



# Feiern und Hungern – für Bakterien kein Problem

Mikroorganismen haben ein beeindruckendes Repertoire  
für den Umgang mit unsicheren Lebensbedingungen

*von Jörg Soppa*

**Bakterien sind wahre Überlebenskünstler. Im Laufe der Evolution haben sie zahlreiche Strategien entwickelt, sich an schnell veränderliche, unsichere Umweltbedingungen anzupassen. So ist ihr Stoffwechsel wesentlich ausgeklügelter als derjenige des Menschen. Sie können innerhalb von Minuten ihre Genexpression anpassen und zur Not auch jahrzehntelang in Sporenform auf bessere Zeiten warten.**

**W**enn der Schiedsrichter auf dem Fußballplatz einen Schritt macht, sieht der Rasen für ihn an dieser Stelle nicht viel anders aus als in der Ausgangsposition. Für Mikroorganismen können die Umweltbedingungen unter seinen Füßen aber völlig unterschiedliche Milieus bedeuten. Denn gemessen in Körperlängen haben zwei Mikroorganismen, die eine Schrittlänge des Schiedsrichters voneinander entfernt sind, denselben Abstand wie ein Mensch in Frankfurt von einem Menschen in Florenz. Auf dieser Skala merken auch Menschen, dass sich Umweltbedingungen wie das Wetter ändern.

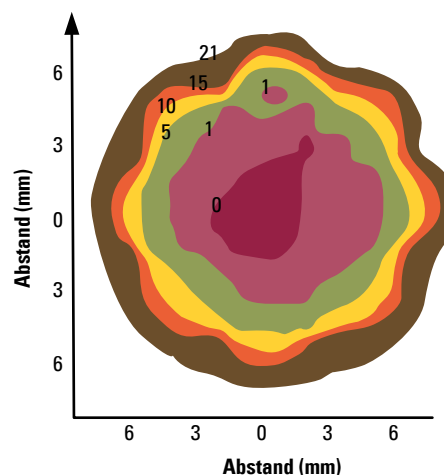
Ähnlich ist es mit den Bedingungen, denen Mikroorganismen ausgesetzt sind, nur dass sie im kleinen Maßstab schwanken. So kann die Sauerstoffkonzentration im Boden im Millimeterabstand stark variieren (Abb. 2). Hinzu kommen sehr häufige und schnelle zeitliche Änderungen der Umweltbedingungen, etwa wenn es anfängt zu regnen, sich eine Wolke vor die Sonne schiebt, eine Frucht von einem Strauch auf den Boden fällt, oder es Abend wird. Mikroorganismen sind heute und waren schon immer stetigen Änderungen der Umweltbedingungen ausgesetzt, wie einem plötzlichen Wechsel des Nährstoffangebots (als »feast and famine« bezeichnet), langen Zeiten der Dürre oder dem Auftauchen von Feinden. Mikroorganismen haben daher im Verlauf der Evolution Strategien entwickelt, mit dieser Unsicherheit umzugehen. Fünf dieser Strategien werden in den folgenden Absätzen kurz skizziert.

### Schwimmen, Schweben und Kriechen

Viele Bakterien haben Flagellen, das sind lange Zellfortsätze, mit denen sie aktiv schwimmen können. Sie können damit erstaunliche Geschwindigkeiten erreichen, zumindest wenn man diese in »Körperlängen je Sekunde (kls)« misst. Dann erreichen die schnellsten Bakterien 400 bis 500 kls, ein Gepard im Spurt nur 20 kls. Manche Bakterien haben Rezeptoren für Nahrungsstoffe, sie können damit Stoffgradienten in der Umwelt wahrnehmen und in Richtung höherer Nahrungskonzentration schwimmen (Chemotaxis). Viele photosynthetische Bakterien besitzen Lichtrezeptoren, so dass sie Orte mit höherer Lichtintensität aufsuchen und dort durch Photosynthese mehr Energie gewinnen können (positive Phototaxis). Bakterien bekommen zwar keinen Sonnenbrand, UV-Licht ist für sie aber auch schädlich und kann Mutationen im Erbgut auslösen. Daher besitzen viele Bakterien auch Lichtrezeptoren für UV-Licht, um sich vor diesem in Sicherheit bringen zu können (negative Phototaxis). Mit Rezeptoren für Sauerstoff können manche Bakterien auch in Richtung höherer Sauerstoffkonzentrationen schwimmen (Aerotaxis). Und last, but not least besitzen einige Bakterien sogar die Fähigkeit, sich am Magnetfeld der Erde zu orientieren (Magnetotaxis).

