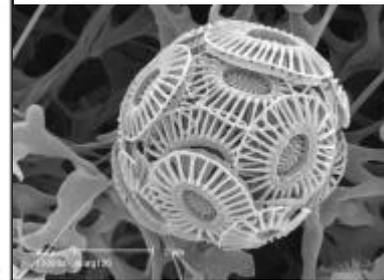
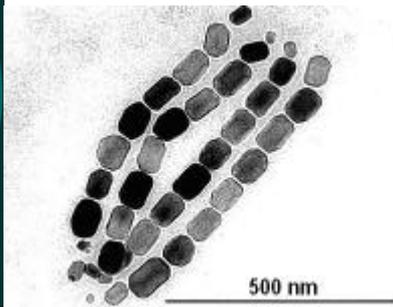
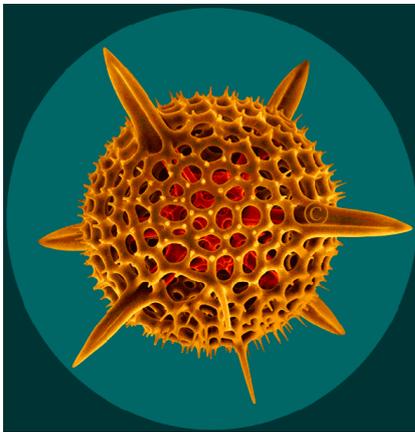




Algen machen Glas und Bakterien erzeugen Magnete.

*Was die Materialwissenschaft
von der Natur alles lernen kann.*



Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr.
techn. Ille Gebeshuber
Institut für Allgemeine Physik
Technische Universität Wien

Email: ille@iap.tuwien.ac.at
Tel.: 01/58801 13436



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

Abstract:

In jedem Fluß, in jedem Meer, auf der feuchten Wiese, ja sogar im Wasserbehälter unserer Toiletten findet man sie zu tausenden: kleine braungrüne Algen, die etwas ganz besonderes können: sich Häuser aus Glas zu bauen nämlich. Und da sie in der Glaserzeugung schon seit Jahrmillionen aktiv sind, können wir Menschen, die dieses Material erst seit einigen Tausenden von Jahren herstellen, noch viel von diesen Lebewesen lernen ! Oder haben Sie vielleicht eine Idee, wie man Glas herstellen soll, im Fluss, bei 20 Grad Wassertemperatur, mit nur ein bisschen Licht und einigen Mineralien zur Verfügung?

Ille Gebeshuber
Institut für Allgemeine Physik
Technische Universität Wien

Inhalt des Vortrages:

- Coccolithophoriden
- Kieselalgen
- magnetische Bakterien
- Radiolarien
- Schwämme
- Seesterne

Inhalt des Vortrages:

