

Bakterien als erstaunliche Kompaßnadeln

Bakterien aus unterschiedlichen Gruppen der Mikrobensystematik richten sich in einem äußeren Magnetfeld wie Kompaßnadeln entlang der Magnetfeldlinien aus. R. BLAKEMORE berichtete 1975 erstmals über solche magnetotaktische Mikroorganismen und von eisenreichen membranumschlossenen Strukturen in deren Cytoplasma. Diese werden als Magnetosomen bezeichnet und bestehen typischerweise aus kleinen Magnetitkristallen (Fe_3O_4 ; seltener Greigit Fe_3S_4), die von einer Lipiddoppelschicht umgeben sind. Bei *Magnetospirillum gryphiswaldense* unterscheidet sich die Zusammensetzung der membranaufbauenden Phospholipide von derjenigen der Außen- und der Cytoplasmamembran.

Die Bildung der Magnetitkristalle in den Magnetosomen stellt ein faszinierendes Beispiel für Biomineralisation dar, d.h. die Entstehung von Mineralien unter biologischer Kontrolle. Ferromagnetische Strukturen wurden aus Algen, Dinoflagellaten, Lachs, Forelle, Brieftaube, Wanderameisen und dem menschlichen Gehirn beschrieben (BÄUERLEIN 2003).

Die bisher beschriebenen magnetotaktischen Bakterien kommen sowohl im Meer als auch im Süßwasser vor und zwar grundsätzlich im Übergangsbereich zur anoxischen (sauerstofffreien) Zone; sie werden als anaerobisch (ohne Sauerstoff lebend) oder als mikroaerophil bezeichnet, weil sie höchstens Spuren von Sauerstoff vertragen. Die Magnetotaxis (Orientierung der Bewegungsrichtung an einem Magnetfeld) stellt für die Mikroorganismen allerdings nur *eine* Komponente eines kom-

plexen Systems zur Bewegungssteuerung dar, daneben spielen häufig Gradienten von Sauerstoff (Aerotaxis) und Nährstoffen eine maßgebliche Rolle.

Die Magnetosomen bilden die materielle Grundlage für die Magnetotaxis der Organismen. Sie bestehen aus den organischen Membranen, die anorganische Mineralienkristalle umhüllen. Zur Bildung der Magnetkristalle wurde aufgrund von bisherigen Untersuchungen ein Modell vorgeschlagen, allerdings sind noch viele Faktoren unbekannt. Nach diesem Modell (<http://magnum.mpi-bremen.de/magneto>) werden Eisen(III)-Ionen (Fe^{3+}) aktiv durch die äußere Membran und die Cytoplasmamembran ins Innere der Zelle geschleust. Dort wird Fe^{3+} zu Fe^{2+} reduziert und wiederum aktiv, d.h. mit Unterstützung von membranassoziierten Proteinen, in die Magnetosomen eingeführt, welche bereits als „leere“ Vesikel vorliegen. Im Magnetosom wird Fe^{2+} teilweise zu Fe^{3+} oxidiert (in Magnetit liegen die Eisenionen Fe^{3+} und Fe^{2+} im Verhältnis 1:2 vor), die Kristallbildung initiiert und die Größe und Ausprägung der Kristalle biologisch gesteuert. Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Magnetitkristalle zeigen, daß Größe und Form der Kristalle für die jeweiligen Bakterienarten spezifisch sind. Alle Magnetitkristalle in den Magnetosomen zeigen das für Magnetit typische kubisch flächenzentrierte Kristallgitter, sind jedoch in artspezifischer Kristallmorphologie ausgebildet. Der Durchmesser der Kristalle liegt erstaunlicherweise in einem sehr eng begrenzten Bereich von ca. 35-120 nm. Dieser Durchmesser entspricht bei Magnetitkristallen der magnetischen Einzeldomäne (ein mikrokristalliner Bereich mit einheitlicher, homogener magnetischer Orientierung). Durch deren entsprechende Orientierung wird das höchste magnetische Moment erreicht.

Auch andere eisen- und sulfatreduzierende Bakterien sind in der Lage, die extrazelluläre Kristallisation von Magnetit bzw. Greigit biologisch zu initiieren, wobei Größe und Form dieser Mineralien anders als bei den magnetotaktischen Bakterien nicht biologisch kontrolliert werden (SCHÜLER & FRANKEL 1999).