#### 1 Myxosporen.

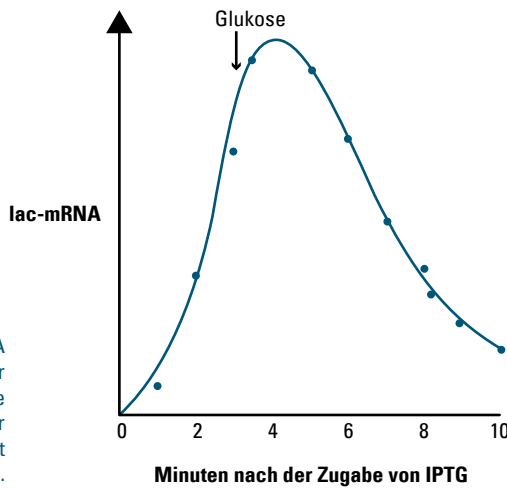
Viele Myxobakterien kriechen zusammen und bilden Fruchtkörper von mehreren Millimetern mit »Stämmen« aus Polymeren und abgestorbenen Zellen. An den Enden werden Sporenträger gebildet, in denen jeweils viele Sporen untergebracht sind.



#### 2 Sauerstoffverteilung im Millimeter-Maßstab.

Die Verteilung wechselt innerhalb weniger Millimeter von aerob (braun) bis anaerob (violett). Die Zahlen in der Abbildung geben den Sauerstoffgehalt in Prozent an.

**3** Induktion der lac-mRNA durch Laktose und Abbau der lac-mRNA nach der Zugabe von Glukose. Beides mit einer sehr kurzen Halbwertszeit von circa ein bis zwei Minuten.



Neben dem Schwimmen haben Bakterien weitere Formen der Beweglichkeit entwickelt. Dazu gehört die Synthese gasgefüllter Bläschen (Gasvesikel), die von vielen aquatischen Bakterien gebildet werden. Damit können diese Bakterien ihre Dichte regulieren und entweder an die Oberfläche von Gewässern schweben (wo es viel Sonnenlicht und Sauerstoff gibt).

Oder sie können zu einer bestimmten Tiefe in Seen schweben, die insgesamt für ihren Stoffwechsel optimal ist.

Eine weitere Form bakterieller Fortbewegung ist das Kriechen auf einer selbst produzierten schleimigen Unterlage, wie es viele auf dem Land lebende Bakterien beherrschen. Zu jeder Art von Fortbewegung gehört die Aufnahme von Signalen aus der Umwelt, um in Richtung günstigerer Bedingungen zu schwimmen, zu schweben oder zu kriechen. Aber auch wenn Geschwindigkeit und Weite der Fortbewegung in der Einheit »Körperlängen« beeindruckend sein mögen, sind es doch nur Millimeter bis Meter, die so aktiv zurückgelegt werden können, bei Weitem nicht genug, um den Widrigkeiten von wechselnden Umweltbedingungen entkommen zu

können. Daher sind weitere Strategien vonnöten, um mit dieser Unsicherheit umzugehen.

**Bakterien überleben überall – sogar im Weltraum**

Im Vergleich zu Bakterien ist der Stoffwechsel des Menschen sehr eingeschränkt, er ist unbedingt auf Sauerstoff angewiesen. Alternativlos, hier stimmt das übernutzte Wort mal wirklich, denn nach nur wenigen Minuten ohne Sauerstoff ist jeder Mensch tot (der Weltrekord für Apnoetaucher liegt bei 4 Minuten 24 Sekunden).