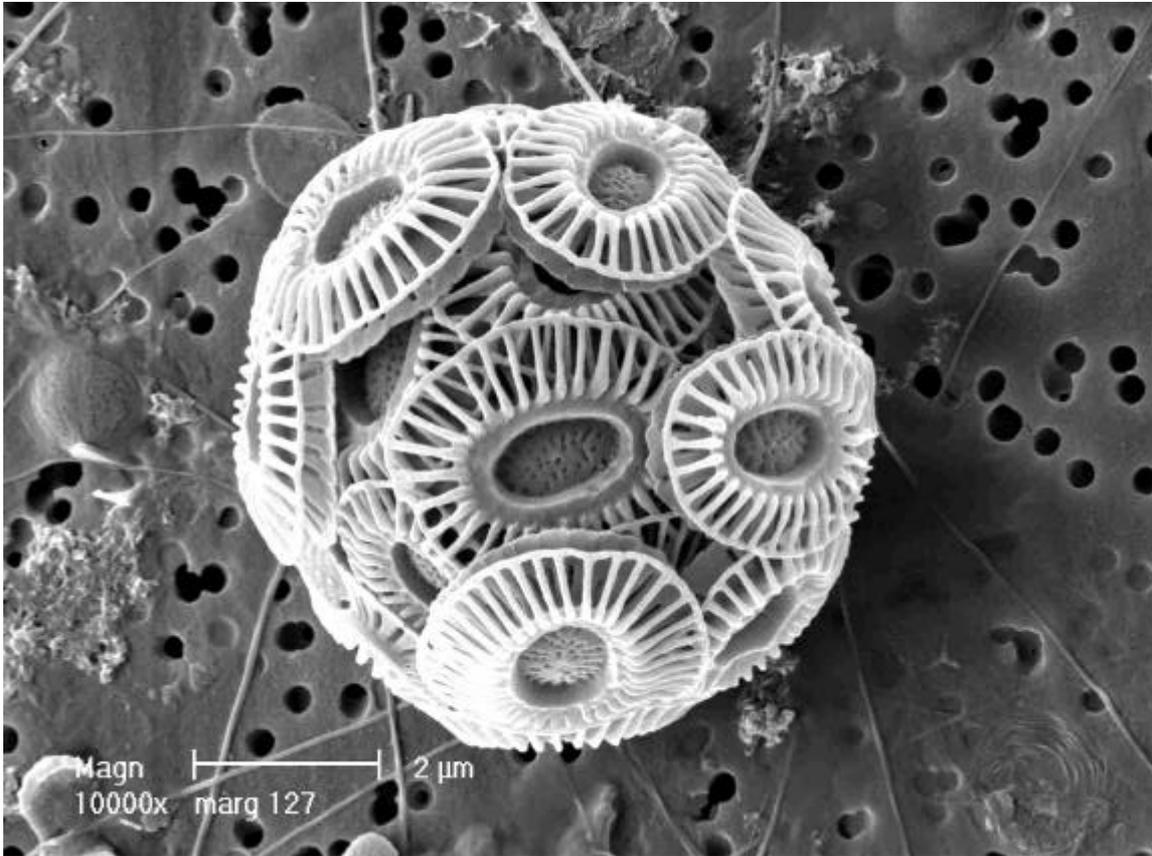
- Biogenes Siliziumdioxid
- Natürliche Nanostrukturen
- Permanentmagnete
- Strontiumanreicherung
- Kalkskelette
- Perfektionierte optische Systeme

Frage:

Was ist die Verbindung zwischen ländergroßen Gebieten aus helltürkischem Meerwasser, der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre und den weißen Kreidefelsen in England ?



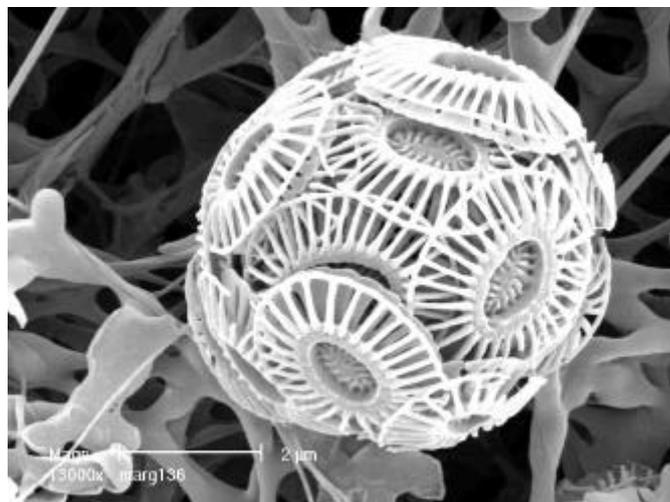
Antwort: Coccolithophoriden



Emiliana huxleyi, © Jeremy R. Young,
Palaeontology Department, The Natural History Museum, London.

