

Aktivitätswechsel: Warum Bakterien schlafen

Von Kai W. Wirtz

Bakterien sind fast überall auf der Erde zu finden. Sie verdanken dies vor allem der Fähigkeit, in Schlafzustände überzuwechseln. Die zugehörige Aktivitätsregulation ist noch weitgehend ungeklärt. Ein mathematisches Modell zeigt, dass in Wattenmeersedimenten weder eine zu langsame noch eine zu schnelle Regulation evolutionär von Vorteil ist.

Bacteria can be found nearly everywhere on our planet. This is mainly due to their ability to switch to a dormant state. The regulation of this process is still poorly understood. For microbes in tidal flat sediments, a mathematical model demonstrates that neither a slow nor a very fast regulation rate is favourable from an evolutionary standpoint.



Erste Blicke in den Mikrokosmos: der holländische Wissenschaftler Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723).

Im 17. und 18. Jahrhundert wurden die modernen Naturwissenschaften geboren. Nach einem etwa zweitausendjährigen Halbschlaf, in dem die Bewahrung von Wissen schon als Fortschritt galt, legten Pioniere der Forschung wie Galileo, Newton und Lavoisier die Grundsteine für eine Entwicklung, die bis heute andauert: die exponentielle Vermehrung von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen.

Einer der bedeutendsten frühen Wissenschaftler war Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723). Sein Bekanntheitsgrad hält sich allerdings in Grenzen. Statt neuer Planeten oder Wunderwaffen entdeckte der niederländische Naturforscher das Kleine und Unscheinbare in uns und um uns herum. Mit seinen selbst gebauten Mikroskopen machte er eine bis dahin unbekannt Welt sichtbar, den Mikrokosmos (von griech. mikros = klein) mit den Bakterien als seinen zahlreichsten Bewohnern. Diese Organismen unterscheiden sich von den uns geläufigeren Pflanzen und Tieren sowohl durch ihre winzigen Ausmaße von etwa einem Tausendstel Millimeter Durchmesser als auch dadurch,

dass sie ohne kompakte Zellorgane wie Mitochondrien auskommen. Aufgrund dieser beiden Eigenschaften können Mikroben jedoch eines besonders gut: schnell wachsen.

Zeit spielt keine Rolle

Bakterien füttern ihren Stoffwechsel durch die Umwandlung von organischen oder anorganischen Stoffen. Tausende verschiedener Mikroben sind darauf spezialisiert, unterschiedliche chemische Reaktionen in oder an der Zelle in Gang zu bringen, um den Energiegewinn zum Wachstum zu nutzen. Bei optimalen Bedingungen teilen sich die Zellen vieler Bakterienarten etwa zwei Mal pro Stunde, so dass aus einer einzigen Mikrobe innerhalb eines Tages 10^{21} Nachkommen entstehen könnten. Diese riesige Zahl würde mit ihrem Volumen ein Mehrfamilienhaus füllen, nach wenigen weiteren Tagen den ganzen Planeten.

Offensichtlich werden die Zellen schon nach kürzester Zeit daran gehindert, mit der maximal möglichen Rate zu wachsen.

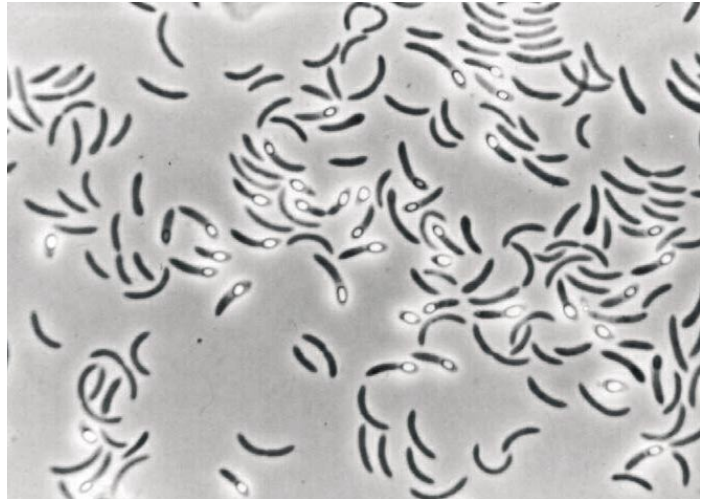
In der Natur bilden Mikroben zweidimensionale Biofilme (z.B. auf Zähnen), aber keine dreidimensionalen Klumpen, schon gar nicht in Eigenheimgröße, weil die Nährstoffe nicht schnell genug nachgeliefert werden können.

Überraschenderweise stellt ausbleibender Nachschub von Nährstoffen aber kein ernstes Problem für die Verbreitung der anscheinend so einfach gestrickten Einzeller dar. Es gibt auf der Erde so gut wie keinen Ort, an dem sie nicht zu finden sind. Bakterien tummeln sich in Wolken, kochenden Quellen oder in kilometertiefen, mehreren Hundertmillionen Jahren alten Gesteinen. Dort teilen sich die noch aktiven Zellen statistisch nur alle paar tausend Jahre einmal. Keine andere Organismengruppe ist in ihrem zeitlichen Wachstumsverhalten so flexibel.