Bakterien haben dagegen sehr viele unterschiedliche Stoffwechselwege entwickelt, um in Abwesenheit von Sauerstoff – anaerob – Energie zu gewinnen, zu wachsen und sich zu vermehren. Sie hatten auch sehr lange Zeit dazu, denn in den ersten circa zwei Milliarden Jahren des Lebens auf der Erde gab es keinen Sauerstoff. Irgendwann haben die Cyanobakterien die sogenannte oxygene Photosynthese erfunden (es gibt auch andere Arten der Photosynthese), bei der Wasser gespalten wird und Sauerstoff entsteht. Diese Erfindung war so erfolgreich, dass sie die Atmosphäre der Erde für immer verändert hat und das Leben von Arten ermöglicht, die auf Sauerstoff angewiesen sind, wie wir Menschen.

Aber auch noch heute gibt es viele anaerobe Bereiche, in der Erde, in Seen und im Meer. Ein Leben in diesen vom Menschen in egozentrischer Sicht oft als »lebensfeindlich« bezeichneten Umwelten stellt für Bakterien natürlich kein Problem dar. Es gibt sehr viele unterschiedliche Arten der Energiegewinnung, die ohne Sauerstoff auskommen.

Der aerobe Stoffwechsel beruht auf der Reduktion von Sauerstoff zu Wasser bei gleichzeitiger Oxidation organischer Substanzen wie Steaks oder Smoothies zu Kohlenstoffdioxid. Reduktion und Oxidation sind gekoppelt (Redoxreaktionen) und bedeuten die Übertragung von Elektronen. Redoxreaktionen können auch in Abwesenheit von Sauerstoff zwischen einer Vielzahl von Verbindungen stattfinden. Und dies machen sich Bakterien zur Energiegewinnung zunutze; sehr viele Arten können mit unterschiedlichen, nicht an Sauerstoff gebundenen (anaeroben) Atmungen wachsen. Weitere Wege der Energiegewinnung, die ohne Sauerstoff auskommen, sind Fermentationen. Auch bei diesen Wegen ist die Diversität für Studierende der Mikrobiologie, die sie lernen müssen, erschreckend hoch. Für die Bakterien bedeutet es jedoch, dass sie überall auf der Erde irgendwie leben können. Und sogar darüber hinaus: Das Überleben von Bakterien im All ist bei Raumfahrtmissionen experimentell bewiesen worden. Und die Astrobiologie beschäftigt sich mit der Möglichkeit, dass Leben auch auf anderen Planeten als der Erde existiert.

**BUCHTIPPS**

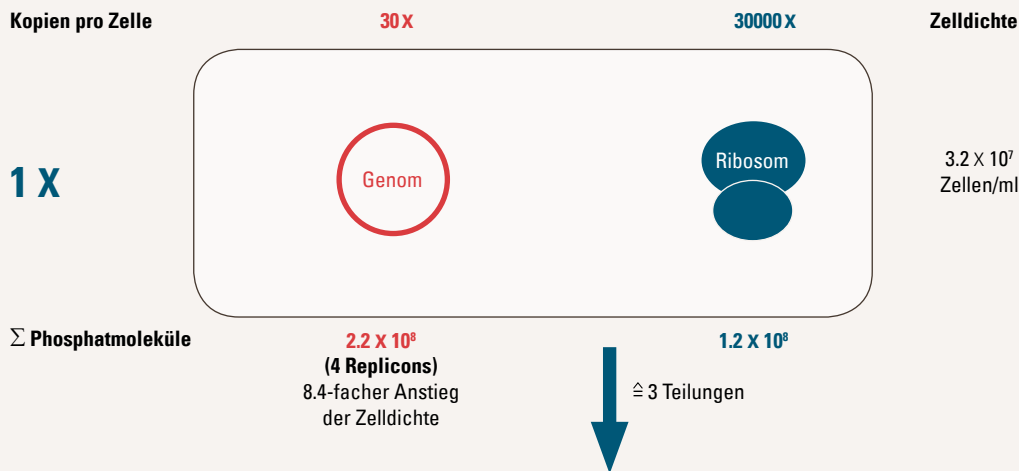
**Die Herrscher der Welt. Wie Mikroben unser Leben bestimmen.**  
Bernhard Kegel. Dumont Buchverlag, 2016.  
Obwohl der Autor nicht vom Fach ist, ist das Buch sehr aktuell mit vielen atemberaubenden Stories.

