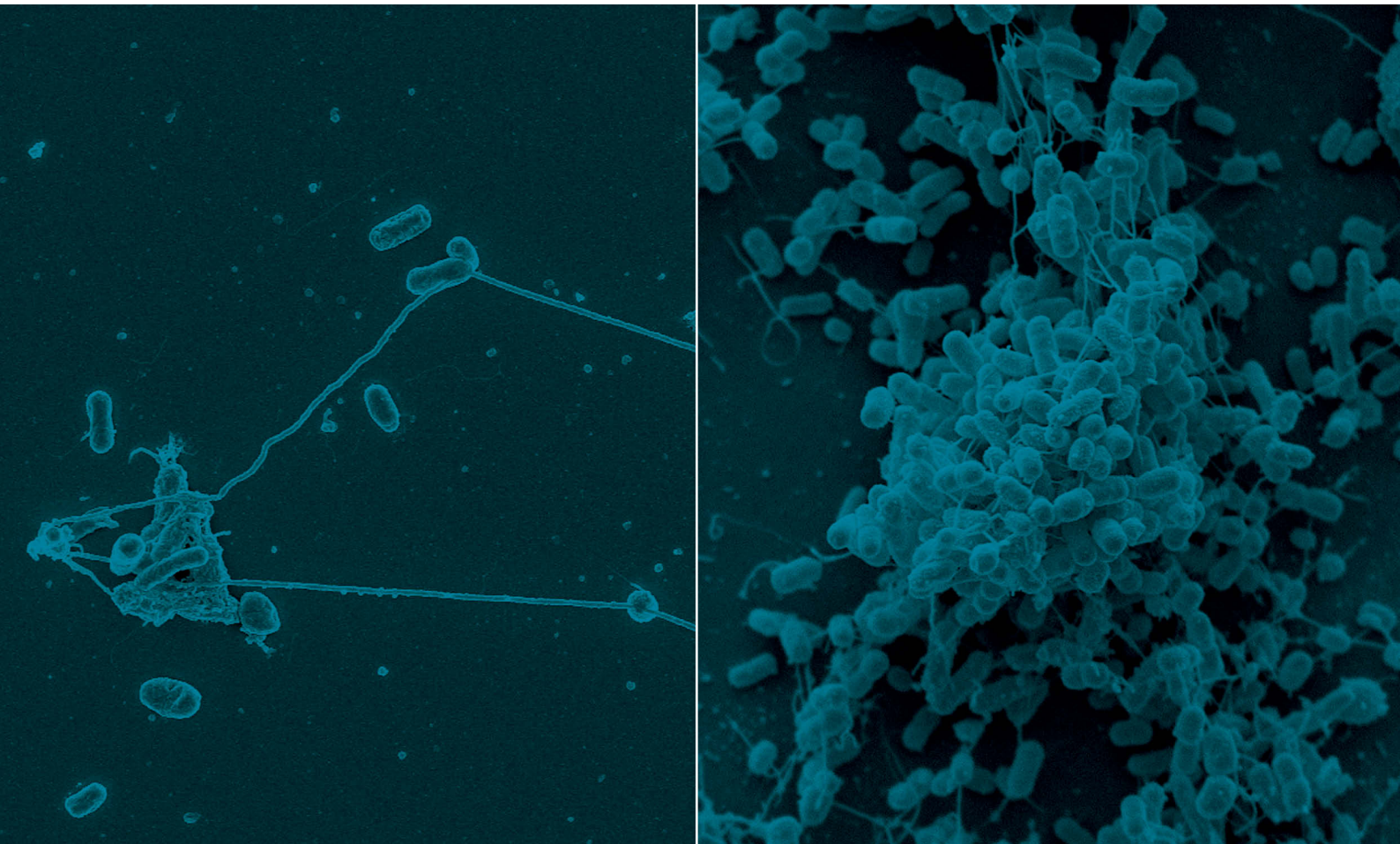




Bakterien brauchen Partner

Bakterien sind Individuen, die immer autonom funktionieren?
Falsch, sagt **Christian Kost** vom **Max-Planck-Institut für chemische Ökologie** in Jena. Seiner Meinung nach sind Bakterien vielmehr Organismen, die oft gar nicht anders können als zu kooperieren. Das Team zeigt das mithilfe trickreicher Experimente.

