schwarmintelligenz

PASCAL EITNER

*An vielen Stellen der Biologie wird deutlich, dass ein Zusammenschluss vieler Individuen zu einer Gemeinschaft neue und ungeahnte Phänomene hervorruft: Egal, ob es sich dabei um Endosymbiosen, Plasmodien oder Tierschwärme handelt – immer entstehen Eigenschaften, die das Leben auf eine neue Stufe der Komplexität heben. So werden neue Lösungen für die Energieversorgung, Kommunikation, Fortbewegung, Versorgungslogistik oder für die Klimatisierung des Nestes gefunden. Zwar lassen sich die zugrundeliegenden Konzepte nicht einem Individuum zuordnen, aber dennoch verfügen die als „Superorganismen“ bezeichneten Gemeinschaften genau über jenes bewundernswerte Phänomen: Intelligenz. Dieser aus der Vernetzung vieler Einzelorganismen geborenen Eigenschaft spüren auch Informatiker nach.*

Für die Schüler von heute ist es ganz klar: „Der Bien“ ist kein Grammatikfehler, sondern ein feststehender Begriff aus dem Biologieunterricht. Er bezeichnet eine Gemeinschaft von vielen tausend Bienen, die zusammen Leistungen erbringen, die weit mehr sind als die Summe der Einzelleistungen. Konzepte zur Arbeitsteilung, Logistikprogramme und Kommunikationsstrategien sind Aspekte, die man eher in einem intelligenten Organismus mit einem sehr komplexen Gehirn vermuten würde. „Der Bien“ bezeichnet solch einen Superorganismus, der durch die Interaktion von Individuen getragen wird, die gemeinsame Ziele verfolgen, ohne dass sie davon etwas wissen [1]. Das Gemeinwohl verlangt allerdings Opfer von den Mitgliedern – unabhängig von ihrem Rang innerhalb der Gemeinschaft. So beschneiden die gemeinsamen Ziele vor allem die individuelle Freiheit: Auch die Bienenkönigin ist als „Staatsoberhaupt“ ihrer Rolle als Eierproduzentin dauerhaft verpflichtet und kann keinen anderen Aktivitäten nachgehen. Gleichzeitig ermöglicht der Zusammenschluss zu einem Superorganismus Leistungen, zu denen kein

Individuum alleine in der Lage wäre. Dabei geht es nicht um Quantität. Vielmehr entstehen neue, intelligente Konzepte, die allen in der Gemeinschaft nützen: arbeitsteilige Brutpflege, Klimatisierung und Nestarchitektur, effiziente Nahrungsbeschaffung und Vorratshaltung, organisierte Feindabwehr, Straßenbau, verbesserte Mobilität oder Kosten-Nutzen-Analysen bei der Krankenpflege.

Wer teilt aber einer Arbeiterin mit, welche Aufgabe sie in ihrem Staat übernehmen soll? Wie entsteht ein riesiger Termitenbau mit Straßen und Kammern ohne zentrales „Planungsbüro“? Wie kommt eine Sardine ans Ziel, obwohl ihr dieses unbekannt ist? Welche Regeln befolgt ein Star bei der Schwarmformation in der Luft? Wie findet ein Schleimpilz den kürzesten Weg zwischen zwei Nahrungsquellen? Natürlich sind diese Verhaltensweisen gerade bei einfachen Organismen überwiegend genetisch bedingt, aber durch simple Verhaltensregeln wird in der Gemeinschaft Großes erreicht – und das, obwohl die einzelnen Mitglieder der Gemeinschaft von den größeren Zielen nichts wissen können (und auch nicht müssen), selbst nicht, wenn sie wie die Bienenkönigin einen hohen Rang bekleiden. Auch wenn soziale Insekten wie Bienen, Wespen, Ameisen oder Termiten ein Paradebeispiel für Schwarmintelligenz darstellen, weil bei ihnen die Diskrepanz zwischen individueller kognitiver Einfachheit und dem konzeptionellen Weitblick des Insektenstaates besonders augenfällig ist, gibt es weitere Beispiele für Schwarmintelligenz, an denen sich grundlegende Prinzipien der Kooperation untersuchen lassen.

### Ein Schwarm formiert sich

Der Zusammenschluss von Individuen zu einer Gemeinschaft kann wie bei den Insektenstaaten von Dauer sein, oder er besteht nur vorübergehend und wird durch bestimmte Umweltfaktoren ausgelöst. So löst die abnehmende Tageshelligkeit am Ende des Sommers bei vielen Vogelarten eine Zugunruhe aus, die dazu führt, dass sich Einzeltiere zusammenfinden und einen Vogelschwarm bilden (Abbildung 1), der bald darauf zu den Überwinterungsgebieten im Süden zieht (siehe „Das Navigationssystem der Vögel“, *BiuZ* 2/2021 und 3/2021). Die neue Formation bietet dabei mehrere Vorteile: Zum einen erleichtert das Hintereinanderfliegen das Vorwärtkommen, so wie der Windschatten eines LKWs auch dem nachfolgenden Fahrzeug Benzin sparen hilft. Zum anderen kann ein Vogelschwarm auch auf Bedrohung durch Räuber aus der Luft (z. B. Falken) reagieren und die Überlebenschance der Mitglieder verbessern. Zu diesem Zweck fliegen die Beutevögel dichter aneinander, so dass der Räuber eingeschlossen wird und nicht mehr so gut manövrieren kann.