**Darm mit Charme.**  
Giulia Enders. Ullstein Verlag, 2017.  
Von einer Frankfurter Doktorandin der Medizin geschrieben, mit sehr leichtem und witzigem Stil. Wie der Titel schon verrät, geht es um Mikroorganismen im Darm.

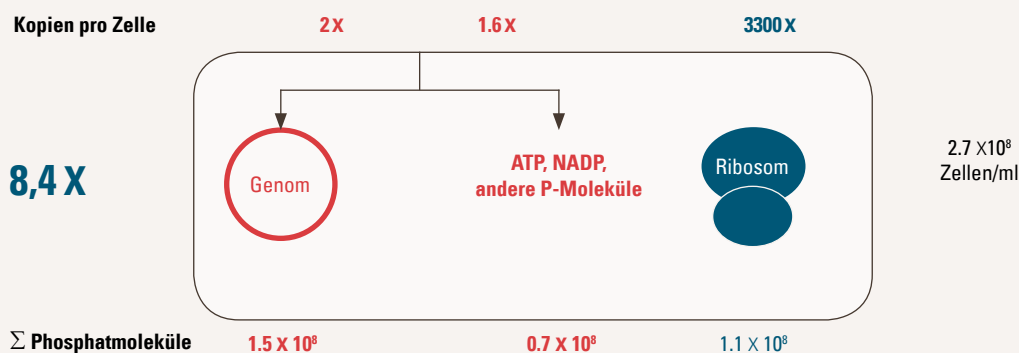
**Microbes and evolution: The World that Darwin never saw.**  
Roberto Kolter and Stanley Maloy (edt.). ASM Press, Washington, D.C., USA, 2012.  
Eine Sammlung von 39 kurzen Aufsätzen von Mikrobiologen, die in verständlicher Sprache über ihr jeweiliges Forschungsgebiet schreiben und möglichst einen evolutionären Aspekt mit einbauen sollten.

# GENOME ALS PHOSPHATSPEICHERMOLEKÜLE

## Vor dem Aushungern



## Nach dem Aushungern



Phosphatmoleküle in DNA und in Ribosomen vor und nach dem Wachstum in Abwesenheit von Phosphat wurden quantifiziert. Die vor dem Wachstum vorhandenen Genome werden nicht nur auf die Tochterzellen verteilt, sondern es wird ein Teil der Genome abgebaut, um Phosphat zur Synthese anderer Biomoleküle freizusetzen.

Diese Vielfalt der Möglichkeiten, Energie zu gewinnen, beinhaltet ein Überlebensprogramm von Bakterien unter vielen Bedingungen, auch wenn diese sich ständig und schnell ändern. Diese unsicheren Bedingungen sind für Bakterien nicht die Ausnahme, sondern die Regel. Es wäre daher wohl von Vorteil, wenn sich Bakterien schnell an wechselnde Bedingungen anpassen könnten. Und genau das ist der Fall.