TEXT **KLAUS WILHELM**



Mein erster Gedanke, als ich es gesehen habe? Ich dachte, wir haben einen Fehler gemacht.“ Shraddha Shitut, Doktorandin am Jenaer Max-Planck-Institut für chemische Ökologie, schaut Christian Kost an und lacht. Der Biologe wiederum, Leiter der Forschergruppe Experimentelle Ökologie und Evolution und damit ihr Chef, war sich „sofort sicher, dass alles richtig gelaufen ist und wir etwas fundamental Neues entdeckt haben“.

Trotzdem hat Shraddha Shitut das Experiment in den nächsten Tagen zusammen mit ihren Kollegen Lisa Freund und Samay Pande wiederholt. Und dann noch mal. „Aber“, sagt sie, „wir haben immer das gleiche Bild im Elektronenmikroskop gesehen.“ Das Instrument, das selbst die winzigsten, milli-

Vernetzte Bakterien: Die elektronenmikroskopische Aufnahme macht die schlauchartigen Verbindungen zwischen genetisch veränderten *Escherichia coli*- und *Acinetobacter baylyi*-Bakterien sichtbar, über welche die Zellen Aminosäuren miteinander austauschen.

onstel Millimeter kleinen Strukturen für unser Auge sichtbar macht, zeigte Kanäle – Nanoröhren genannt, die zwei Bakterien miteinander verbinden.

NANOKANÄLE FÜR DEN TRANSPORT VON NÄHRSTOFFEN

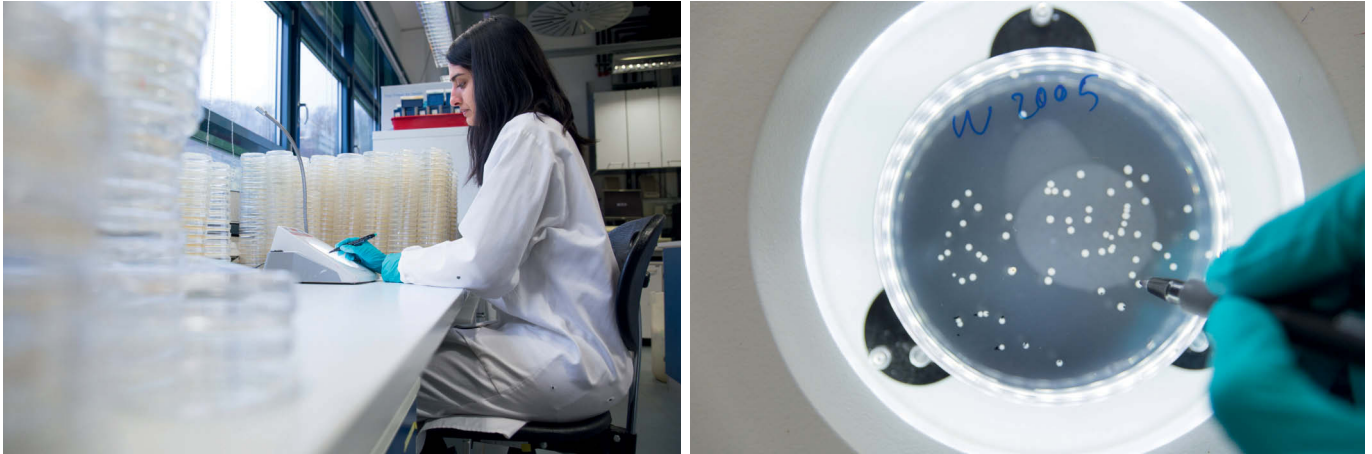
Über diese Kanäle tauschen die Bakterien bestimmte Nährstoffe aus, die der jeweilige Partner nicht mehr selbst herstellen kann – aber unbedingt braucht. Ohne die fehlenden Aminosäuren würden beide Partner sterben. „Die hängen buchstäblich aneinander“, sagt Kost, „sie sind voneinander abhängig.“

„Ich glaube an meine Mitarbeiter, sonst wäre ich verloren“, sagt Christian

Kost. Er ist ein Teamplayer – und beschäftigt sich auch beruflich mit dem Thema. Denn der Forscher untersucht das Sozialleben und die Kooperation von Bakterien. Sozialleben von Bakterien? Was einem Laien zunächst seltsam erscheint, bedeutet für Kost den Schlüssel für das Leben in Gruppen schlechthin.