Die Magnetosomen sind typischerweise in linearen Ketten angeordnet (Abb. 1). Durch magnetische Wechselwirkung richten sich darin die einzelnen Magnetitkristalle spontan aus und bilden so einen permanenten magnetischen Dipol. Dieser ist bei bis zu 60 in Ketten angeordneten Magnetitkristallen (*M. gryphiswaldense*; vgl. Abb. 2) groß genug, daß sich die Bakterien im Magnetfeld der Erde von ca. 50 μT (Millionstel Tesla) zu 80-90% wie eine Kompaßnadel ausrichten.

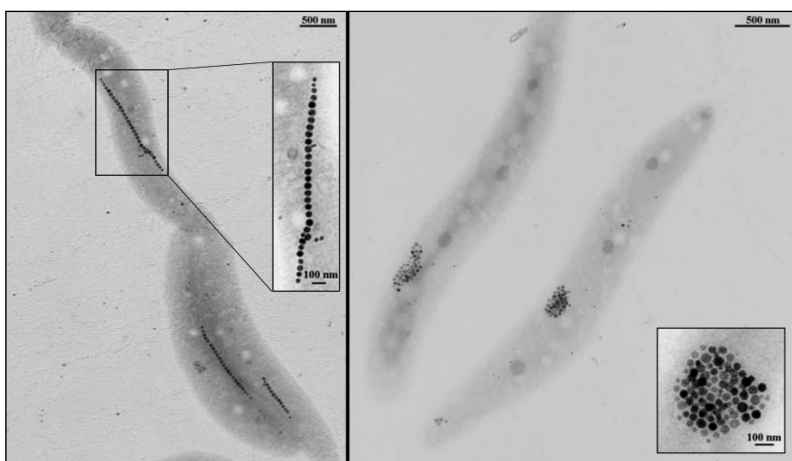


Abb. 1: Wildtyp (rechts) und MamJ-Mutante (links) von *M. gryphiswaldense* im Vergleich. Im Wildtyp sind die bis zu hundert Magnetitkristalle in Ketten angeordnet. Dadurch addiert sich die Wirkung der nanoskopischen Dauermagnete und das Bakterium wird wie eine Kompaßnadel im Magnetfeld ausgerichtet. Durch eine Mutation fehlt der Mutante das Mam-Protein; als Folge davon lagern sich die Magnetosomen unregelmäßig zusammen, wodurch sich die magnetischen Momente der Einzelmagnete teilweise aufheben; die Ausrichtung in einem äußeren Magnetfeld ist deutlich reduziert. (Fotos: A. SCHEFFEL und D. SCHÜLER; MPI Bremen; mit freundlicher Genehmigung)

Zur Molekularbiologie von *M. gryphiswaldense* liegen inzwischen zahlreiche Untersuchungen vor. Diese zeigen, daß die Gene aller bisher identifizierten Magnetosomenproteine innerhalb einer 35 kb umfassenden Region des Genoms (4,5 Mb) vorliegen, die in drei Operon-ähnlichen Genclustern angeordnet sind. Dieser Bereich wird auch als Magnetosom-Insel bezeichnet (SCHÜLER 1999). Diese Kenntnisse in Verbindung mit einigen verfügbaren Mutanten der Bakterien ermöglichen detaillierte Studien über einzelne Aspekte der Biomineralisation in magnetotaktischen Bakterien.