Schlaf als Anpassungsleistung

Bakterien können nicht nur schnell wachsen, sondern oft auch rasant schwimmen: ein Vielfaches ihrer Körperlänge pro Sekunde. Diese Beweglichkeit reicht häufig jedoch nicht aus, um bei anhaltendem Stress einen Ort mit besseren Lebensbedingungen zu finden. Daher haben sie weitere Anpassungsmechanismen entwickelt, mit denen sie schlechte Zeiten überdauern können. Um den Stoffwechselumsatz deutlich zu reduzieren, können Mikroben in mitunter

Zellen von *Desulfosporosinus orientis*, die Sporen (helle Flecken) bilden. Bei optimalen Bedingungen teilen sich die Zellen etwa zweimal die Stunde. Diese riesige Anzahl der Zellen würde mit ihrem Volumen nach wenigen Tagen den gesamten Erdball füllen.



zeitlich kaum begrenzte „Schlafzustände“ überwechseln. Lediglich eine Zellfunktion muss aktiv bleiben: die Fähigkeit, bessere Umweltbedingungen wahrzunehmen. Denn nur so ist gewährleistet, dass der energetisch günstigste Augenblick des „Wachwerdens“ nicht verpasst wird.

Eine extreme Form dieser Reaktion besteht in der Bildung von Sporen. Ihr Aufbau ist zwar energetisch aufwändig, dafür benötigen Sporen fast keine Erhaltungsenergie. In ihnen wird genetische Information über lokal lebensfähige Formen gespeichert, um in unbestimmter Zukunft ein Aufleben schlafender Populationen möglich zu ma-

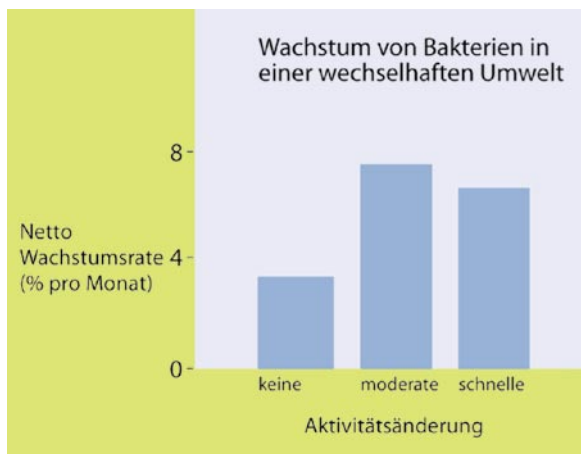
chen. Damit ähneln sie Büchern und dem darin akkumulierten Wissen vergangener Forschergenerationen, das in Bibliotheken des 15. und 16. Jahrhunderts auf eine Renaissance wartete.

Arbeiter des Lebens - auch im Watt

Die genauen Mechanismen der Aktivitätsregulation von Bakterien unter natürlichen Bedingungen sind noch weitgehend unbekannt (s.a. „Im Untergrund des Watts: Bakterien in der 'tiefen Biosphäre'“ in diesem Heft auf Seite 26). Die aktuelle Forschung kann also kaum auf überliefertes



Selbst in Sedimentschichten mit hoher mikrobieller Aktivität sind viele Zellen inaktiv: Abbruchkante im Watt.



Gemittelte Wachstumsrate einer Bakteriengemeinschaft in einem mathematischen Modell, das biogeochemische Prozesse im Watten sediment beschreibt. Das Modell berücksichtigt realistisch fluktuierende Randbedingungen und simuliert die Aktivitätsänderungen von 15 Bakteriengruppen. Für diese Änderungen wurden nacheinander drei Varianten mit keiner, mittlerer und sehr schneller Anpassungsgeschwindigkeit gewählt.

Wissen zurückgreifen, sondern muss mit innovativen Methoden und aufwändigen Messkampagnen das Rätsel stückweise lösen. Bei der Untersuchung biogeochemischer Prozesse im Wattenmeer gilt ein besonderes Augenmerk der Funktionsweise von Mikroorganismen sowohl im Meerwasser als auch auf kleinen Schwebstoffen, auf der Sedimentoberfläche und in einigen Metern Tiefe unterhalb des Meeresbodens. Jeder dieser Lebensräume ist durch ein Spektrum sich ändernder Einflussgrößen wie Gezeiten, wühlende Makroorganismen oder unterirdische Drainageflüsse charakterisiert.

Ohne Bakterien wäre das Wattenmeer tot. Mit der Umwandlung von abgestorbener Biomasse in Kohlendioxid und mineralische Nährsalze schaffen sie die Grundlage für den Kreislauf des Lebens. Wenn wir die zentrale Rolle von Mikroben in biogeochemischen Kreisläufen besser verstehen möchten, müssen wir mehr über ihre Aktivitätsregulation in Erfahrung bringen. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass selbst in Sedimentschichten mit hoher mikrobieller Aktivität viele Zellen inaktiv sind. Unter welchen Umständen haben sie ihren Metabolismus herunterreguliert, und wann wachen sie wieder auf?