Wenn der Forscher davon redet, tut er das mit Leidenschaft und Überzeugung für die These, belegt durch seine so kontrollierten wie trickreichen Experimente: „Man ist immer besser dran, wenn man kooperiert, als wenn man für sich allein lebt“, sagt er. Immer? Kurze Überlegung. „Fast immer! Und das gilt für alle Organismen, von Bakterien bis hin zum Menschen.“ >





- | | |
|-------------|--|
| Linke Seite | Für verlässliche Daten müssen die Forscher ihre Experimente mehrfach wiederholen und verschiedene Zelltypen auf unterschiedlichen Kulturschalen wachsen lassen. Die Folge: ein Gebirge aus Petrischalen. |
| Oben | Shraddha Shitut (links) zählt die Bakterienkolonien (rechts), die in den Kulturschalen gewachsen sind. Daran kann sie erkennen, wie erfolgreich sich Bakterien vermehrt haben. |

Der 40-jährige Wissenschaftler stellt lieb gewonnene Prinzipien infrage. „Im Normalfall“, sagt er entgegen üblichen Lehrbuchthesen, „sind Bakterien Organismen, die gar nicht anders können als zu kooperieren.“ Das Konzept, wonach Bakterien immer autonom funktionieren, ist seiner Ansicht nach falsch.

FORTPFLANZUNG IM EILTEMPO

Kost ist Evolutionsbiologe. Er denkt also in jenen Mustern und Prinzipien, die seit Charles Darwin die wissenschaftliche Disziplin des Lebens prägen. Das bedeutet, seine Thesen müssen der grundsätzlichsten Annahme der Evolutionstheorie standhalten: dass sich Organismen mit der Eigenschaft Kooperationsfähigkeit zahlreicher vermehren als egoistische. Dies experimentell hieb- und stichfest zu

belegen gilt unter den natürlichen Lebensbedingungen der Bakterien als technisch kaum machbar.

Im Labor allerdings, so die Überlegung des Biologen, sollten sich evolutionäre Prozesse hin zu Kooperationen nachahmen lassen: „Evolution live erleben zu können und wissenschaftlich zu verfolgen, und das innerhalb weniger Tage bis Wochen – das fasziniert mich“, sagt er. Möglich sind solche Experimente, weil sich manche Bakterienarten alle 20 Minuten teilen – also sehr schnell Nachkommen erzeugen. Darüber hinaus lassen sich einzelne Gene binnen eines Tages gezielt ausschalten und die Umweltbedingungen der Mikroben nach Belieben kontrollieren.

