

DIE GEBURT DES KOLLEKTIVS

TEXT: MAGDALENA NAUERTH

FOTO: MICHAEL SCHWARZ/MPPI FÜR EVOLUTIONS BIOLOGIE

Kolonie von *Pseudomonas*-Bakterien auf der Oberfläche eines festen Nährmediums. Das faltige Aussehen ist eine Folge von Mutationen, die eine Überproduktion eines Cellulosepolymers zur Folge haben. In flüssigem Nährmedium bilden die Bakterien eine dichte Matte.

Wer betrügt, fliegt raus. Im Fall der Bakterien von Paul Rainey ist das Schummeln dagegen sogar erwünscht. In seinem Labor am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön untersucht der Forscher, wie aus Einzelzellen ein vielzelliger Organismus wird. Seine Erkenntnis: Zu viel Zusammenhalt kann für die Gemeinschaft auch kontraproduktiv sein.

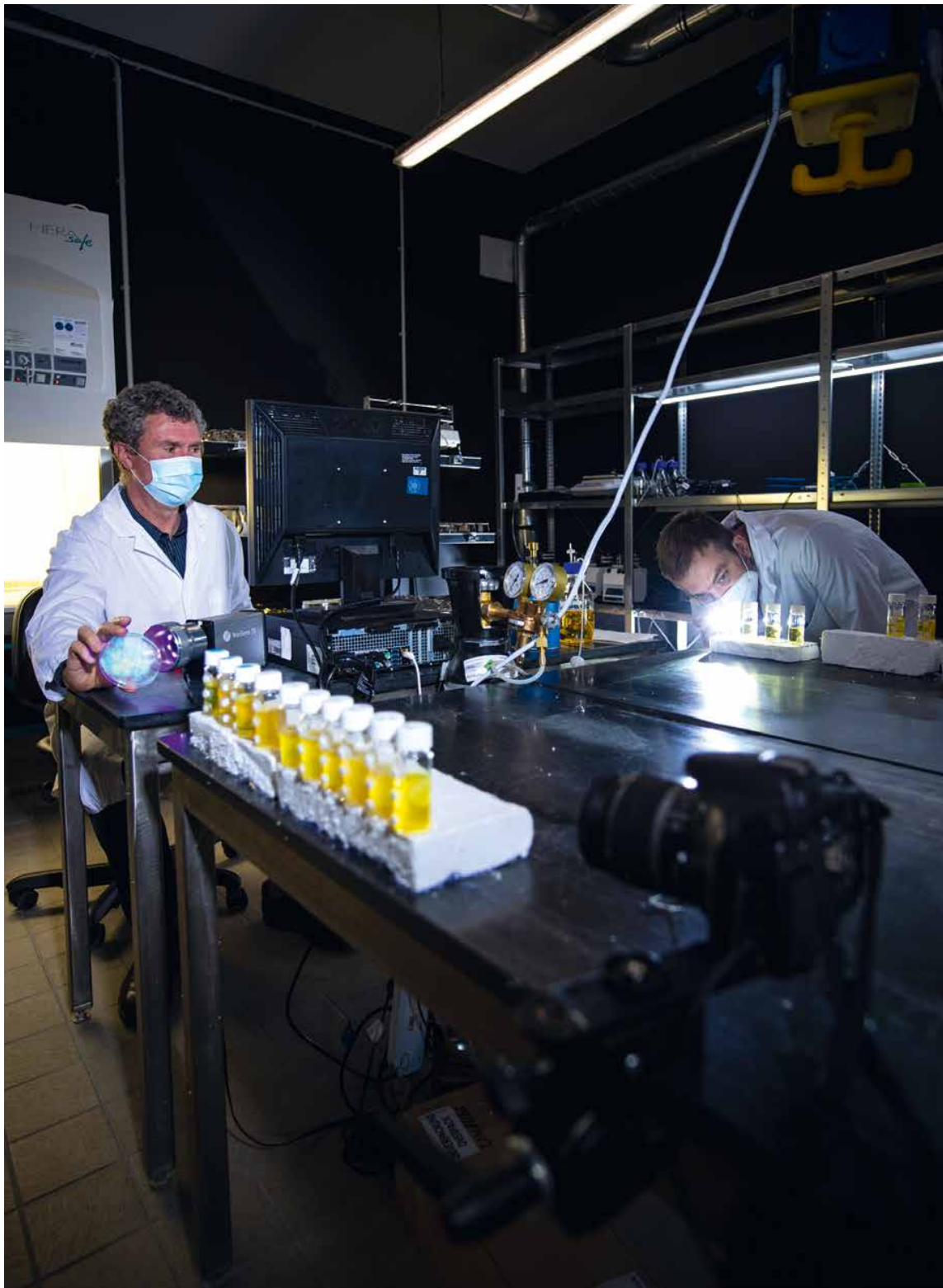


FOTO: TOM PINGEL FÜR MPG

Paul Rainey (links) und Loukas Theodosiou im Labor. Rainey hält eine Petrischale mit einem fluoreszierenden Pigment, das *Pseudomonas fluorescens* seinen Namen gibt. In den Reagenzgläsern schwimmen die Mikroben in verschiedenen Stadien ihres Lebenszyklus.

Als das Leben entstand, gab es noch nicht viel Zusammenhalt. Die ersten Zellen waren „Einzelkämpfer“, die sich an die rauen Lebensbedingungen auf der Erde vor 3,8 Milliarden Jahren anpassen mussten. Aber nur 300 Millionen Jahre später haben sich die ersten Bakterien zusammengetan. In Westaustralien zeugen Formationen aus geschichtetem Kalkstein von diesen frühen Zellverbänden – die sogenannten Stromatolithen. Die ersten Zellen mit einem Zellkern erschienen vor 2,7 Milliarden Jahren und mehrzelliges eukaryotisches Leben vor 1,7 Milliarden Jahren. Paul Rainey und sein Team am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie wollen verstehen, wie Einzelzellen den Übergang zu Vielzellern geschafft haben könnten.