Evolution, Modelle und Bakterenschlaf

Für einen Organismus, der sich geschlechtlich vermehrt, wäre ein zeitlich kaum begrenzter Zustand der Inaktivität nicht förderlich. Er wäre nach dem Aufwachen wahrscheinlich alleine in seiner (Mikro-) Welt und könnte keine Nachkommen in eine möglicherweise wieder günstigere Umwelt setzen. Für die sich ohne sexuelle Paarung fortpflanzenden Bakterien macht ein Dauer-

schlaf evolutionär aber durchaus viel Sinn, da die meisten Lebensräume wiederkehrend bestimmte Zustände einnehmen. Dies gilt auch für die unter- und oberirdischen Bereiche des Wattenmeeres.

Die Evolutionstheorie könnte auch bei der Beantwortung der konkreten Fragen nach den Schwellen zum Schlafen und Wachwerden weiterhelfen. Theoretische Überlegungen können wiederum über den Einsatz von mathematischen Modellen getestet werden. Biogeochemische Sedimentmodelle versuchen, die Dynamik und gegenseitige Beeinflussung zahlreicher biologischer, chemischer und physikalischer Prozesse mithilfe von mathematischen Gleichungen abzubilden. Das Oldenburger Modell zeichnet sich durch eine relativ detaillierte Beschreibung mikrobieller Aktivitäten aus. Sogar der Übergang vom aktiven zum inaktiven Zustand und umgekehrt kann simuliert werden, wobei die Geschwindigkeit dieses Übergangs im Modell frei einzustellen ist.

Obwohl das Modell auch auf tiefe Sedimente angewendet werden kann, benutzen es die Forscher am ICBM meist für die Simulation von Vorgängen in den oberen 20 bis 40 Zentimetern des Wattenmeerbodens. Mit unterschiedlichen Einstellungen können wir verschiedene Evolutionsszenarien für die Bakteriengemeinschaften in diesen Tiefen im Computer verfolgen, wenn Randbedingungen wie Gezeiten, Stürme oder Einträge von Substraten realistisch vorgegeben werden. Für den über einen längeren Zeitraum gemittelten Wachstumserfolg können drei Varianten von bakteriellen Aktivitätsänderungen angenommen werden. Im ersten Fall bleiben die Zellen stetig aktiv, im zweiten Fall verändern sie in moderater Weise ihren Aktivitätszustand in Abhängigkeit von aktuellen

Wachstumsbedingungen. Im dritten Szenario wird diese Änderung im Modell sehr schnell simuliert. Es überrascht ein wenig, dass nicht die schnellste Anpassung zum evolutionär besten Ergebnis führt. Im Erzeugen solcher Überraschungen liegt aber die eigentliche Stärke von mathematischen Modellen, da sie automatisch zu einem weiteren Hinterfragen der Phänomene drängen.

Die Erklärung in diesem Fall erscheint im Nachhinein einfach: Viele von außen aufgeprägte Änderungen in den oberen zehn Zentimetern des Wattenmeersediments sind periodischer Natur und haben relativ kurze Wiederkehrzeiten. Wenn die Bakterien zu schnell in einen anderen Modus hinüberschalten, werden sie von der nächsten Änderung „auf dem falschen Fuß erwischt“. Evolutionär günstiger ist es, die (In)Aktivitätsschwellen an die dominanten Frequenzen im jeweiligen Lebensraum anzupassen. Wie viel Zeit sich Bakterien für das Einschlafen und das Aufwachen nehmen, ist eine der zentralen Fragen, denen die Mikrobiologen der Forschergruppe nachgehen. Ein Aktivitätswechsel scheint mitunter mehrere Tage zu dauern. Darin liegt wohl ein weiterer Unterschied zwischen Mikroben und vielen „höheren“ Organismen einschließlich des Homo sapiens.

Der Autor



Prof. Dr. Kai W. Wirtz, seit 2004 Leiter der Abteilung „Ökosystemmodellierung“ am Institut für Küstenforschung des GKSS-Forschungszentrums Geesthacht, lehrt an der Universität in Kiel.

Er studierte Physik und Theologie in Mainz, Pisa und Oldenburg. Nach seiner Promotion in Kassel war er am Forschungszentrum Terramare Wilhelmshaven und ab 1999 am ICBM tätig. Seit 2001 arbeitet er in der Forschergruppe Watt im Teilprojekt „Integrative Modellierung“. Von 2003 bis 2004 leitete er die Nachwuchsforschergruppe IMPULSE am ICBM, die sich mit anwendungsorientierten Fragen im Küstenraum vor allem im Bereich der Offshore-Windenergie beschäftigt. Seine Forschungsgebiete umfassen neben der Entwicklung neuer Modellierungsmethoden die marine Ökologie, Küstenzonenmanagement, biogeochemische Kreisläufe, Pflanzenphysiologie, Mensch-Umwelt-Beziehung im Holozän und Mikrobiologie.