

entstanden, indem bestimmte Einzeller eine symbiontische Beziehung mit Cyanobakterien eingingen. Dieses spezielle Thema, die ungeheure Befähigung von Bakterien als symbiontische «Hilfsorganismen», haben wir bereits angesprochen; es kann nahezu beliebig vertieft werden (siehe unsere Kapitel 17 und 18). Festhalten darf man, dass auch die überragende symbiontische Leistungsfähigkeit der Bakterien zeigt, wie sinnlos es ist, sie als «primitive» Lebensformen anzusprechen.

4. Bakterien und Archaeen: Ähnlichkeiten und Unterschiede

Um uns schrittweise an die Besonderheiten der Bakterien heranzutasten, vergleichen wir sie zunächst weiter mit den Archaeen. Von diesen haben wir erfahren, dass sie den Bakterien äußerlich so sehr gleichen, dass man sie zunächst für eine Untergruppe hielt und deshalb «Archaeobakterien» nannte. Wir haben aber nur eines dieser «äußerlichen» Merkmale erwähnt, das Fehlen eines Zellkernes – und gerade dies kann man *nicht* direkt erkennen, wenn man Bakterien und / oder Archaeen unter dem Mikroskop hat! Das Zellinnere beider Einzellertypen wird von einer äußeren, undurchsichtigen Struktur abgedeckt, und dieses klar erkennbare Merkmal ist von höchster Relevanz: Sowohl Bakterien als auch Archaeen bilden eine verfestigte Zellwand aus. Normalerweise ist das Zellplasma einer Zelle nur durch eine elastisch-flexible Zellmembran begrenzt, was z. B. zur Folge hat, dass Zellen ihre äußere Form stark verändern können. Bei Bakterien und Archaeen ist dies nicht der Fall: Sie scheiden über ihre Zellmembran bestimmte biochemische Komponenten nach außen ab, die sich dort in Form einer festen – wenn auch nicht gänzlich starren – äußeren Zellwand vernetzen (ihr können noch weitere, «weiche» Komponenten aufgelagert sein, wie z. B. eine Gallertkapsel). Hierdurch wird ihre äußere Körpergestalt festgelegt. Die bakterielle Zellwand wurde mit der Lederhülle eines Balles verglichen: Sie hat zäh-elastische Eigenschaften und wirkt raschen Formveränderungen entgegen. Bei Bakterien und Archaeen wird man deshalb niemals dynamische Verformungen oder Einstülpungsbewegungen beobachten, wie sie bei anderen Einzellern oft zu sehen sind. Im mikroskopischen Bild sind die durch die Zellwandform festgelegten typischen Erscheinungsbilder der Bakterien und Archaeen unverkennbar, und ebendeshalb hielt man sie für Angehörige ein und derselben Großgruppe.

Wie so oft in der Forschung müssen begründete Vorabannahmen aber genauer hinterfragt werden. In diesem Fall fand man heraus, dass das Zellwandmaterial der Archaeen von dem sämtlicher anderer Bakterienarten grundlegend verschieden ist. Als auch noch genetische Vergleiche darauf hinausliefen, dass Archaeen eher mit Eukaryoten als mit Bakterien verwandt sind, musste man ihre Einordnung als

mutmaßliche Untergruppe der Bakterien zurücknehmen. Beide sind natürlich nach wie vor als Prokaryoten einzustufen, da ihnen ein Zellkern fehlt, doch ihre typische Bauweise mit einer Zellwand entstand unabhängig voneinander, und auch sonst sind sie keine engen Verwandten. Die festgestellte scharfe Trennung lässt sich kurz anhand folgender Übersicht zusammenfassen:

Die beiden Gruppen der Prokaryota (Einzeller ohne Zellkern)

Wissenschaftlicher Name:	
Bacteria	Archaea
Trivialname:	
Bakterien (Singular: Bakterium)	Archaeen (Singular: Archaeon)
Veraltete Bezeichnungen:	
«Eubakterien»	«Archaeobakterien»
(= «eigentliche Bakterien»)	(= «Urbakterien»)