Paul Rainey hat Biologie studiert. Nach dem Studium hatte der Neuseeländer von seinem Fach jedoch erst einmal genug und tourte mit seinem Saxofon als Jazzmusiker mehrere Jahre durch die Welt. Nach seiner Rückkehr nach Neuseeland arbeitete er zunächst für ein Molkereiunternehmen als Verkaufsleiter – doch dann besann er sich auf seine alte Leidenschaft, die Biologie, und schrieb sich wieder an der Universität ein. Für sein Masterprojekt sollte er Pilze untersuchen.

Schon damals wurde er auf ein Bakterium namens *Pseudomonas tolaasii* aufmerksam, das Pilze befällt. Es bewegt sich mithilfe seiner fadenförmigen Geißeln vorwärts. Rainey bemerkte, dass sich *Pseudomonas* an wechselnde Bedingungen in seinen Kulturgefäßen anpassen konnte. Manche dieser Zellen verloren die Fähigkeit, ein Gift zu produzieren, das bei Pilzen Gewebeschäden auslöst. Dieses Bakterium hat Rainey seitdem nicht mehr losgelassen. Neben seinen eigentlichen Forschungsprojekten hatte er immer auch Experimente mit *Pseudomonas* am Laufen. Diese enorme wissenschaftliche Neugier, gepaart mit Beharrlichkeit, sollte sich letztlich auszahlen, sie brachte dem Forscher

„Wir haben zum ersten Mal beobachtet, wie kooperatives Verhalten entstanden ist.“

PAUL RAINEY

aber auch manchmal gehörigen Ärger ein. Als Rainey nach seiner Doktorarbeit für ein weiteres Forschungsprojekt zu Pilzen nach Großbritannien wechselte, beobachtete er, dass die Bakterien auf seinen Agarplatten neben den typischen halbkugeligen, glatten Kolonien auch andere Formen hervorbrachten. Die Oberfläche des zweiten Kolonietyps war von tief eingeschnittenen Furchen übersät. Rainey nannte sie deshalb „schrumpelige Streuer“ (*wrinkly spreaders*). Auf der Oberfläche von flüssigen, ungeschüttelten Nährmedien bildeten die Zellen eine dichte Matte. Der dritte Kolonietyp bekam wegen seines Aussehens den Namen „flaumige Streuer“ (*fuzzy spreaders*). Auch diese Zellen bildeten in flüssigem Medium aufgrund elektrostatischer Anziehung Matten – in diesem Fall allerdings nur kurzlebige.