Beim Schleimpilz *Dictyostelium discoideum* ist es die Nahrungsknappheit, die zur Schwarmbildung führt [2]. Solange ausreichend Nahrung vorhanden ist, lebt *D. discoideum* als Einzeller mit amöbenartigem Aussehen im Boden, wo er sich von Bakterien ernährt. Beginnen die Nährstoffressourcen aber zu schwinden, geben die Einzeller cAMP

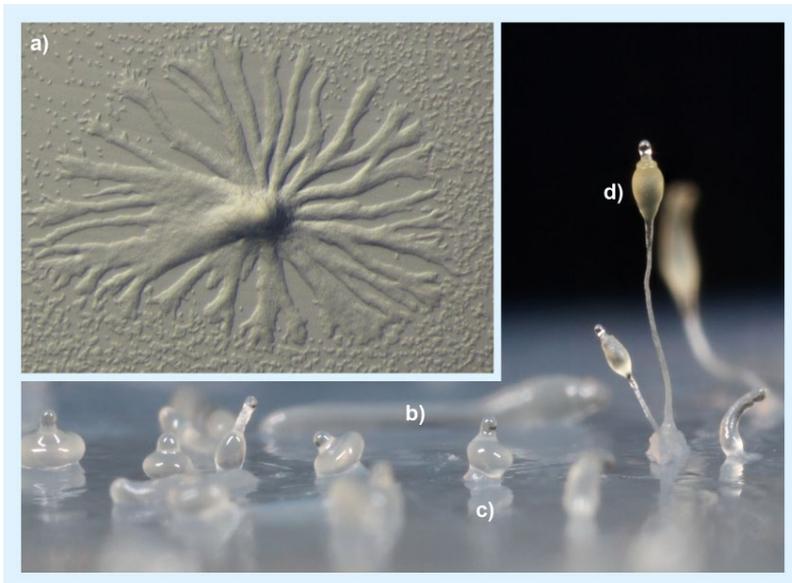


**ABB. 1** Auffliegende Stare (*Sturnus vulgaris*) formieren sich über Rom kurzzeitig zu einem Superorganismus. Foto: Greg Seed auf [www.pixabay.com](http://www.pixabay.com).

als Signalstoff in ihre Umgebung ab und locken dadurch tausende, gleichartige Zellen aus der Nachbarschaft an, die dann zu einem wurmartigen Gebilde verschmelzen (Abbildung 2). Die Gemeinschaft der sozialen Amöben kann sich gemeinsam in eine Richtung bewegen und bereitet

### IN KÜRZE

- Schwärme, Herden oder Staaten **zeigen intelligentes Verhalten**, das von keinem seiner Mitglieder alleine stammen kann. Übergeordnete Konzepte zur Kommunikation, Logistik oder Fortpflanzung entstammen vielmehr einem „Superorganismus“.
- Die Vernetzung vieler Individuen **zu einem übergeordneten System** findet sich mehrfach auf zellulärer bis organischer Ebene und führt zu synergistischen Effekten: „Das Ganze ist mehr als die Summe der Einzelteile“.
- Auch Informatiker interessieren sich für die **Regeln in biologischen Netzwerken**, um technische Systeme zu schaffen, die Optimierungsaufgaben schneller lösen können.



**ABB. 2** Verschiedene Stadien einer *D. discoideum*-Kolonie. a) Aggregation der Einzelzellen, b) Migrationsphase (im Bildhintergrund), c) Anheftungsphase mit austreibendem Fruchtkörper, d) fertige Sporenträger. Foto: a) AG Rupert Mutzel, FU Berlin, b–d) Usman Bashir.

eine Metamorphose vor. Das mehrzellige Gebilde setzt sich fest, und es erwächst ein Fruchtkörper daraus, an dessen Spitze sich einige Zellen zu Dauersporen differenzieren. Diese tragen die nächste Generation in sich und können meist im nächsten Frühjahr wieder auskeimen. Die Schwarmbildung dient zwar hier primär der Fortpflanzung, aber sie zeigt auch die wichtigste Komponente einer erfolgreichen Gemeinschaft: Kommunikation.