Coccolithophoriden

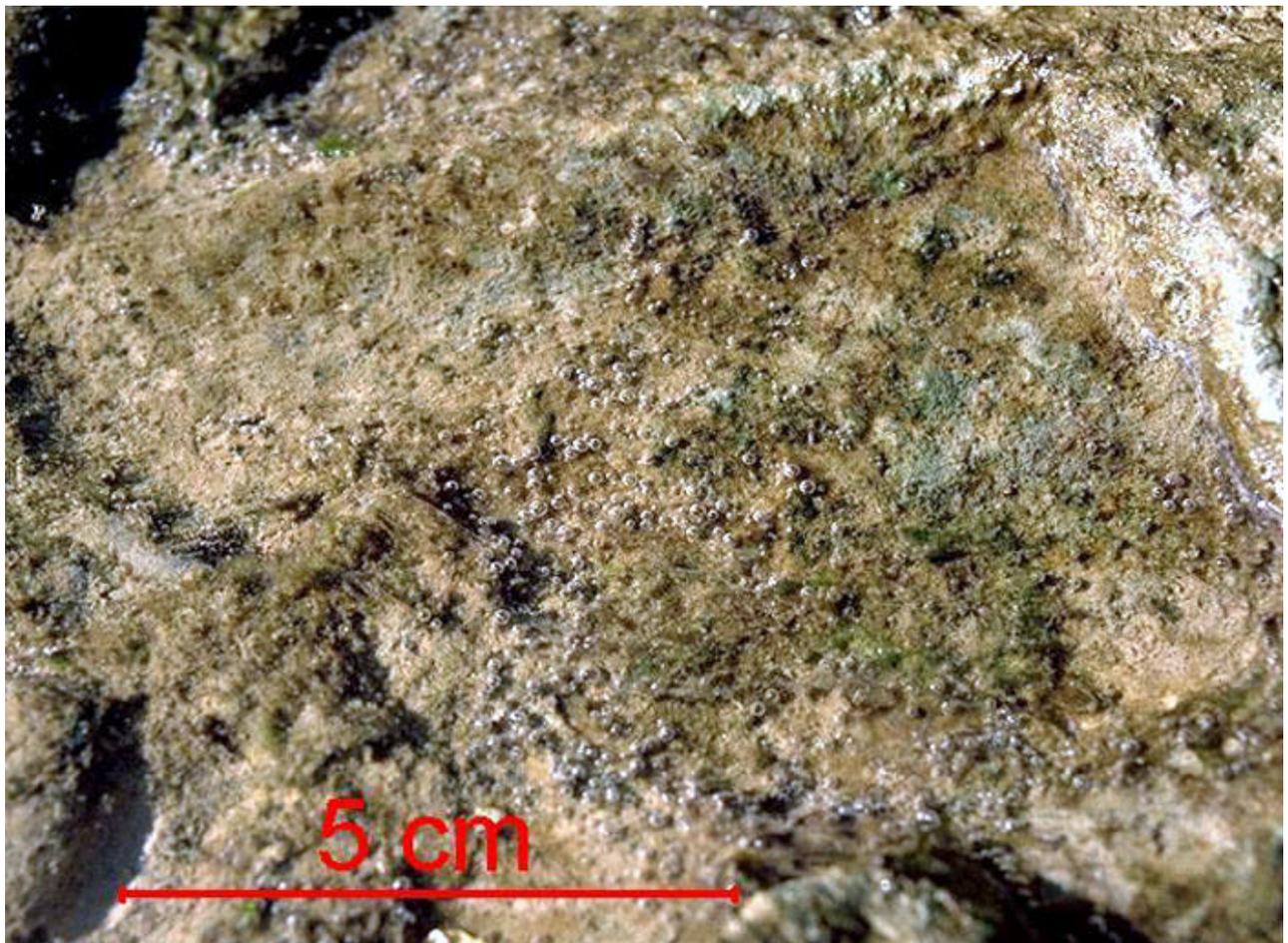
- Coccolithophoriden sind einzellige Pflanzen.
- Die Größe der Coccolithophoriden beträgt einige wenige Mikrometer (d.h., sie zu klein, um mit dem Lichtmikroskop gesehen zu werden !).
- Coccolithophoriden sind weitverbreitet in den oberen 100 Metern aller nicht zu kalten Meere.
- Coccolithophoriden sind runde Organismen, die mit einem Panzer aus ca. 30 scheibenförmigen Coccolithen bewaffnet sind.
- Die kalkhaltigen Coccolithen sind zwischen 3 und 15 μm groß. Ein Stecknadelkopf hat 2000 μm Durchmesser.
- Die Masse eines einzelnen Coccoliths ist 1.8 pg. Ein Picogramm (pg) ist 10^{-12}g , das ein Millionstel eines Millionstel Gramms ($10^{-6} * 10^{-6}\text{g}$).
- Im versteinerten Zustand formen die Coccolithen Kreide- und Kalklagerstätten.
- Coccolithophoriden produzieren mehr als 1.5 Millionen Tonnen Kalk pro Jahr, das macht sie zu den führenden Kalkproduzenten im Meer.