Sauerstoffmangel schafft Vielfalt

Paul Rainey's Tests ergaben, dass die Kolonien nicht nur verschieden aussahen, sondern auch aus Zellen mit unterschiedlichen Eigenschaften bestanden. War das schon Evolution? „Zu diesem Zeitpunkt verstand ich die Bedeutung dessen, was ich da vor mir sah, noch nicht“, erzählt Rainey. Im weiteren Verlauf seiner Forschung zeigte sich, dass die Varianten immer nur dann auftraten, wenn die Kulturgefäße, in denen die Bakterien gezüchtet wurden, ruhig standen und nicht geschüttelt wurden. Durch das Schütteln sollte die Versorgung der Mikroben mit Sauerstoff in der Nährlösung sichergestellt werden. In ungeschüttelten Gefäßen war das lebenswichtige Gas dagegen schnell aufgebraucht. In dieser Lage kamen die schrumpeligen und flaumigen Streuer ins Spiel: Dank der Fähigkeit von Zellen unterschiedlicher Kolonietypen zum Zusammenhalt konnten diese Matten bilden und den hohen Sauerstoffgehalt an der Oberfläche nutzen. Immer wieder kam Rainey mit seinem Experiment zum gleichen Ergebnis: Nach ein paar Tagen entstand eine Mischung aus glatten, schrumpeligen und flaumigen Zellen. Sie erschienen sogar stets in der gleichen Reihenfolge: zuerst die glatten, dann die schrumpeligen und zuletzt die flaumigen. „Das war der Durchbruch: *Pseudomonas* hatte sich also an Sauerstoffmangel angepasst“, sagt Paul Rainey rückblickend.

So aufregend diese Ergebnisse auch waren, bei seinem damaligen Arbeitgeber kamen sie nicht so gut an, denn eigentlich sollte Rainey in eine andere Richtung forschen. Und so wurde ihm untersagt, die Experimente fortzuführen. Rainey machte trotzdem weiter – wenn auch auf eine diskretere Art und Weise. Zur Erforschung von Evolution sind die *Pseudomonas*-Bakterien

ein ideales Modell. Anders als in freier Natur können die Forschenden im Labor die Lebensbedingungen ihrer Testobjekte genau kontrollieren. Und noch einen weiteren Vorteil hat die Arbeit mit Bakterien: Da die Evolution meist sehr langsam arbeitet, lässt sich bei den meisten Populationen nur über viele Jahre hinweg beobachten, welche Änderungen im Erbgut das Überleben beeinflussen. Anders bei *Pseudomonas*: Zwischen zwei Generationen liegt weniger als eine Stunde, evolutionäre Anpassungen lassen sich da wie im Zeitraffer studieren. „Wir konnten Evolution also im Reagenzglas untersuchen.“ Seine Experimente haben Rainey zu einem der Mitbegründer einer neuen Teildisziplin der Evolutionsbiologie gemacht: der experimentellen Evolution. Inzwischen erforschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler rund um die Welt mit Experimenten, wie sich Organismen an Veränderungen der Lebensbedingungen anpassen. In den künstlichen Laborumgebungen, in denen die Forschenden jeden Parameter unter Kontrolle haben, geht das besonders gut. Und so ist Darwins ursprüngliche Theorie der Evolution durch natürliche Auslese heute vielfach wissenschaftlich belegt.