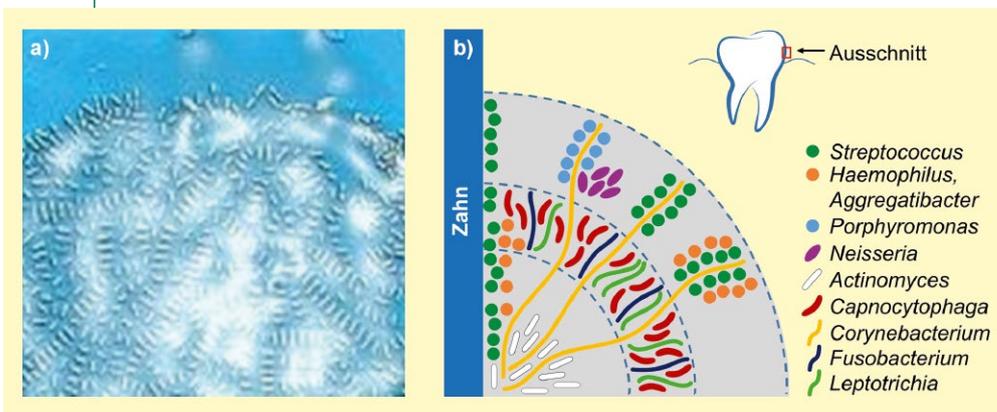
Schon bei den Prokaryoten gilt, dass Gemeinschaft stark macht. Auch hier ist ein Austausch von Signalstoffen für den Zusammenschluss von Einzellern verantwortlich. Manche Arten können die Anwesenheit artgleicher Zellen wahrnehmen und bei genügend hoher Zelldichte ihr Ver-

halten ändern, so dass beispielsweise Virulenzfaktoren ausgeschüttet werden oder die Biolumineszenz eingeschaltet wird (siehe „Small Talk“, *BiuZ* 6/2020). Auch Zellen unterschiedlicher Art können zu einer Gemeinschaft heranwachsen, die einen Schutz gegen störende Umwelteinflüsse bietet – sie bilden einen Biofilm. Zu Beginn erfolgt eine Anheftung der Zellen an das Substrat mithilfe von Adhäsionsmolekülen, woraufhin alle Bakterien eine extrazelluläre Matrix aus Polysacchariden bilden. Diese Schicht schützt die Zellen vor mechanischem Abrieb, UV-Strahlung, und chemischen Störfaktoren wie Giften und pH-Änderungen. Es können sogar Zonen entstehen, die unterschiedlich viel Sauerstoff enthalten und damit das Wachstum von aerotoleranten und anaeroben Mikroben gleichzeitig am selben Standort, beispielsweise im Zahnbelag, erlauben [3] (Abbildung 3). Insgesamt verringert sich dadurch die relative Oberfläche zwischen Organismus und Umwelt: Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen einer kleinen Zelle ist groß und wird durch den Zusammenschluss in der gemeinsamen Matrix verkleinert. Die Biofilme sind also eine Folge der „Schwarmbildung“ und bedeuten für die daran beteiligten Zellen einen Effizienzgewinn. Wenn viele Bakterien gemeinsam den Biofilm produzieren, kann jede Zelle für sich Material und Stoffwechselenergie einsparen.

### Ein Schwarm braucht Regeln

Die Schwarmmitglieder müssen aber nicht nur miteinander kommunizieren, sondern sie müssen sich auch bestimmten Regeln unterwerfen. Je einfacher diese sind, desto besser können die Superorganismen funktionieren. Die Schwarmleistungen entstehen also infolge der Selbstorganisation seiner Mitglieder. Neben den Insektenstaaten gibt es gut untersuchte Beispiele bei Fischen wie den Dorschen. Diese sind in Nordsee und Atlantik verbreitet, wo sie zeitweise in großen Schwärmen anzutreffen sind. Die Bewegungen der Dorschformationen können einem Ziel zustreben oder stationär – also kreisförmig – sein. Natürlich erfolgt jede Richtungsänderung berührungslos, da die Tiere über ihr Seitenliniensystem die Bewegung ihres Nachbarn wahrnehmen. Zwei Regeln beherrschen dabei die Bewegung der Einzeltiere: 1. „Folge Deinem Vordermann“, 2. „Sei so schnell wie Dein Nachbar“. Natürlich muss es einige Leitfische geben. Wie viele für die Steuerung des Schwarms notwendig sind, haben die Biologen Jens Krause und John Dyer von der Universität Leeds mit ferngesteuerten Roboterfischen untersucht [4] (Abbildung 4). Wie die Experimente zeigen, reicht es, wenn fünf von hundert Tieren die Richtung vorgeben.

**ABB. 3** | BAKTERIELLE SUPERORGANISMEN



a) Bakterienaggregation mit extrazellulärer Matrix, b) Querschnitt durch Zahnbelag, der eine Vielzahl kooperierender Bakterienarten enthalten kann. Innen leben Anaerobier, außen die aerotoleranten Mikroben. Foto: verändert nach helmhotz\_hzi.de, Grafik: P. Eitner, verändert nach [3]).