### Warum Flexibilität keine Energieverschwendung ist

Die Information der DNA wird über Boten-RNAs (mRNAs) in Proteine übersetzt. Diese bestimmen die Eigenschaften und Fähigkeiten von Organismen, etwa als Enzyme im Energiestoffwechsel, beim Aufbau von zellulären Strukturen oder als Rezeptoren für die Aufnahme von Signalen. Da es energetischer Unsinn wäre, wenn alle im Genom kodierten Proteine immer gebildet würden, ist die Ablesung (Genex-

pression) strikt reguliert. Die Lebensdauer von mRNAs ist in Bakterien nur sehr kurz, die mittlere Lebensdauer beträgt zwei bis drei Minuten. Im Gegensatz dazu beträgt die mittlere Lebensdauer von mRNAs in höheren Eukaryoten wie auch bei uns mehrere Stunden. Auf den ersten Blick erscheint es verschwenderisch, Energie in den Aufbau langer Moleküle aus tausend oder tausenden von Bausteinen zu stecken, um sie schon zwei Minuten später wieder abzubauen. Da sich diese Strategie in der Evolution bei Bakterien durchgesetzt hat, muss sie Vorteile bieten, die den Nachteil der Energieverschwendung überwiegen. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass Bakterien mit dieser Strategie sehr schnell auf wechselnde Umweltbedingungen reagieren können. Ist Sauerstoff oder eine Energiequelle, die gerade noch in der Umwelt war, plötzlich nicht mehr vorhanden, können die Zellen sehr schnell die nun nicht mehr benötig-

ten mRNAs abbauen. Dann werden wenige Minuten nach der Umweltänderung keine unnützen Proteine mehr produziert (was energetisch viel teurer ist als mRNAs herzustellen). Natürlich gehört zu dieser schnellen Anpassung an ständig wechselnde Umweltbedingungen auch, dass die passenden Gene schnell angeschaltet werden, und genau das passiert auch. Abb. 3 verdeutlicht den blitzschnellen Auf- und Abbau einer mRNA anhand eines sehr gut untersuchten Gens. Man sieht außerdem, dass verschiedene Signale aus der Umwelt von Bakterien verrechnet werden können.

### Kluge Vorratshaltung

Die Hauptbestandteile aller Lebewesen sind relativ wenige Elemente, ein Mensch z.B. besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff (50 Prozent), Sauerstoff (20 Prozent), Wasserstoff (10 Prozent), Stickstoff (9 Prozent) und Phosphor (3 Prozent; bezogen auf das Trockengewicht, nach Abzug von Wasser). Vielfältiger Stoffwechsel und schnelle Regulation helfen nicht, wenn eines dieser Elemente in der Umwelt in keiner verwertbaren Form vorkommt. Da die Bedingungen häufig wechseln, erleben Mikroorganismen »feast and famine« – Feiern und Hungern. Eine Strategie, die viele Bakterien entwickelt haben, um Perioden des Mangels zu überbrücken, ist die Speicherung von Stoffen, die ihrer »evolutionären Erfahrung« nach in ihrer Umwelt häufig zwischenzeitlich mal Mangelware sind. Es gibt Speicherstoffe wie Glykogen, mit denen vor

allem Kohlenstoff gespeichert wird (+ Sauerstoff und Wasserstoff). Es gibt aber auch gemischte Speicherstoffe, in die alle wichtigen Elemente eingebaut wurden, wie das Cyanophycin der Cyanobakterien. Phosphat (= Phosphor und Sauerstoff) ist für alle Lebewesen essenziell, da es in vielen unterschiedlichen Bestandteilen der Zelle vorkommt, nicht zuletzt besteht die Erbsubstanz DNA zu circa 28 Prozent aus Phosphat. Erst vor Kurzem wurde entdeckt, dass bei einigen Bakterien DNA neben seiner Rolle als Erbsubstanz auch eine Rolle als Phosphatspeicher spielen kann. Wenn in guten Zeiten viel DNA akkumuliert wurde (die Zellen polyploid sind), können die Zellen in Abwesenheit von Phosphat in der Umwelt weiterwachsen, wie es im Kasten, S. 29, schematisch gezeigt ist. Arten ohne Akkumulation von DNA (monoploide Arten) können bei Phosphatmangel nicht wachsen. Sie leben ständig in der Unsicherheit, ihr Wachstum bei Engpässen einstellen zu müssen.