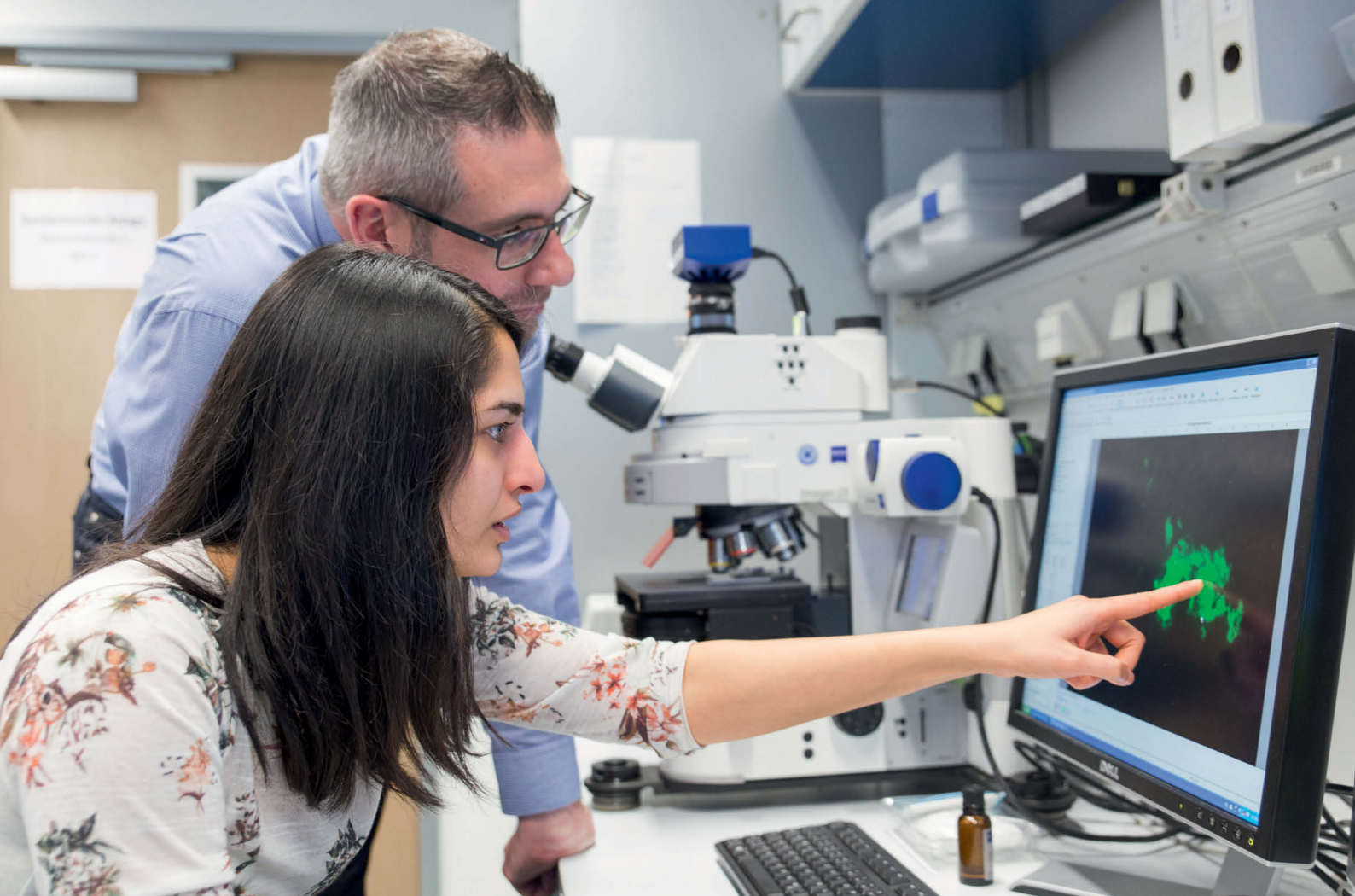
Unter diesen Voraussetzungen konzipierten die Jenaer Wissenschaftler ein Laborexperiment: Sie schalteten in dem bei Forschern beliebten Darmbakterium *Escherichia coli* ein Gen aus, das die Mikroben zur Herstellung der

lebenswichtigen Aminosäure A brauchen. Eine zweite Mutation bewirkt, dass die Bakterien mehr von der Aminosäure B bilden, als sie selbst benötigen. Eine weitere Bakteriengruppe stateten die Forscher mit Mutationen mit umgekehrten Auswirkungen aus: Die Einzeller produzierten A im Überfluss, dafür aber zu wenig B.

Die beiden Populationen setzten die Forscher dann zusammen in einem Nährmedium an und beobachteten, wie sie sich entwickelten.

KOOPERATION ZAHLT SICH AUS

Das Ergebnis: Die Bakterien starben nicht etwa, sondern vermehrten sich laut Kost um 20 Prozent schneller als *Coli*-Bakterien, die alle Aminosäuren autonom herstellen konnten. Die Doppelmutanten, die Gene verloren haben, müssen sich demnach mit den jeweils fehlenden Aminosäuren gegenseitig



versorgt haben. Die Kooperation bringt also einen Vorteil, auch im Sinne der Darwin'schen Evolution.

Langfristig sollten in bakteriellen Lebensgemeinschaften folglich jene Zellen im Nachteil sein, die alles selbst machen. Grund: Sie verbrauchen bei der vollständigen Aminosäureproduktion mehr Energie als ihre Artgenossen, die sich die Arbeit teilen. Schließlich sind Zellen von Haus aus sparsam – auch wenn dies die Freiheit eines selbstbestimmten Lebens kostet.

Aber wie tauschen die Partner ihre Nährstoffe aus? Das ist nicht unwichtig, denn wenn die Partner ihre Produkte einfach in die Umgebung entlassen, könnten auch andere davon profitieren, die selbst nichts in das gemeinsame Projekt investieren. Trittbrettfahrer, welche die Kooperation gefährden. Eine direkte Verbindung hingegen wäre ideal – eine geschlossene Pipeline, in der man sich die Nährstoffe zuschiebt.