Im März 2007 wurde in Zusammenarbeit mit Krause und Dyer ein ähnliches Experiment vom Westdeutschen Rundfunk mit Menschen durchgeführt. Die Wissenschaftsredaktion von „Quarks & Co“ bat dazu 300 Freiwillige im Alter zwischen 18 und 70 Jahren in eine große Halle, wo alle Teilnehmer von oben gefilmt werden konnten. Damit die individuellen Bewegungen beobachtet werden konnten, trugen die Probanden Kappen mit farbigen Markierungen auf dem Kopf. Zwei Vorgaben sollten befolgt werden: „Bleibe in Bewegung“ und „Halte den Abstand zum Nachbarn“. Kommunikation musste unterbleiben. Nachdem die Probanden anfangs zufällig über die Halle verteilt waren, kam es schnell zur gemeinsamen Bewegung. Ohne Ziel entstand eine stationäre Variante („der Kreis“), während das Kollektiv innerhalb von einer Minute an ein vorgegebenes Ziel kam, von dem nur 20 Freiwillige wussten. Wie bei den Dorschen galt: Über 5 Prozent können sich nicht irren!

Bei Stichlingen (Familie *Gasterosteidae*) sind die Regeln erweitert. Untersuchungen von Iain Couzin von der Universität Konstanz zeigen, wie es eine Gruppe von Stichlingen in einem Gewässer sehr schnell schafft, schattige Bereiche aufzufinden, die sie vor Räubern wie dem Hecht schützen. Sucht jeder Fisch für sich, kann es lange dauern, bis der rettende Schatten gefunden ist. Ein Schwarm Stichlinge ist dabei viel schneller. Während sich der Schwarm durch das Wasser bewegt, kann er am Rand der Gemeinschaft einen schattigen Bereich streifen, der z. B. durch Wasserpflanzen oder überhängende Baumzweige entsteht. Blitzschnell schwenken dann alle Fische um, so dass keiner mehr direkt vom Sonnenlicht beleuchtet wird. Indem die Wissenschaftler um Iain Couzin die Tiere einzeln mittels Barcoding markiert und ihre Bewegung mittels Videotracking dokumentiert hatten, konnte der Mechanismus aufgeklärt werden [5] (Abbildung 5). Die Analyse ergab, dass die Fische im Schatten schnell abbremsten. Da die anderen im Sonnenlicht aber mit geringer Zeitverzögerung im gleichen Maße ihre Geschwindigkeit verringerten, ergab sich eine Kurvenbewegung zum Schatten hin, der den ganzen Schwarm miteinbezog. Die Empfindlichkeit des Seitenlinienorgans war also groß genug, um die Druckänderung, die sich durch den veränderten Abstand zum Nachbarfisch ergab, sofort in eine Abbremsung zu übersetzen. Die Regel „Bleibe bei Deinem Nachbarn“ wirkte den Verhaltensforschern zufolge wie eine unsichtbare Feder, die die Stichlinge im Schwarm miteinander verband.

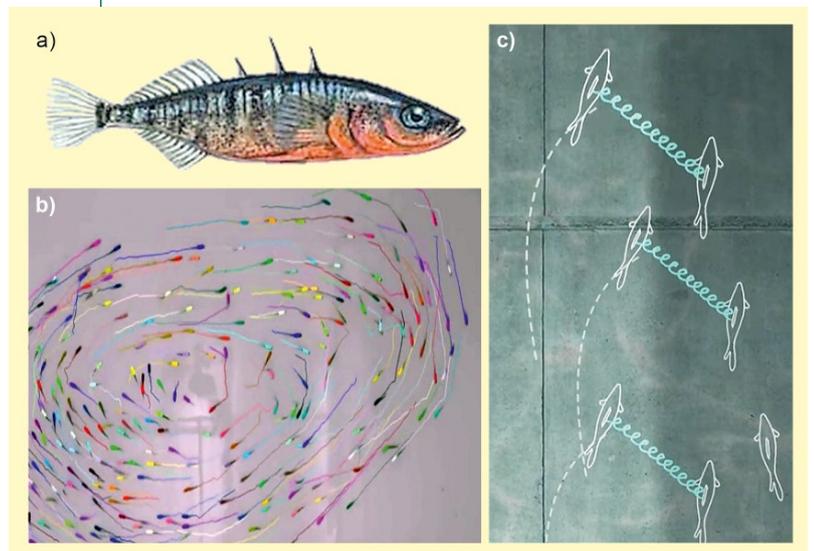
### Ein Schwarm bilanziert

Neben dem schnellen Reaktionsvermögen eines Superorganismus verblüfft vor allem seine Fähigkeit, intelligente Konzepte zur Kosten-Nutzen-Rechnung zu entwickeln – und das auf einer Ebene, die ein Individuum niemals erreichen würde. Wieder bieten Insektenstaaten mit ihrer Verwandtenselektion ein Musterbeispiel für die Bilanzierung. Indem eine Arbeiterin auf eigenen Nachwuchs ver-



**ABB. 4** Ein Schwarm der Stachelmakrele *Caranx lugubris* beeindruckt durch koordinierte Bewegungen und Schnelligkeit. Nur etwa 5 Prozent der Tiere lenken den Schwarm ohne es zu wissen – die anderen folgen. Foto: Anna Varona.