Kleber hält Zellen zusammen

Aber wie wurden nun die einzelligeren Bakterien zu Teamplayern? Zunächst mussten sie überhaupt einmal zusammenbleiben können. Genetische Analysen, die Rainey und sein Team vornahm, ergaben, dass die Matten bildenden Zellen dank Mutation ein celluloseartiges Polymer produzieren. „Dieses Molekül wirkt wie ein Kleber, mithilfe dessen sich die Bakterien an die Gefäßwand und aneinander heften können“, erklärt Rainey. So können sie an der Oberfläche einer Flüssigkeit eine Matte bilden und dort den höheren Sauerstoffgehalt nutzen. Für die Gemeinschaft ist dies eindeutig ein großer Vorteil. Aber für die einzelnen Zellen? Sie müssen ja die Energie für das Kleberpolymer aufbringen. *Pseudomonas* erfüllte damit die klassische Definition von Kooperation: ein Verhalten, mit dem ein Individuum etwas zum Nutzen anderer beisteuert und von dem es auch selbst profitiert. „Wir haben damit zum ersten Mal beobachtet, wie kooperatives Verhalten von Grund auf neu entstanden ist“, erzählt Rainey.

Zusammenarbeit ist in vielen Sozialverbänden im Tierreich zu finden. Bei den Bienen zum Beispiel kümmern sich Arbeiterinnen um die Aufzucht ihrer Schwestern, ohne sich selbst fortzupflanzen. Da sie sich aber genetisch sehr ähnlich sind, tragen sie so trotzdem zur Weitergabe ihrer Gene bei. Das Bienenvolk kann dadurch neue Bienen hervorbringen. Damit sich das Verhalten aber durchsetzen kann, müssen sich

auch die Völker selbst vermehren. Sie tun das, indem eine junge Königin im Frühling mit einem Teil des Volkes den alten Stock verlässt und ein neues Bienenvolk gründet. Und die Bakterienmatten – können sie Baby-Matten produzieren? „Auf den ersten Blick schienen sie sich nicht fortzupflanzen“, erzählt Rainey. Ohne Fortpflanzung ist jedoch keine Selektion möglich, denn die Selektion setzt nicht an den Matten an. Mit anderen Worten: Während Matten bildende Zellen sich vermehren, sind die Matten selbst evolutionäre Sackgassen.

Paul Rainey und sein Team gaben aber nicht auf und beobachteten ihr evolutionäres Testsystem weiter. Mit der Zeit entstanden in den Matten weitere Typen mutierter Zellen, die den Klebstoff nicht mehr produzierten und sich frei bewegen konnten. Sie profitierten also vom Zusammenhalt des Verbandes und einer Versorgung mit Sauerstoff, ohne selbst etwas dazu beizutragen. „Sie betrügen ihre Kollegen in gewisser Weise. Da sie sich die Produktion des Klebers sparen, können sie sich schneller vermehren. Gleichzeitig schwächen sie den Zusammenhalt der Matte und führen mit der Zeit deren Auflösung herbei“, so der Wissenschaftler.