Biominalisation

- Lebewesen erzeugen ungefähr 70 verschiedene anorganische Substanzen, wie z.B. Calcit, Magnetit, Glas, Kalziumphosphat und Stroniumsulfat.
- Biominalisation bezeichnet die Bildung von anorganischen Materialien in Lebewesen.
- Wir wissen gegenwärtig nur, dass die Biominalisation von organischen Molekülen (z.B. Proteinen) gesteuert wird.
- Diese hochspezifischen organischen Substanzen bestimmen unter anderem die Form und Orientierung der Kristalle im Organismus.
- Die Gesamtmenge der organischen Moleküle im Biominal betragt fast immer ungefähr 0.5%. Bei zuviel „Bioanteil“ wird das Biominal zu weich, bei zu wenig „Bioanteil“ ist anscheinend nicht mehr genügend Kontrolle über das Wachstum des Biominals gegeben.

BRAUNER SCHLEIM



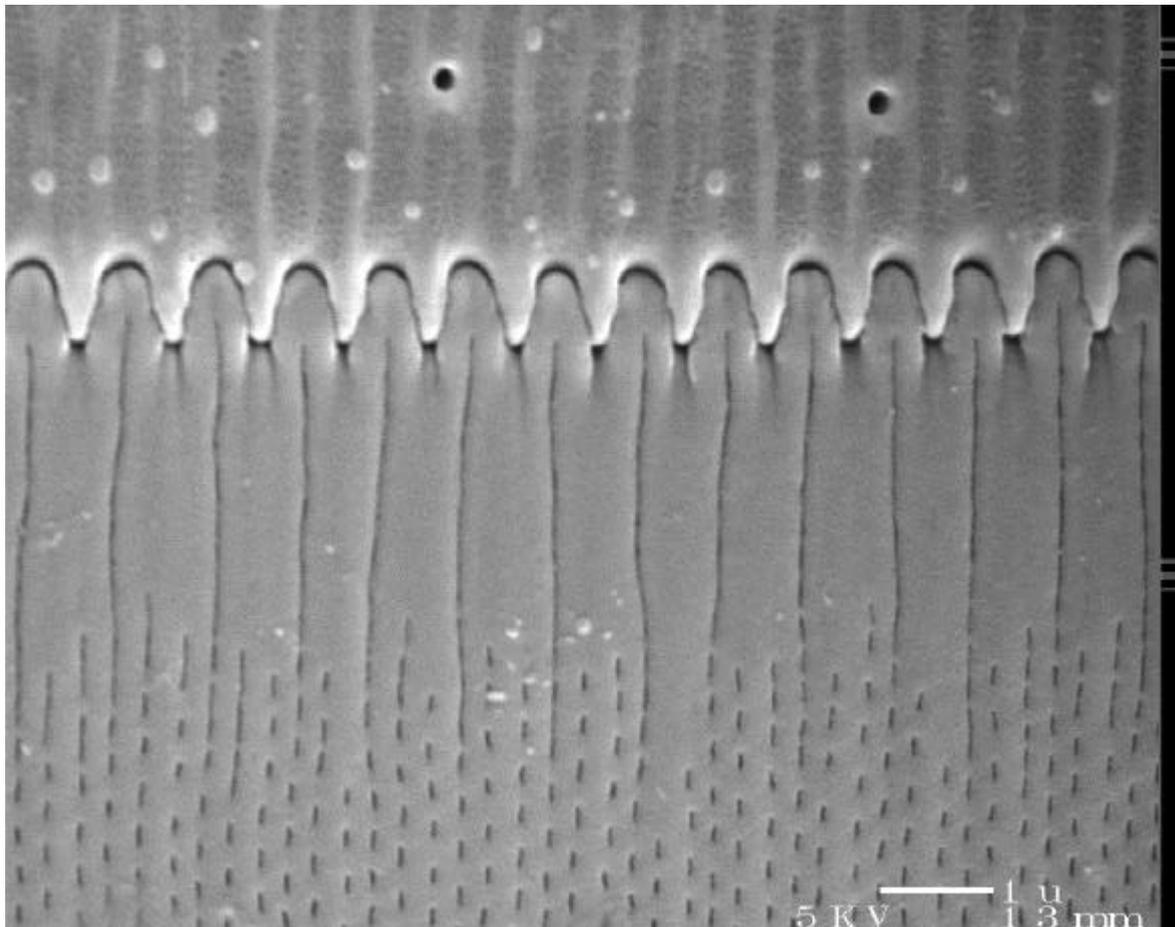
http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/images/buwal/gf/msk/kieselalgenbewuchs_awel.jpg