### ABB. 5 | SCHWARMLEISTUNG BEI STICHLINGEN



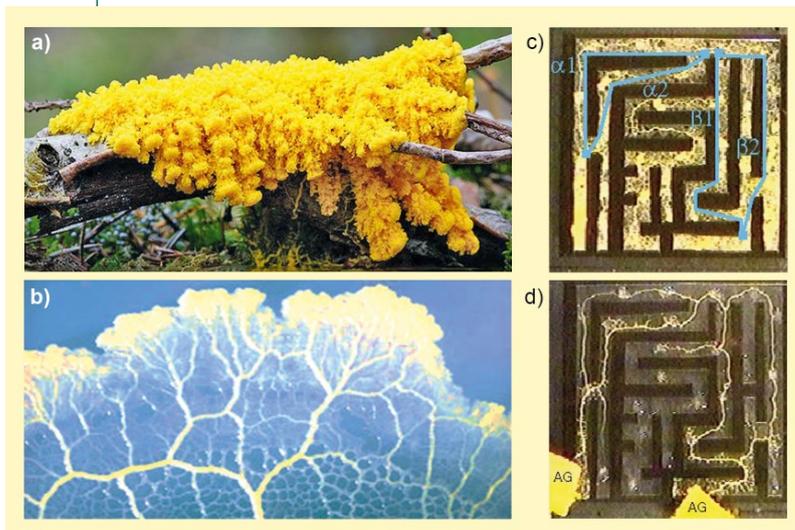
**a) Dreistacheliger Stichling (*Gasterosteus aculeatus*), b) Momentaufnahme der individuellen Bewegungsmuster im Schwarm, c) Modell der Kopplung zwischen den Einzeltieren beim Aufspüren von Schatten.** Zeichnung: latvijasdaba.lv, Grafiken: Iain Couzin.

zichtet und ihren Schwestern hilft, kann sie ihren Genen besser zur Durchsetzung verhelfen. Aufgrund der besonderen Geschlechtsbestimmung bei Hautflüglern sind Arbeiterinnen enger miteinander verwandt, als dies mit ihren eigenen Nachkommen jemals der Fall sein könnte. Je

**ABB. 6** Eine große Sanitär-ameise (*Megaponera analis*) trägt eine verletzte Arbeiterin zur Genesung ins Nest zurück.  
Foto: Erik Frank.

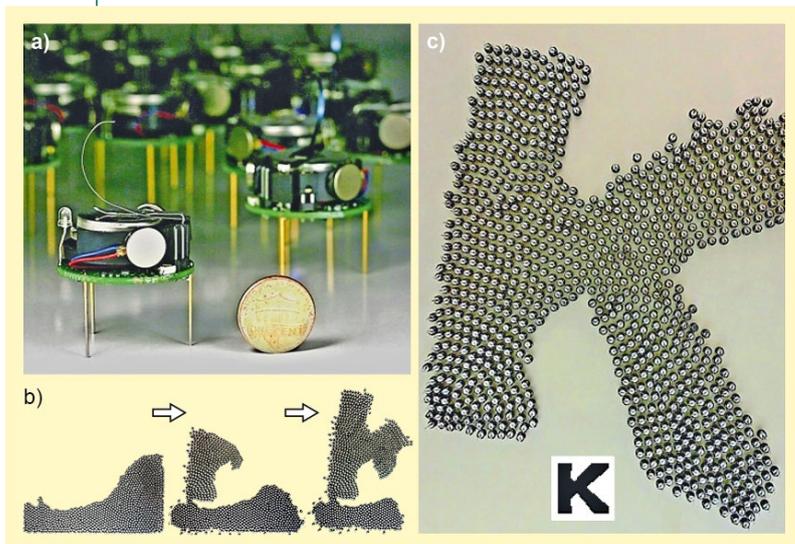


**ABB. 7 | INTELLIGENZ OHNE GEHIRN**



**a)** Der Schleimpilz *Physarum polycephalum* in seiner natürlichen Umgebung, **b)** Plasmodium-Front, die durch Plasmaströmung ständig ihre Form verändert. **c)** In einem Labyrinth findet das Plasmodium die kürzeste Strecke (blau) zwischen zwei Nahrungsquellen, **d)** selbstoptimiertes Plasmodium. Fotos: a) Urmas Tartes, b) Carolina Biological Supplies Company, c, d) Toshiyuki Nakagaki.

**ABB. 8 | KÜNSTLICHE SCHWARMINTELLIGENZ**



**a)** Kilobots sind kleine Laufroboter, die über IR-Funk miteinander kommunizieren. **b)** Die Bildung eines vorgegebenen Musters erfolgt durch Selbstorganisation. **c)** Das Resultat und die Vorgabe. Fotos: Michael Rubenstein (Harvard University).

enger der Verwandtschaftsgrad ist, desto größer ist der Nutzen der gegenseitigen Unterstützung für die reproduktive Fitness. Die von William D. Hamilton gefundene Regel besagt, dass Lebewesen ihre Verwandten unterstützen, wenn „die Kosten dieser Unterstützung kleiner sind als Verwandtschaftsgrad mal Nutzen für die anderen“.