Wieder schalteten die Forscher Gene für die Produktion bestimmter Aminosäuren aus, dieses Mal vom Bodenbak-

terium *Acinetobacter baylyi* sowie von *Escherichia coli*. Denn auch Mikroben unterschiedlicher Arten können miteinander. „Höchstwahrscheinlich ist das im Freiland sogar der Regelfall“, vermutet Kost. Resultat des Versuchs: Wurden die Bakterien gemeinsam in einem Nährmedium kultiviert, wuchsen sie, wie erwartet, bestens.

PHYSISCHER KONTAKT IST NOTWENDIG

Danach aber wurden die Partner durch einen Filter voneinander getrennt, der Aminosäuren im Nährmedium zwar passieren ließ, einen direkten Kontakt zwischen den beiden genetisch veränderten Bakterienstämmen jedoch verhinderte. Ohne Berührung konnte kein Beteiligter wachsen. „Die Partner brauchen also den direkten Kontakt, um Nährstoffe auszutauschen“, erläutert Shraddha Shitut.

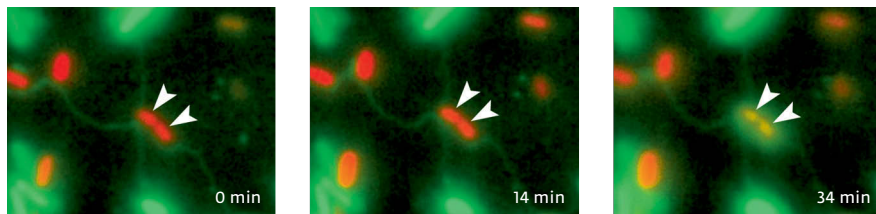
Auf Bildern der Zellen im Elektronenmikroskop hat die Wissenschaftlerin dann erkannt, dass die *Coli*-Bakte-

rien auf ihrer äußeren Hülle kleine Röhrrchen geformt hatten, die zur Hülle der *Acinetobacter*-Zellen hinüberreichten: die Nanokanäle.

Vermutlich zapft eine Zelle die andere an, um etwas abzu ziehen, der Partner kann den Kanal aber auch selbst nutzen. Für Bakterien wie *Escherichia coli*, die aktiv schwimmen können, lohnt die Ausbildung der Nanokanäle. Sobald sie eine potenzielle Versorgungsquelle „riechen“, bewegen sie sich vermutlich darauf zu und erzeugen die Röhrrchen.

Für Mikroben wie *Acinetobacter* dagegen, die nur passiv vom Fleck kommen – etwa in fließenden Flüssigkeiten –, rentiert sich die Eigenproduktion der Kanäle vermutlich nur, wenn zufällig neben ihnen eine andere Zelle liegt, die eine Nährstofflücke füllen kann.

Um ihre Ergebnisse zu prüfen, starteten die Wissenschaftler einen weiteren Versuch. Dabei fügten sie dem Nährmedium alle notwendigen Stoffe hinzu – also auch die Aminosäuren, welche die genetisch manipulierten Mikroorganis-



- Linke Seite | Ein Fluoreszenzmikroskop hilft Shradda Shitut und Christian Kost bei der Untersuchung der Nanokanäle. Ein grüner Fluoreszenzfarbstoff zeigt den Forschern, dass die Schläuche aus dem Material der Zellmembran bestehen.
- Oben | Farbstoffe enthüllen den Austausch zwischen genetisch veränderten *Acinetobacter baylyi* (rot) und *Escherichia coli* (grün). Zu Beginn des Experiments enthalten die beiden Bakterienarten noch den ursprünglich eingebrachten Farbstoff (links). Nach und nach strömt der grüne Farbstoff aus einer *Escherichia coli*-Zelle durch einen der Kanäle in eine *Acinetobacter*-Zelle (Mitte). Nach rund 30 Minuten haben sich die beiden Farbstoffe so weit miteinander vermischt, dass die Zelle gelblich erscheint (rechts).

men nicht mehr selbstständig bilden konnten. In diesem Fall stoppte die Produktion der Nanokanäle. „Die Ausbildung dieser Strukturen hängt also davon ab, wie hungrig eine Zelle ist“, sagt Christian Kost. Und wie viel Nährstoffe sie an ihre Umgebung abgeben.