BRAUNER SCHLEIM IM LICHTMIKROSKOP



http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/images/buwal/gf/msk/kieselalgen_lebend_awel.jpg

BRAUNER SCHLEIM IM RASTERELEKTRONENMIKROSKOP



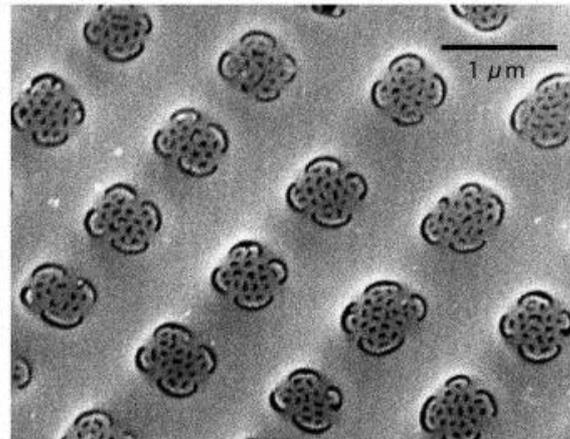
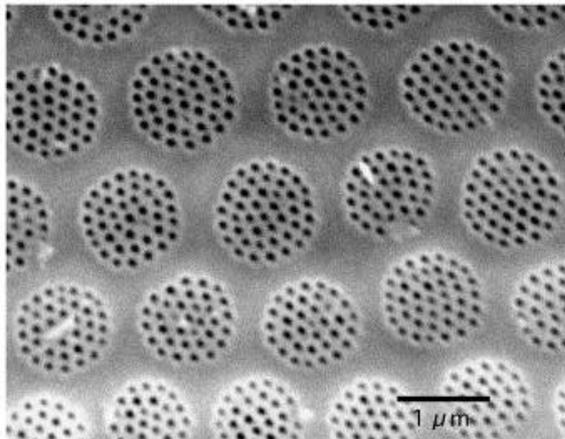
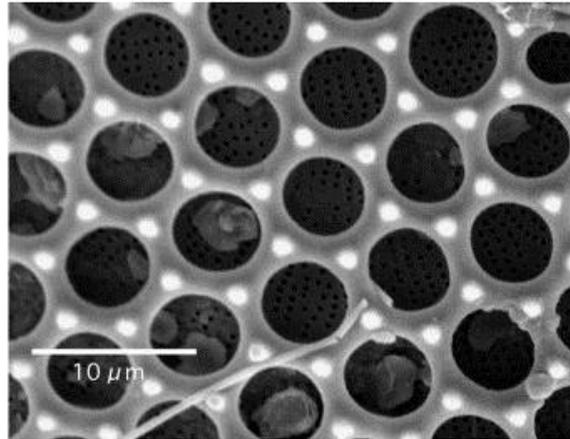
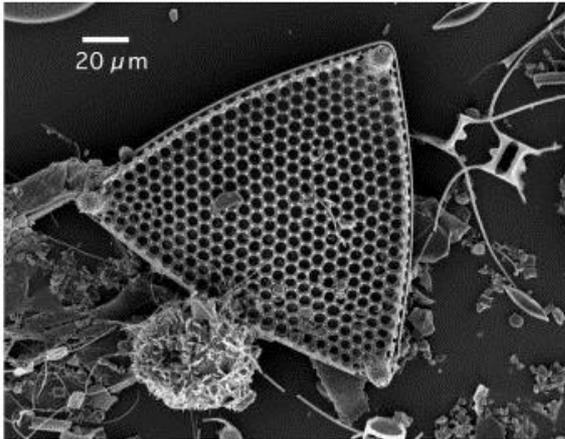
Microman, komplett mit Augen, Zähnen und Bart ☺