Das Beispiel der sogenannten Sanitärameisen (*Megaponera analis*, Abbildung 6) zeigt, wie präzise die Kosten-Nutzen-Rechnung funktioniert, ohne dass irgendeine Gruppe von Individuen sie kennen kann. *Megaponera*-Ameisen überfallen Termiten und bringen sie als proteinreiche Nahrung in ihr Nest. Da sich die überfallenen Völker heftig zur Wehr setzen, werden bei jedem Raubzug auch angreifende *Megaponera*-Ameisen verletzt – im Schnitt fast ein Drittel. Die verletzten Tiere werden von „Sanitärerinnen“, besonders großen Artgenossinnen, inspiziert und zur Krankenpflege zurück in den heimischen Bau transportiert. Aber eben nicht immer! Erik Frank, Karl Eduard Linsenmair und ihre Kollegen vom Biozentrum der Universität Würzburg fanden heraus, dass die Sanitärer ihre Krankentransporte mit Kalkül planen [6]. Hoffnungslose Fälle werden liegen gelassen. Gerettet wird nur, wenn Verletzungen nicht zu schwer sind, so dass die Patienten bald wieder einsatzbereit sind. Solange die Verletzten nur ein bis zwei Beine verloren haben, können sie teilweise schon eine Stunde später wieder an Raubzügen teilnehmen.

Auch beim Schleimpilz *Physarum polycephalum* ist man versucht, planerisches Handeln zu unterstellen, wenn sich dieser erstaunliche Organismus durch ein Labyrinth arbeitet, und dabei den kürzesten Weg zwischen zwei Futterquellen außerhalb des Labyrinths findet [7, 8]. Mit seinen Ausläufern erkundet der einzellige, aber vielkernige Organismus das Terrain und erhält nur solche Teile seines verzweigten Körpers aufrecht, die eine optimale, weil effiziente Versorgung, ermöglichen (Abbildung 7). Alle anderen Fortsätze werden nach kurzer Zeit wieder eingeschmolzen und zurück ins Kollektiv (Plasmodium) geholt. Mit dieser Methode löst *P. polycephalum* so schwierige Aufgaben wie die optimale Verbindung zwischen einer Vielzahl von Punkten. Der entstehende Zellkörper erinnert an ein Eisenbahnnetz, das verschiedene Städte miteinander verbindet.

**Das Wissen der Vielen**

Längst haben Informatiker die Schwarmintelligenz für sich entdeckt und die Prinzipien auf technische Systeme übertragen. Drei Begriffe prägen deren wertvolle Eigenschaften: Selbstorganisation, Robustheit und Adaptivität. Als Selbstorganisation bezeichnet man eine verteilte Problemlösung durch dezentrale Koordination, also dass Entscheidungsprozesse von vielen kleinen Einheiten getragen werden, die keine Hierarchie aufweisen. Es gibt keinen „Chef“. Die Robustheit bedeutet, dass das Gruppenziel erreicht wird, auch wenn einzelne Mitglieder dies nicht schaffen. Kollektive Ziele werden also nicht gefährdet,

wenn einzelne Individuen versagen. Und Adaptivität heißt in der Informatik, dass die Systeme dynamische Reaktionen erlauben – sie können sich schnell anpassen. Diese Eigenschaften sind typisch für Netzwerke, die man mit Superorganismen vergleichen kann. Die Simulation eines Schwarmes mithilfe winziger autonomer Laufroboter („Kilobots“), die über Funk miteinander kommunizieren, zeigt, wie leistungsfähig so eine Gemeinschaft sein kann. In kurzer Zeit können vorgegebene Formen entstehen, indem sich alle Laufroboter an einen bestimmten Platz bewegen, der sich aus der Interaktion mit den jeweils anderen ergibt – ohne dass eine zentrale Planungsinstanz das ganze überwacht und koordiniert (Abbildung 8). Was aber nach Spielerei anmutet, verfolgt einen tieferen Zweck. Bewährte Rechenverfahren (Algorithmen) solcher Simulationen lassen sich für technische Systeme gewinnbringend nutzen [9].