NUR HUNGRIGE ZELLEN BILDEN KANÄLE

Sind ausreichend Aminosäuren abgegeben worden, dann kann auf die Winzlingskanäle verzichtet werden – und die Kooperateure holen sich einfach aus der Umwelt jene Nährstoffe in ihr Zellinneres, die sie benötigen. „Denn“, so Kost, „es verbraucht ja auch Energie, um die Kanäle auszubilden.“

Ob neben der Effizienzsteigerung auch andere Gründe für den Bau der Nanostrukturen vorliegen, etwa dass einzelne Bakterienarten andere Bakterien parasitisch anzapfen und aussaugen, müssen weitere Untersuchungen klären. Unklar ist zudem, ob die Bakterien gezielt steuern können, an wel-

che Zelle sie sich anheften, um einen möglichen Schaden durch den Partner zu vermeiden.

Christian Kost erkennt bei der Bildung der Kooperationen „ein selbstorganisierendes Prinzip“. Das lässt sich leicht beobachten, wenn man Bakterien auf einer sogenannten Agar-Platte austreicht. Agar, gewonnen aus Algen, bildet zusammen mit Zuckern einen Nährboden für Mikroorganismen.

Die Jenaer Max-Planck-Wissenschaftler haben wieder *Acinetobacter baylyi*- und *Escherichia coli*-Doppelmutanten hergestellt, die beide eine bestimmte Aminosäure brauchten und eine andere im Überfluss produzierten. Dieses Mal gaben die Bakterien die Aminosäuren aber in ihre Umgebung ab. Die beiden Partner wurden dann auf eine Agar-Platte pipettiert – zusammen mit einem auxotrophen Artgenossen, welcher zwar auch Aminosäuren zum Wachstum benötigte, sich aber nicht an deren Produktion beteiligte.

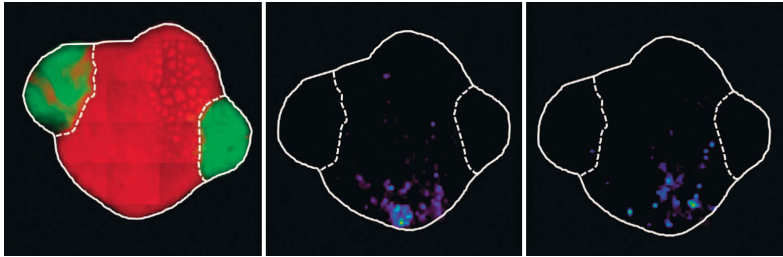
Am Anfang des Experiments sind alle Zellen bunt vermischt. Doch schon

nach 24 Stunden, sagt Kost, „sehen wir eine klare räumliche Verteilung“: Erst liegt nur ein Paar Doppelmutanten zufällig nebeneinander. Weil beide ihre überschüssigen Aminosäuren in die Umwelt abgeben, wachsen jene Zellen besser, die sich in der Nähe anderer Doppelmutanten befinden.

Halten sich zufällig Nicht-Kooperierer in der Nähe auf, ist das Wachstum kooperierender Doppelmutanten vermindert. Mit der Zeit werden die auxotrophen Eigenbrötler mehr und mehr an den Rand der Bakterienkolonie gedrängt – wie Außenseiter in einer Gesellschaft. Die räumliche Verteilung scheint das System evolutionär zu stabilisieren.

Intuitiv würde man davon ausgehen, dass das System zusammenbricht, weil die nicht kooperierenden Bakterien profitieren, selbst jedoch nichts beisteuern und die Kooperateure gewissermaßen ausbluten. „Nach unseren Ergebnissen“, so Kost, „pendelt sich aber ein stabiles Gleichgewicht ein, in dem alle Beteiligten nebeneinander existieren können.“

>



Egoistische Bakterien (grün) können lediglich am Rand von miteinander kooperierenden Bakterienkolonien (rot) existieren (links). Hohe Konzentrationen der Aminosäuren Histidin (Mitte) und Tryptophan (rechts) kommen nur in Bereichen kooperierender Bakterien vor, nicht dagegen bei den egoistischen Zellen.

Den kooperativen Partnern allerdings geht es dabei besser als den parasitischen Alleingängern. Im Grunde genommen sind alle voneinander abhängig. Freiheit im Sinne von Unabhängigkeit scheint ein höchst seltener Zustand zu sein. „Es ist nicht sinnvoll, alles selbst zu können, sondern immer besser, die Arbeit untereinander aufzuteilen“, erläutert Kost.