### Wenn alles andere nicht hilft: Ausbildung von Dauerformen

Viele Bakterien können unter ungünstigen Bedingungen Dauerformen ausbilden. Diese trotzen – in unterschiedlichen Ausmaßen – Trockenheit, Nahrungsmangel, aggressiven Chemikalien und Strahlung, die das Erbgut von wachsenden Zellen schädigt. Besonders resistent sind die Sporen von Bodenbakterien wie *Bacillus* und *Clostridium*, die unter ungünstigen Bedingungen Jahrzehnte überdauern können, um beim Eintreten günstiger Bedingungen mit dem erneuten Wachstum zu beginnen. Dabei werden einzelne Zellen in einzelne Sporen umgewandelt. Ein Beispiel ist in Abb. 4a zu sehen. Eine andere Strategie verfolgen *Myxobakterien*, die in Rudeln leben. Das Leben in der Gruppe ist für sie essenziell, da sie viele Enzyme nach außen abgeben, um Nährstoffe schon in der Umwelt abzubauen, bevor sie aufgenommen werden. Für Einzelzellen ist eine solche Nahrungsgewinnung energetisch ein Minusgeschäft, mit dem man nicht wachsen kann. *Myxobakterien* müssen daher auch gruppenweise überdauern. Bei schlechten Bedingungen kriechen tausende von Zellen zusammen und bilden Sporenkörper aus, in denen sich viele Zellen in *Myxosporen* umwandeln (Abb. 1, S. 26). Treten irgendwann, unter Umständen nach Jahren oder Jahrzehnten, wieder gute Bedingungen ein, wandeln sie sich gemeinsam in »normale« Zellen zurück und bilden ein neues Rudel.

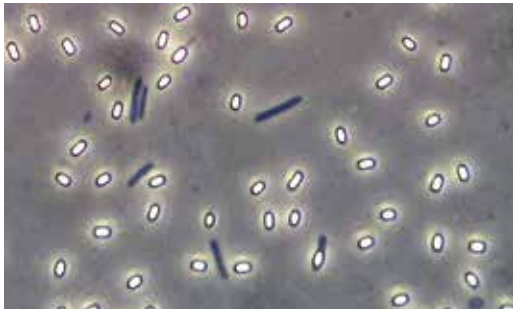
Zwei weitere Beispiele sollen noch zumindest kurz erwähnt werden. Dies sind erstens Cyanobakterien, die Filamente aus unterschiedlichen Zelltypen bilden können. Dauerformen werden hier »auf Vorrat« als ein Zelltyp mit eingebaut (Abb. 4b). Als letztes Beispiel seien *Streptomyce-*



### Der Autor

**Prof. Dr. Jörg Soppa** ist seit 1996 an der Goethe-Universität tätig, zunächst als Heisenbergstipendiat, seit 2001 als Professor für Mikrogenetik. Seine Arbeitsgruppe untersucht unterschiedliche biologische Prozesse in Archaea und Bakterien. Er war und ist Mitglied vieler universitärer Kommissionen und ist seit 2013 Vorsitzender der Akkreditierungskommission. 2010 wurde er von den Studierenden zum besten Lehrenden der Biologie gewählt.

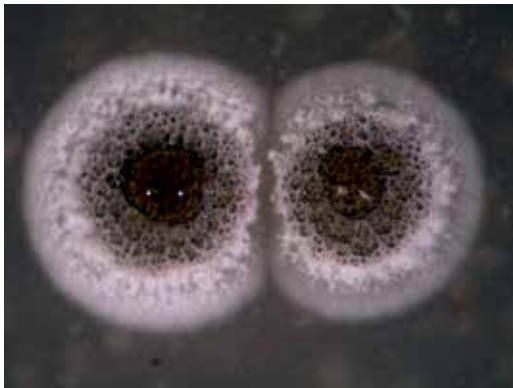
[soppa@bio.uni-frankfurt.de](mailto:soppa@bio.uni-frankfurt.de)



a



b



c

#### 4 Verschiedene Arten von Dauerformen

**a Endosporenbildung bei »Bacillus«.** Die Zellen (lange dunkle Stäbchen) wandeln sich in Sporen (hell leuchtende kurze Stäbchen) um.