Zwei Algorithmen wurden schon nach ihren biologischen Vorbildern benannt. Der sogenannte Bienen-Algorithmus kommt beim „Scheduling“ von Internetservern zum Einsatz. Dabei werden Anfragen aus dem Internet so auf eine Gruppe von Servern verteilt, dass alle Server möglichst gleich ausgelastet sind und sich die Wartezeiten minimieren. Der Ameisen-Algorithmus dient dagegen zur Lösung von anderen Optimierungsfragen („Problem des Handlungsreisenden“): Wie verläuft der kürzeste Weg, mit dem vorgegebene Orte verbunden werden? So wie Ameisen die kürzeste Verbindung zwischen Futterquelle und Nest finden, arbeitet auch der Ameisen-Algorithmus. Indem der beste Weg von den meisten „Agenten“ benutzt und markiert wird, rekrutiert diese Route noch mehr „Agenten“, bis Nebenrouten verschwunden sind. Nach diesem Schema werden beispielsweise die besten Routen für Busse, Müllabfuhr und andere Transportaufgaben gefunden.

### Die Emergenz kommt unverhofft

Dem griechischen Gelehrten Aristoteles (384–322 v. Chr.) wird die Erkenntnis zugeschrieben, dass „das Ganze mehr ist als die Summe der Einzelteile“. Ein vernetztes System weist häufig Eigenschaften auf, die über die bekannten hinausgehen – sozusagen als Bonus oder Emergenz. Betrachtet man zum Beispiel ein Waldhorn (Abbildung 9),

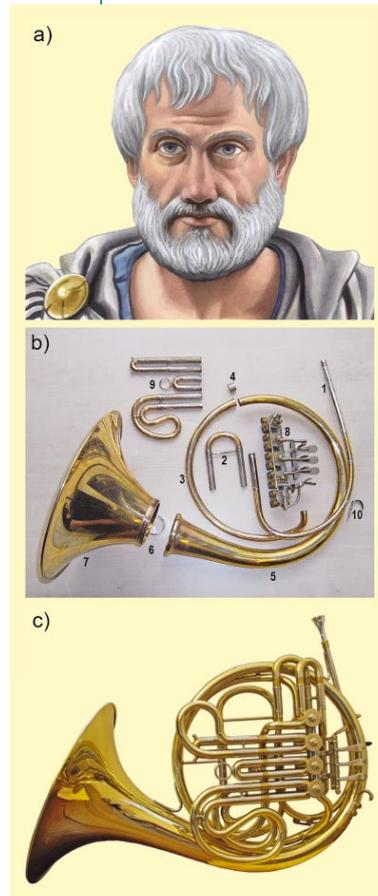
erkennt man den Wert der Vernetzung. Unverbunden stellen die Einzelteile allerhöchstens eine Ansammlung von hübschen Blechstücken dar. Erst durch die sinnvolle Verknüpfung der Einzelteile entsteht ein Instrument, das Klänge erzeugen kann. Die Fähigkeit zur Musikerzeugung ist also eine emergente Eigenschaft, die sich aus der Verknüpfung ergibt. Gerade bei biologischen Systemen finden sich immer wieder Emergenzen, die dazu führen, dass „das Ganze mehr ist als die Summe der Einzelteile“.

So kommt es durch die Verknüpfung der beiden Fotosysteme I und II in der Thylakoidmembran der Chloroplasten zum sogenannten Emerson-Effekt. Indem man die Fotosysteme über die passende Wellenlänge (680 nm oder 700 nm) getrennt anregt, kann die Wirkung auf die Photosyntheserate für jedes Fotosystem einzeln bestimmt werden. Bei gleichzeitiger Anregung beobachtet man aber eine unerwartete Steigerung der Photosyntheserate, die auf den verbesserten Elektronenfluss zwischen den Komponenten zurückzuführen ist. Auf zellulärer Ebene sind weitere Emergenzen zu beobachten, die mit zunehmender Vernetzung von Komponenten einhergehen. Die Entstehung der Mitochondrien aus einer anfänglichen Endosymbiose hat in ihrer Folge nicht nur eine ungeahnte Formenvielfalt höherer Organismen gefördert, sondern auch als Emergenz ganz neue Prinzipien hervorgebracht [10]. Sterblichkeit und Sexualität sind Phänomene, die bei Eukaryonten zum normalen Lebenszyklus gehören, während sie bei Prokaryonten keine vergleichbare Rolle spielen.

Synergistische Effekte oder Emergenzen lassen sich auf vielen Ebenen finden. Symbiosepartner sind zusammen produktiver als die Summe der

Einzelproduktivitäten erwarten lässt. Beim Cyanobakterium *Anabaena*, das mit dem Algenfarn *Azolla* eng vergesellschaftet ist, steigt die Stickstofffixierung zum Beispiel um den Faktor 4 bis 20 gegenüber isolierten *Anabaena*-Zellen. Verbinden sich gleichartige Zellen zu einer Kolonie, kann sich daraus aufgrund der entstehenden Arbeitsteilung ein neues Organ oder sogar ein neuer Organismus entwickeln. Vielzelligkeit ist nicht nur eine Frage der Quantität, sondern bedeutet immer auch eine neue Ebene der Komplexität. Vielleicht kann man auch die Entstehung von Bewusstsein als ein emergentes Phänomen

**ABB. 9 | EMERGENZ**



**a) Aristoteles erkannte: „Das Ganze ist mehr als die Summe der Einzelteile“.**  
**b) Bestandteile eines Waldhorns.**  
**c) Durch die Verknüpfung entsteht ein Musikinstrument.** Grafik: César Ibarra, Fotos: Wikipedia.

begreifen, das durch die Verknüpfung und zunehmende Komplexität von unzähligen Nervenzellen langsam entsteht. Das Gehirn wäre dann eine Gemeinschaft von Neuronen und Gliazellen, die zusammen eine neue Stufe der Schwarmintelligenz beschreiten.