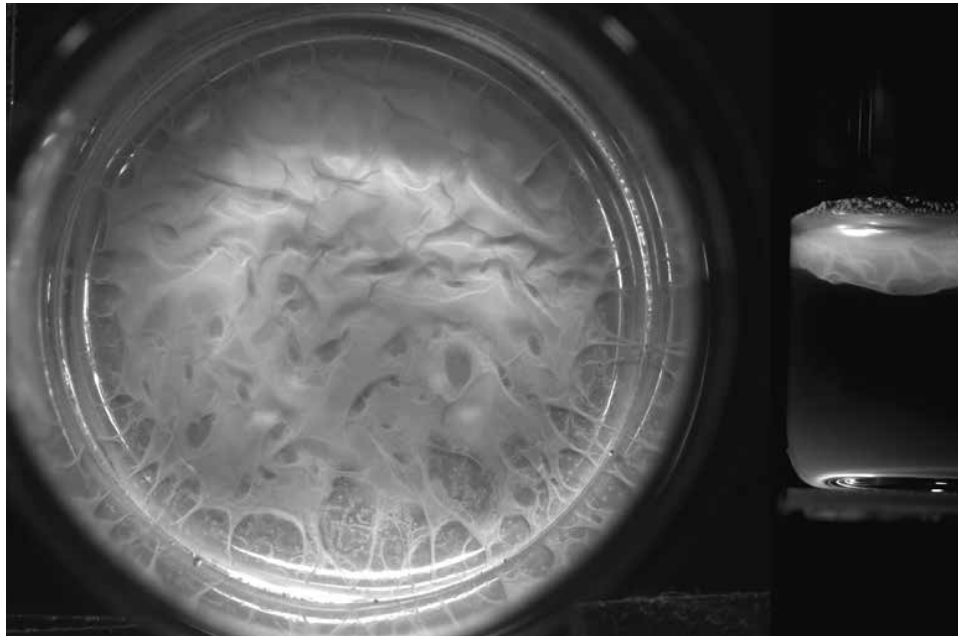
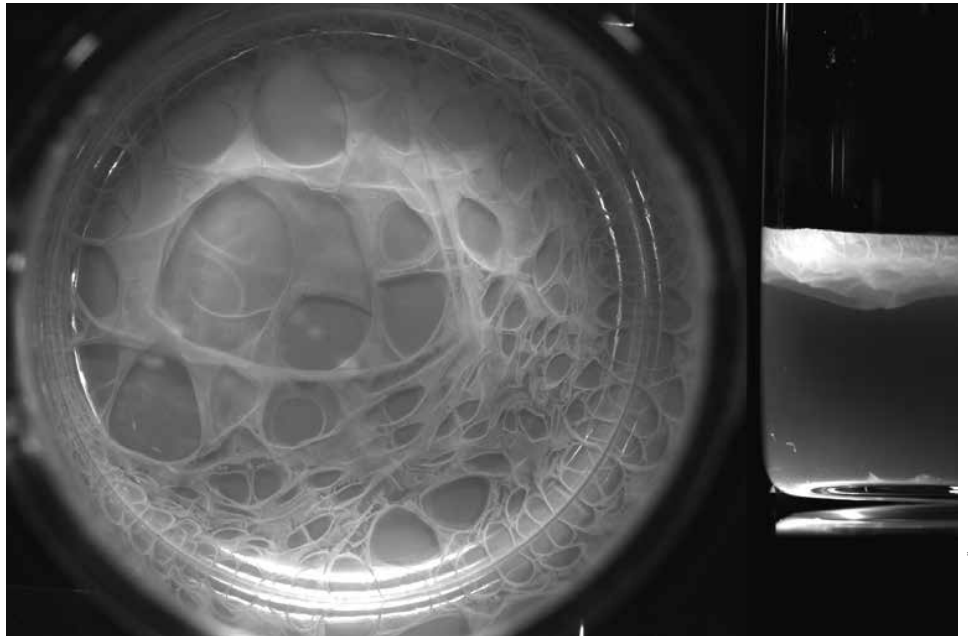
Die vorherrschende Meinung unter Forschenden lautet, dass solche Trittbrettfahrer ein Problem darstellen, das gelöst oder minimiert werden muss, weil Individuen sonst nicht dauerhaft zusammenarbeiten. Paul Rainey und seine Kolleginnen und Kollegen stellten jedoch fest, dass die Betrüger eine ganz wichtige evolutionäre Funktion besitzen können: Unter bestimmten Bedingungen können sie dem Zellkollektiv bei der Vermehrung helfen. „In gewisser Weise nehmen die Betrüger die Rolle von Fortpflanzungszellen ein, mit denen sich vielzellige Organismen vermehren. Die kooperierenden Zellen der Matte wären dann die Körperzellen. Mit dieser Unterscheidung von im Verband bleibenden und sich verbreitenden Zellen besitzen die Bakterienmatten schon ein Merkmal eines mehrzelligen Organismus“, erklärt Rainey.