**b Cyanobakterien.** Viele Cyanobakterien bilden Filamente, in die Dauerformen, die Akineten genannt werden, eingebaut werden.

**c Streptomyceten.** Die Kolonien von Streptomyceten sind sehr divers aufgebaut. Am Rand gibt es ein Substratmycel, das nach unten wächst und Nährstoffe aufnimmt. In der Mitte herrscht Nährstoffmangel und es wird ein Luftmycel gebildet. Dort entstehen die Sporen und oft auch Produkte des Sekundärstoffwechsels (Antibiotika, Farbstoffe).

ten genannt. Sie bilden Mycelien aus nicht klar voneinander getrennten Zellen. Am Rand eines solchen Mycels gibt es noch viele Nährstoffe und es findet Wachstum statt. Gleichzeitig sind in der Mitte die Nährstoffe aufgebraucht und es bildet sich ein fadenförmiger Fortsatz, ein sogenanntes Luftmycel, aus (Abb. 4c). Dort werden Sporen gebildet, die über die Luft für die weitere Verbreitung sorgen. Neben den vier erwähnten Beispielen gibt es viele weitere Bakterien, die Dauerformen ausbilden können.

#### Und was es sonst noch so alles gibt

Es würde den Rahmen dieses Artikels sprengen, die Anpassungsstrategien, mit denen Bakterien der Unsicherheit ständig wechselnder Umweltbedingungen begegnen, vollständig aufzuzählen. Drei weitere Strategien sollen zumindest genannt werden.

1. Erst seit wenigen Jahren ist bekannt, dass Populationen von genetisch identischen Bakterien heterogen sein können, also aus Individuen mit unterschiedlichen Eigenschaften bestehen. Momentan werden die Mechanismen zur Herausbildung dieser Heterogenität in einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft untersucht (<http://www.spp1617.tu-bs.de/>).

2. Sehr viele Bakterien können Symbiosen mit anderen Arten eingehen, so dass die Arten ihre

jeweiligen Stärken einbringen und gemeinsam mehr können als jeder allein. Bakterien, die es schaffen, in Symbiosen mit Pflanzen, Tieren oder Menschen zu leben, können dem oben beschriebenen ständigen Wechsel der Umweltbedingungen zumindest teilweise entgehen.

3. Ähnlich handeln, wenn auch viel weniger freundlich, pathogene Bakterien. Diese haben sich darauf spezialisiert, in einem Wirt (und von einem Wirt) zu leben. Die Interaktionen von Bakterien mit anderen Arten sind extrem vielfältig – und ein eigenes Thema.

#### Resilienz durch vielfältige Anpassungsmechanismen

Die kurzen Beschreibungen konnten hoffentlich zeigen, wie vielfältig die Mechanismen und Strategien sind, mit denen Bakterien unsicheren, durch ständigen Wechsel gekennzeichneten Umweltbedingungen begegnen. Wie es typisch ist in der belebten Welt, gibt es nicht das eine, alles einigende und erklärende Gesetz, sondern Biodiversität. Diese vielfältigen Anpassungsmechanismen waren es auch, die es Bakterien erlaubt haben, alle Umwelten dieser Erde zu besiedeln. Sie wachsen von  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+125^{\circ}\text{C}$ , mit und ohne Sauerstoff, auf allen Kontinenten, in Seen und Meeren, und sogar in Wolken hat man Bakterien gefunden. Wir können noch vieles von ihnen lernen – vor allem Flexibilität. ●