Archaeen stehen Bakterien in Sachen Stoffwechselvielfalt in nichts nach; in beiden Großgruppen gibt es Arten, die unter sauerstofffreien Bedingungen (anaerob) leben, und solche, die sauerstoffhaltiges Milieu (aerob) meistern. Auch Phototrophie (Energiegewinnung unter Ausnutzung von Sonnenlicht) ist z. B. vom Archaeon *Halobacterium salinarum* bekannt; es setzt das lichtsammelnde Pigment Bacteriorhodopsin als «lichtgetriebene Protonenpumpe» ein. Ähnliches kennt man von bestimmten Bakterien, doch in Abgrenzung zu den Archaeen muss man die bakterielle Nutzung des Chlorophyll-Molekülkomplexes hervorheben und damit die anoxygene sowie die oxygene Photosynthese. Diese Methoden der Energiegewinnung entstanden nur in bestimmten Linien der Bakterien, sodass man die Phototrophie der Archaeen als einen Fall von paralleler Evolution ansehen kann. Für die evolutive Entstehung der äußeren Zellwand haben wir eine solche Parallelevolution bereits erwähnt, doch noch ein weiteres, äußerlich sichtbares Merkmal wurde zweimal unabhängig entwickelt: Sowohl manche Bakterien als auch manche Archaeen schwimmen mit langen Antriebsorganen, den sogenannten Geißeln. Im strukturellen Feinbau sind Bakterien- und Archaeengeißeln vollkommen unterschiedlich, wie ja auch der Aufbau ihrer Zellwände ganz verschieden ist. Die Funktionsweise der Geißeln jedoch ist identisch, sie rotieren und wirken dadurch wie eine Schiffsschraube oder ein Propeller. Um die strukturelle Verschiedenheit der Geißelorgane terminologisch hervorzuheben, wurde für die Antriebsgeißel der Archaeen jüngst ein eigener Name vorgeschlagen:

«Archaeum» (ein Kompositum aus *Archaea*, dem Gruppennamen, und dem lateinischen *flagellum* = Geißel). Kennzeichnende Unterschiede zwischen bestimmten Vertretern der Bakterien und Archaeen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bacteria	Archaea
Zellwand aus Murein (vgl. 7. Kapitel)	Zellwand aus Pseudomurein (bei einigen methanogenen Archaea), oder S-Layer =«surface layer» aus kristalliner Proteinschicht
Zellmembran aus estervernetzten Phospholipiden	Lipidketten der Zellmembran mit Glycerin verknüpft
Bakteriengeißel als Antriebsorgan	Archaeengeißel («Archaeum») als Antriebsorgan
Photosynthese mit Bacteriochlorophyll / Chlorophyll	Phototrophie mit Bacteriorhodopsin

Trotz der strengen systematischen Trennung zwischen Bakterien und den Archaeen ist es gar nicht so einfach, über Bakterien zu schreiben, ohne gelegentlich die Archaeen einzubeziehen. Einerseits ist dies der Wissenschaftsgeschichte geschuldet, also den vielen Publikationen früherer Autoren, in denen man beide Gruppen noch als Bacteria zusammenfasste; andererseits bieten Archaeen sich aus verschiedensten Gründen immer wieder als Vergleichsobjekte zu «echten» Bakterien an. Der sicherlich beeindruckendste Vergleich ist der folgende: Obwohl Bakterien und Archaeen ein ähnliches Bauprinzip aufweisen (prokaryotische Zelle mit verfestigter Zellwand) und ausgehend von diesem Konstruktionstyp extreme biochemische Potenzen entwickelten, sind bis heute keine Archaeen bekannt, die dem Menschen Schaden zufügen! Der Kontrast zu Bakterien, von denen Schrecken wie Pest, Cholera und Lepra ausgingen, ist schlagend und gar nicht so einfach zu erklären. Letztendlich muss es wohl so sein, dass es durchaus pathogene Archaeen gegeben haben könnte, diese über die Tierwelt aber niemals an den Menschen «weitergereicht» wurden. Die Tendenz der Archaeen, sich an «extremen» Standorten aufzuhalten, ist insgesamt ausgeprägter als bei Bakterien. Aus solchen Extremstandorten folgten wohl weniger oder gar keine Entwicklungen spezieller tierpathogener Formen, wie sie Vorstufe von humanpathogenen Formen sein können. Trotzdem dürfte hier jede Menge Glück im Spiel gewesen sein, denn Archaeen haben den menschlichen Körper durchaus erreicht und dessen Haut, seine Mundhöhle und vor allem seinen Darm besiedelt. Im Darmmikrobiom sind methanogene Archaeen

von hoher Bedeutung, wie auch im Darm anderer Tiere (und generell ist Methanproduktion nur von Archaeen bekannt, nicht von Bakterien!). Die größte ökologische Rolle spielen sie im Pansen von Wiederkäuern, weil deren industrielle Massenhaltung eine zu große und damit klimaschädliche Freisetzung von Methan zur Folge hat – sie übersteigt die CO₂-Emission von Autos und Flugzeugen weltweit! Auch dies ist natürlich ein Punkt, den wir noch einmal genauer betrachten müssen (vgl. 24. Kapitel).

Von Archaeen glaubte man lange Zeit, dass sie verstreute Reliktformen an Extremstandorten sind. Deshalb kam es einer mikrobiologischen Sensation gleich, als 1992 klar wurde, dass sie in hoher Zahl im Meerwasser vertreten sind: Dort stellen sie etwa 30 Prozent aller Mikroorganismen, während sie an Land, wo die Mikroorganismendichte um den Faktor 1000 erhöht ist, zwischen 0,1 und 20 Prozent ausmachen. Als Mikroorganismen oder «Mikroben» gelten dabei alle Prokaryoten und einzelligen Eukaryoten; als Ausnahmen kommen aber auch winzige vielzellige Formen hinzu, wie etwa fadenförmige Pilze.