So konnten jüngst SCHEFFEL et al. (2006) durch einen Verlust des Gens *mamJ* zeigen, daß das entsprechende Genprodukt an der kettenartigen Verknüpfung der Magnetosomen beteiligt ist. Bei MamJ handelt es sich um ein saures Protein, das am Aufbau einer neu entdeckten filamentösen Struktur beteiligt ist. Die Autoren schlagen einen Mechanismus vor, in welchem MamJ sowohl mit den Oberflächen der einzelnen Magnetosomen als auch mit Elementen des Cytoskeletts wechselwirkt und damit die Magnetosomkette im Bakterium fixiert. Die Deletionsmutanten (Δ mamJ) zeigten keine Unterschiede in der Biomineralisation, die Magnetitkristalle waren hinsichtlich Größe, Morphologie und Anzahl mit dem Wildtyp identisch. Die Magnetosomen waren aber nicht mehr in Ketten angeordnet, sondern bildeten kompakte 3-dimensionale Ansammlungen. Δ mamJ reagierten im Experiment im Vergleich zum Wildtyp deutlich schwächer auf ein äußeres Magnetfeld. Mit einer modernen bildgebenden Methode, der Cryo-Elektronentomographie, die die Erzeugung 3-dimensionaler Abbildungen erlaubt, konnten die Autoren zeigen, daß die Magnetosomen (auch die noch leeren Vesikel) von Δ mamJ im Gegensatz zum Wildtyp nicht mit den filamentösen Strukturen verknüpft sind. Bei den Mutanten sind die Magnetosomen also nicht linear kettenförmig angeordnet und auch nicht im Innern der Bakterienzelle fixiert. Die Autoren haben damit wieder einen kleinen Aspekt des faszinierenden Phänomens der Biomineralisation im Zusammenhang mit der Magnetotaxis erhellt.

Sie stellen staunend fest, daß mit der Architektur des Magnetosomsystems eines der höchsten strukturellen Niveaus in Prokaryoten erreicht wurde.

Bei solchen Einsichten in erstaunlich komplexe Teilstrukturen von Bakterienzellen darf man auf weitere Untersuchungsergebnisse zu diesem Themenfeld gespannt sein. Dies gilt umso mehr, als magnetische Systeme auch in komplexeren Lebewesen bis hin zum Menschen nachgewiesen wurden.

Interessanterweise finden sich auch fossile Hinweise auf linear angeordnete Magnetitkristalle in alten Sedimentsystemen und selbst aus dem Mars-Meteoriten ALH 84001 sind Abbildungen mit



Abb. 2: Visualisierung des Inneren von *M. gryphiswaldense* auf der Basis von Kryoelektronentomographie. Die Zellmembran enthält die in Vesikel (hell) verpackten Magnetitkristalle. Sowohl leere Vesikel als auch komplette Magnetosomen sind wie Perlen an einer Proteinfaser aufgereiht. (Foto: M. GRUSKA und J. PLITZKO; MPI für Biochemie, Martinsried; mit freundlicher Genehmigung)

Ketten aus Magnetitkristallen publiziert worden (FRIEDMANN et al 2001; die Interpretation der Autoren wurde allerdings sehr kritisch diskutiert).

Harald Binder

Literatur

- BAUERLEIN E (2003) Biomineralisation von Einzellern: eine außergewöhnliche Membranbiochemie zur Produktion anorganischer Nano- und Mikrostrukturen. *Angew. Chem.* 115, 636-664.
- BLAKEMORE R (1975) Magnetotactic bacteria. *Science* 190, 377-379.
- FRIEDMANN EI, WIERZCHOS J, ASCASO C & WINKELHOFER M (2001) Chains of magnetite crystals in the meteorite ALH84001: Evidence of biological origin. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98, 2176-2181.
- SCHÜLER D (2005) Nanokristalle für die Magnetfeldorientierung: Biomineralisation von Magnetosomen in Bakterien. *BIOspektrum* 11, 291-294.
- SCHEFFEL A, GRUSKA M, DAMIEN F, LINAROUDIS A, GRAUMANN PL, PLITZKO JM & SCHÜLER D (2005) An acidic protein aligns magnetosomes along a filamentous structure in magnetotactic bacteria. *Nature* 441, 110-114.
- Homepage der Arbeitsgruppe von D. SCHÜLER am MPI für marine Mikrobiologie in Bremen: <http://magnum.mpi-bremen.de/magneto/>. Dort sind weitere Informationen und Literaturhinweise zu finden.
- SCHÜLER D & FRANKEL RB (1999) Bacterial magnetosomes: microbiology biomineralization and biotechnological applications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 52, 464-473.
- SCHÜLER D (1999) Nanokristalle für die Magnetfeldorientierung: Biomineralisation von Magnetosomen in Bakterien. *BIOspektrum* 11, 291-294.
- WINKELHOFER M (2004) Vom magnetischen Bakterium zur Brieftaube. *Physik in uns. Zeit* 35, 120-127.