Ellerbeckia arenaria, eine Kieselalge aus einem Salzburger Wasserfall, freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Frau Prof. Schmid, Universität Salzburg. Diese Alge ist mit mir von Wien nach Los Angeles geflogen, ins Death Valley und nach Las Vegas gereist, zur Golden Gate Bridge und nach LA. Das hat sie alles überlebt. Harte kleine Dinger.

KIESELALGEN

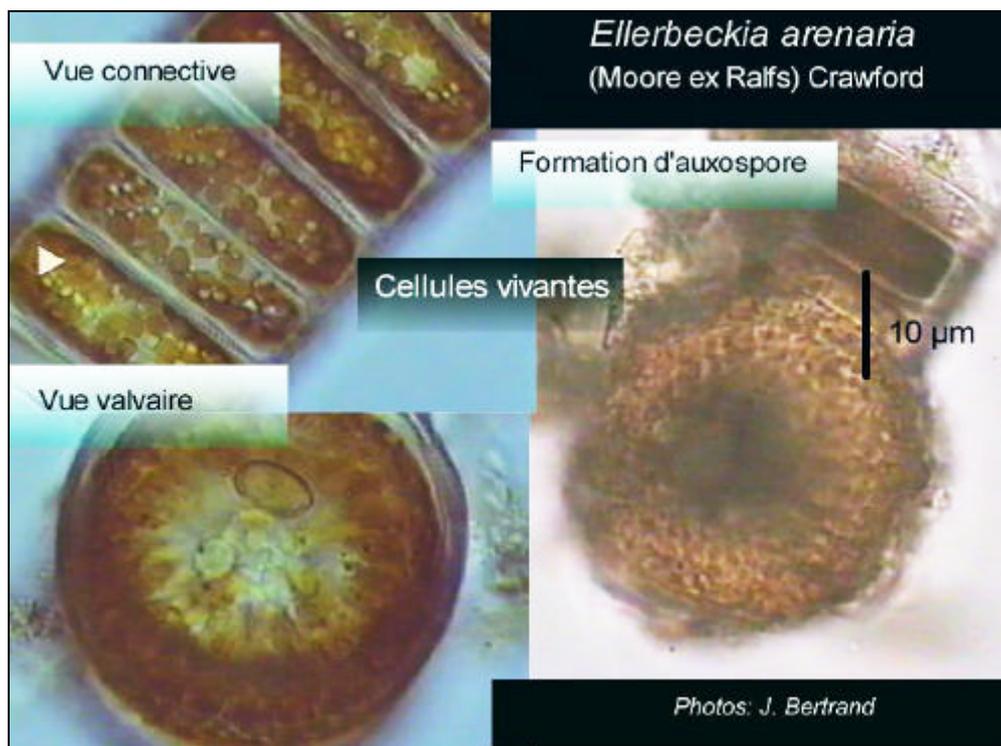
- Diatomeen oder Kieselalgen sind einzellige Pflanzen, die sich durch Zellteilung vermehren.
- Es gibt über 100 000 verschiedenen Arten, die alle unterschiedlich aussehen.
- Kieselalgen produzieren sind die nicht nur die wichtigsten Biomasse- und Sauerstoffproduzenten im Wasser, sondern ihre Strukturen aus Glas (Kieselerde, Siliziumdioxid) zeichnen sich auch durch Vielfaltigkeit und Schönheit aus.
- Die Größe der Kieselalgen liegt zwischen einem Mikrometer und einigen Millimetern.
- Kieselalgen können sich auch rasant schnell vermehren. Von einer einzigen Kieselalge können in 10 Tagen über eine Milliarde ähnlich gestaltete Zellwandstrukturen entstehen.