Anders als in den Reagenzgläsern der Forschenden können sich die Bakterienmatten in der Natur ausbreiten – zum Beispiel in einem Weiher. Wenn an die Schilfrohre angeheftete Matten absterben und zu Boden sinken, können die beweglichen Verbreitungszellen anderer Matten die wieder frei gewordene Nische besiedeln. Nun konkurrieren nicht mehr einzelne Zellen um Platz und Ressourcen, sondern die Matten. Diese werden nun Gegenstand der Selektion. Der am besten angepasste Verband verdrängt unterlegene Konkurrenten. „Dies bedeutet, dass die Selektion nicht mehr nur auf der Ebene einzelner Zellen ansetzt, sondern auf der der Matten“, sagt Rainey. „Eine solche gruppenbasierte Selektion unterstützt die Entstehung kom-



Entwicklung von
Matten der *Wrinkly
spreader*-Bakterien an
der Oberfläche eines
flüssigen Kulturmediums
nach 12 (Bild oben)
und 24 (unten) Stunden.

Dank der verstärkten
Produktion eines
Cellulosepolymers haften
die Zellen aneinander
und am Rand des Kultur-
gefäßes. Dadurch bleiben
sie an der Grenzfläche
von Luft und Flüssigkeit,
wo sie mit reichlich
Sauerstoff versorgt
werden. (Rechts in den
Fotos jeweils die
Seitenansicht.)



FOTOS: MICHAEL SCHWARZ/AIPI FÜR EVOLUTIONSBIOLOGIE

**„Für die Evolution von
Kollektiven sind bestimmte
ökologische Bedingungen
erforderlich.“**

PAUL RAINEY

plexer Organismen.“ Die Ergebnisse brachten den Wissenschaftler auf die Spur eines neuen Konzepts. Dieses berücksichtigt die zentrale Rolle der Ökologie bei großen evolutionären Übergängen wie beim Übergang von Materie zu den ersten selbstreplizierenden Molekülen, von Genen zu Chromosomen oder von Zellen zu mehrzelligen Organismen.

Meilensteine der Evolution

Evolutionäre Übergänge beginnen mit einfachen Einheiten, die sich zusammenschließen. Sie sind abgeschlossen, wenn das daraus hervorgehende Kollektiv an der Evolution durch natürliche Selektion teilnehmen kann. Dazu müssen die Gemeinschaften drei Eigenschaften besitzen: Sie müssen individuell verschieden sein und variieren, sie müssen sich fortpflanzen, und sie müssen ihre Eigenschaften an Nachkommen weitergeben. Den frühen Formen von Kollektiven fehlten diese Fähigkeiten jedoch. Folglich konnten sie nicht auf Basis natürlicher Selektion entstanden sein. Wie lässt sich dann aber der Ursprung dieser grundlegenden darwinistischen Eigenschaften von Variation, Replikation und Vererbung erklären?

Zusammen mit seinen Kollegen Andrew Black und Pierrick Bourrat hat Rainey ein Modell entwickelt, das die experimentellen Ergebnisse seines Teams vereinfacht und verallgemeinert. Es zeigt, wie ökologische Bedingungen dazu führen können, dass Kollektive die darwinistischen Eigenschaften Variation, Replikation und Vererbung ausbilden. Auf die Bakterienmatten im Teich bezogen, bedeutet das: Die räumlich voneinander getrennt wachsenden Schilfstängel, an denen sich die Matten ansiedeln, ermöglichen Variationen zwischen den Matten. Wenn Matten absterben, können die wieder verfügbaren Schilffrohre von Ausbreitungszellen besiedelt werden. Verbreitung und Bildung einer neuen Matte sind vergleichbar mit der Fortpflanzung der Matten. Und wenn das neue Kollektiv aus einer einzigen Zelle einer Vorgängermatte gebildet wird, dann erbt die neu gebildete Gemeinschaft die Eigenschaften dieser Matte. „Die Matten selbst würden gar nicht als evolutionäre Einheiten an der natür-