EVOLUTION BEGÜNSTIGT ZUSAMMENARBEIT

Für ihn erscheint das im Licht der jüngsten Forschungen fast logisch. Die treibende Kraft dahinter ist der Verlust funktionstüchtiger Gene. Genverluste sind unvermeidbar, denn die Erbanlagen mutieren ständig. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gen zerstört wird, ist dabei deutlich höher als die Wahrscheinlichkeit, dass ein neues vorteilhaftes Gen entsteht. In diesem Sinne können die Bakterien die Abhängigkeit von anderen gar nicht verhindern. Daraus entsteht dann der Zwang zur Kooperation.

„Zusammenarbeit und Arbeitsteilung ist ein mächtiges Prinzip in der Evolution“, findet Kost und erzählt, dass mittlerweile die Genome von mehr als tausend Bakterienarten entschlüsselt wurden. Bemerkenswert: Nur etwa 35 Prozent dieser Spezies, also die Minderheit, besitzen *alle* Gene, die sie zum Überleben brauchen.

„Das ist nur die Spitze des Eisbergs“, vermutet der Jenaer Biologe, „weil bisher fast nur die Genome von Arten sequenziert wurden, die sich im Labor kultivieren lassen, und das sind weniger als ein Promille.“ Offenbar fällt es Bakterien leicht, Gene loszuwerden, weil die resultierende Kooperation energetisch günstiger ist.

So erwächst in natürlichen Ökosystemen wohl eine multizelluläre Ein-

heit aus Individuen verschiedener Arten – ein buntes Netzwerk, das mehr ist als die Summe seiner Einzelteile. Nach dem Motto: Mein Nachbar, mein Lebensretter! Die Gruppe gewinnt Eigenschaften aus der Interaktion zwischen verschiedenen Bakterien. „Und je genauer wir das beleuchten, desto mehr erkennen wir das auch unter natürlichen Bedingungen“, sagt Christian Kost. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Bakterien galten lange als pure Individualisten. Sie können aber durchaus kooperieren und dadurch den Verlust von Genen ausgleichen.
- Viele Bakterien sind Teil eines Netzwerks, das sie sogar mit anderen Bakterienarten verbindet.
- Kooperation ist ein Grundprinzip des Lebens und eine Triebfeder für die Entwicklung biologischer Komplexität. Aus Individuen werden Superorganismen („Holobionten“), in denen die Grenzen zwischen den Individuen fließend sind.

GLOSSAR

Auxotrophie: Auxotrophe Organismen können eine oder mehrere lebenswichtige Substanzen nicht selbst herstellen und müssen diese stattdessen aus der Umwelt aufnehmen. Auxotrophie entsteht, wenn eine Mutation ein Gen für die Produktion eines essenziellen Nährstoffs ausschaltet.

Evolution: Nach der neodarwinistischen Evolutionstheorie kann die natürliche Selektion nur am Individuum wirken. Nach Meinung des britischen Biologen Richard Dawkins setzt die Selektion sogar an noch kleineren Einheiten an, den Genen. Das bedeutet: Ein Gen wird dann bevorzugt an die nächste Generation weitergegeben, wenn es für ein Individuum vorteilhaft ist. Es verleiht seinem Träger einen Selektionsvorteil und erhöht dadurch dessen evolutionäre Fitness. Gruppenselektion ist deshalb aber nicht ausgeschlossen. Unter bestimmten Bedingungen begünstigt die Evolution ganze Gruppen. Die Kooperation verschiedener Bakterien ist dafür ein Beispiel.

Für Forscher, Entdecker, Wissenschaftler
– und solche, die es werden wollen:

Junge Wissenschaft



Das einzige europäische Wissenschaftsmagazin mit begutachteten Beiträgen junger Nachwuchsforscher.

Wissenschaftliche Erstveröffentlichungen und das Neueste aus Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik.

Nur im Abo. Viermal im Jahr News aus Forschung und Technik, Veranstaltungen, Porträts, Studien- und Berufsprofile.

Vorteilsabo sichern!

abo@verlag-jungewissenschaft.de

Stichwort: „Vorteilsabo“

Leseprobe anfordern!

leseprobe@verlag-jungewissenschaft.de
oder per Fax 0211 / 74 95 64-29

Vorteilsabo
nur **20,-€***

für Schüler, Studenten, Referendare und Lehrer
(4 Ausgaben für 20,00 EUR statt 30,00 EUR)*
*zzgl. Versandkosten

www.verlag-jungewissenschaft.de