### Zusammenfassung

Intelligentes Verhalten ist ein Phänomen, das sich bei Gemeinschaften gleichartiger Individuen finden lässt, obwohl kein Mitglied alleine über diese Eigenschaft verfügt. Dieses als Schwarmintelligenz bezeichnete Phänomen findet sich in unterschiedlichem Maße bei Insektenstaaten, Vogelschwärmen und Fischschulen, aber auch bei Schleimpilzen oder Bakterienfilmen. Auslöser für die Schwarmbildung können schwieriger werdende Umweltbedingungen wie Nahrungsmangel sein. Stabilisiert werden die neuen Gemeinschaften oder Superorganismen durch intensive Kommunikation zwischen den Mitgliedern. Die Leistungen des Kollektivs beruhen teilweise auf wenigen einfachen Regeln, die von Informatikern aufgegriffen und in spezielle Algorithmen mit technischen Anwendungen umgeformt werden. Diese Form der künstlichen Intelligenz hilft bei vielen Optimierungsaufgaben in der Logistik von Daten und Gütern. Auffällig ist, dass durch die Vernetzung der Einheiten eines biologischen Systems nicht nur mehr Komplexität generiert wird, sondern dass auch synergistische Effekte deutlich werden: Das Ganze ist mehr als die Summe der Einzelteile.

### Summary

#### Swarm intelligence: accessing a higher level of intelligence and performance by networking

Intelligent behaviour is a phenomenon which is found within communities of individuals of the same species, although this is unknown to the individual agent. The so-called swarm intelligence is found in different degrees in insect colonies, flocks of birds, shoaling fish but also in slime moulds or bacterial films. Swarm aggregation can be triggered by increasingly difficult environmental conditions, e.g. lack of food. The new communities or superorganisms are stabilized by intensive communication among the members. The collective performance is partially due to a set of

simple rules, which computer scientists use to create suitable algorithms for technical applications. This form of artificial intelligence helps to solve optimizing tasks for the efficient logistical processing of data and goods. It is striking that crosslinking the units of a biological system not only generates more complexity but also results in unprecedented synergistic effects: The entire system is more than the sum of the parts.

### Schlagworte

Schwarmintelligenz, Superorganismus, Selbstorganisation, Vernetzung, Emergenz.

### Literatur

- [1] J. Tautz (2008). Der Bien – ein Säugetier mit vielen Körpern. Superorganismus Bienenstaat, *BiuZ* 38/1, 22–29.
- [2] P. Gaudet et al. (2008). An anatomy ontology to represent biological knowledge in *Dictyostelium discoideum*, *BMC Genomics* 9, 130.
- [3] J. L. M. Welch et al. (2016). Biogeography of a human oral microbiome at the micron scale, *PNAS*, E791–E800.
- [4] A. J. W. Ward et al. (2008). Quorum decision-making facilitates information transfer in fish shoals, *PNAS*, 105, 6948–6953.
- [5] I. D. Couzin et al. (2005). Effective leadership and decision-making in animal groups on the move, *Nature*, 433: 513–516.
- [6] E. T. Frank et al. (2017). Saving the injured: Rescuing behavior in the termite-hunting ant *Megaponera analis*, *Science Advances* 3, 4.
- [7] T. Nakagaki et al. (2000). Intelligence: Maze-solving by an amoeboid organism, *Nature*, 407, 470.
- [8] J. Smith-Ferguson et al. (2021). Experience shapes future foraging decisions in a brainless organism, *Adaptive Behaviour*, <https://doi.org/10.1177/1059712321994684>
- [9] M. Dorigo, T. Stützle (2004). *Ant Colony Optimization*, MIT Press Bradford Books, Cambridge MA.
- [10] N. Lane (2017). *Funke des Lebens*, Theiss-Verlag.

### Verfasst von:



Pascal Eitner, Jahrgang 1966, Studium der Biologie an der Universität Bonn, Promotion in Neurobiologie, seit 2009 Lehrer für Biologie und Physik am staatlichen Gymnasium in Puchheim bei München.

#### Korrespondenz:

Dr. Pascal Eitner  
Gernlindener Straße 8  
82216 Maisach  
E-Mail: [pascal-eitner@arcor.de](mailto:pascal-eitner@arcor.de)



Verband | Biologie, Biowissenschaften  
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM  
FÜR DIE**

**BIEWISSENSCHAFTEN**

### **Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:**

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie



[www.vbio.de](http://www.vbio.de)

**Jetzt beitreten!**