lichen Selektion teilnehmen“, erklärt Paul Rainey. „Aber die ökologischen Bedingungen bewirken, dass sich ein darwinistischer Prozess auf der Ebene der Matten entfaltet.“ Allerdings müssen diese von außen auferlegten Eigenschaften dann zu inhärenten Merkmalen der neuen Lebensform werden. Anhand von Experimenten und Computermodellen haben die Wissenschaftler aufgezeigt, dass dies möglich ist. So haben Paul Rainey und sein Team am Max-Planck-Institut beobachtet, dass die Bakterienzellen einen einfachen genetischen Schalter entwickeln, welcher den Übergang zwischen Matten- und Vermehrungszellen ermöglicht. Die Bakterien sind also nicht mehr auf zufällige Mutationen angewiesen, sondern besitzen getrennte Lebenszyklen für Wachstum und Vermehrung. In der Natur können die Matten schließlich die Fähigkeit erlangen, auf der Wasseroberfläche zu schwimmen. Dies macht sie unabhängiger von ansonsten einschränkenden Umweltbedingungen. Damit ähnelt die Bakterienmatte vielzelligen Lebensformen, die ihre Fortpflanzungszellen ins Wasser abgeben.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Durch ihre kurze Generationszeit können sich Bakterien schnell an neue Lebensbedingungen anpassen. Deshalb lässt sich Evolution an Bakterienkulturen im Labor wie im Zeitraffer beobachten.

Wenn der Sauerstoff in Nährlösungen knapp wird, produzieren einzelne Bakterienzellen ein klebriges Polymermolekül, mit dem sie schwimmende Zellmatten bilden können. Auf diese Weise können sie den höheren Sauerstoffgehalt an der Oberfläche nutzen.

Manche Zellen sparen sich die Kosten des Gemeinschaftslebens. Sie schaden zwar kurzfristig dem Bestand der Matten, können aber für die Vermehrung der Verbände genutzt werden. Nehmen die Trittbrettfahrer jedoch überhand, löst sich die Bakteriengemeinschaft auf.

Einfache ökologische Faktoren wie die ungleiche Verteilung von Ressourcen und die Fähigkeit zur Verbreitung ermöglichen die Evolution von Kollektiven.

Mit dem Konzept einer Kontinuität zwischen Organismus und Umwelt haben die Forschenden dazu beigetragen, die Aufmerksamkeit auf die Bedeutung der Ökologie und von Umgebungen zu lenken, in denen darwinistische Eigenschaften auf neu entstandene Kollektive übertragen werden können. Dies wiederum öffnet die Tür zu neuen Experimenten, mit denen Forschende möglicherweise die großen evolutionären Übergänge erklären können, einschließlich des größten von allen: der Entstehung des Lebens selbst.

Ob die ersten Zellen tatsächlich genauso wie in Paul Rainey's Experimenten zusammengefunden haben, ist unklar. An zu viele Veränderungen hat sich das Leben seitdem anpassen müssen. Hinzu kommt, dass es viele verschiedene Wege zur Vielzelligkeit gegeben hat – je nachdem, in welcher Umwelt sich ein Organismus entwickelt hat. Im Laufe der Evolution ist Vielzelligkeit folglich mehrfach unabhängig voneinander entstanden. „Es ist aber durchaus plausibel, dass einer der vielen Wege dem in unseren Experimenten ähnelt“, stellt Paul Rainey fest.

www.mpg.de/podcasts/zusammenhalt



ACH, MENSCH



WARUM SCHEITERN EHEN?
WIE BEEINFLUSST DIE
UMWELT UNSER GEHIRN?
WIE TREFFEN WIR BESSERE
ENTSCHEIDUNGEN?
WIE FUNKTIONIERT
MULTIKULTI? WARUM SPRECHEN WIR,
WIE WIR SPRECHEN?
WAS BEDEUTET
WOHNUNGSLOSIGKEIT?
WARUM IST ABNEHMEN
SO SCHWER?

Geistes- und
Sozialwissen-
schaftler:innen
im Gespräch

Die neue Podcastserie von detektor.fm
und der Max-Planck-Gesellschaft

Jetzt auf allen Plattformen!