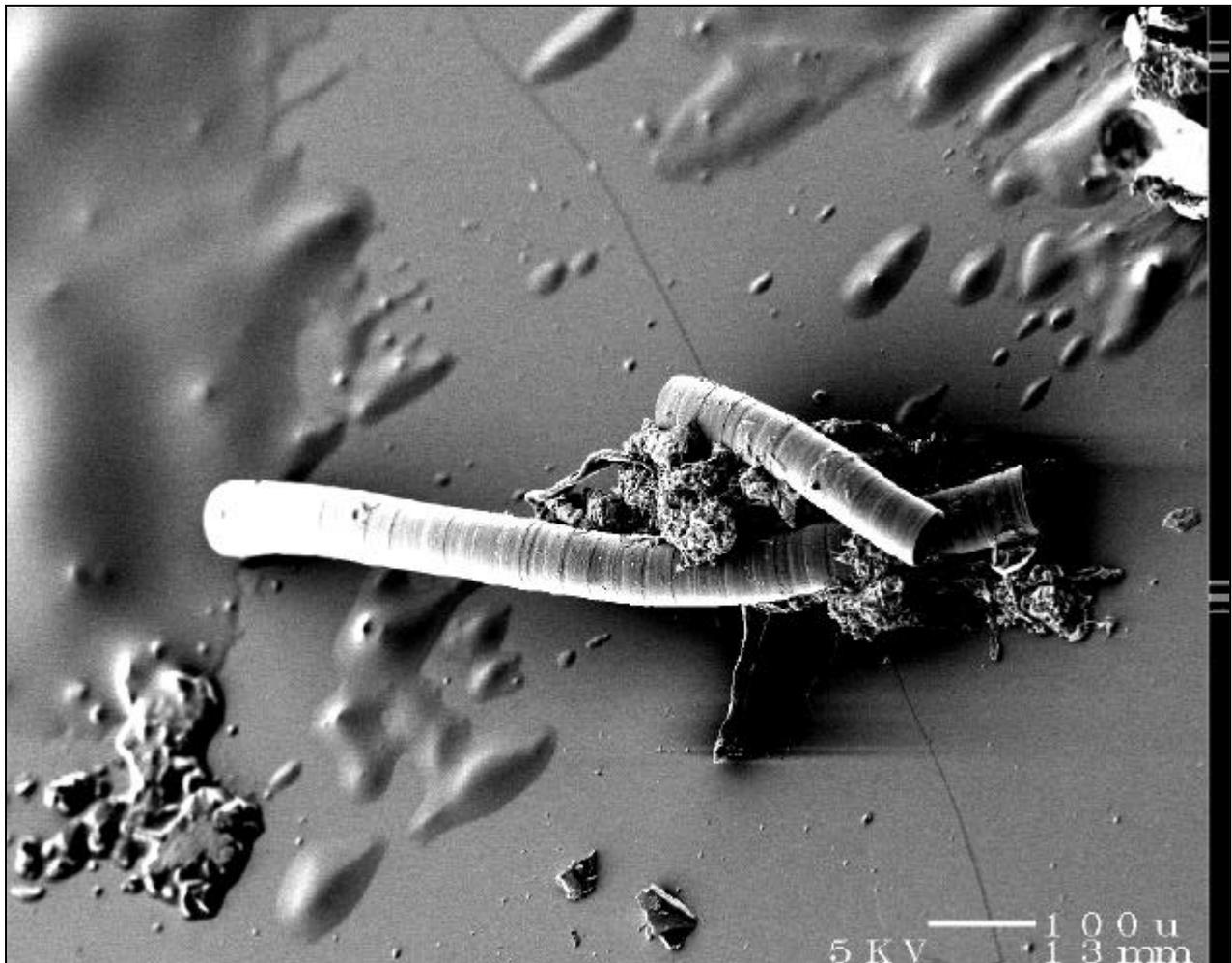
Ellerbeckia arenaria

- *E. arenaria* ist eine Süßwasserkieselalge, die z.B. in Wasserfällen vorkommt.
- Die einzelnen Algen bilden Kolonien, die Millimeter lang werden können.
- Man kann diese Algenverbände ca. aufs doppelte ihrer Länge ausdehnen.
- Wenn man wieder loslässt, benimmt sich der Algenverband wie ein Gummiband, das gezogen wurde → er schnell zurück in die ursprüngliche Lage.



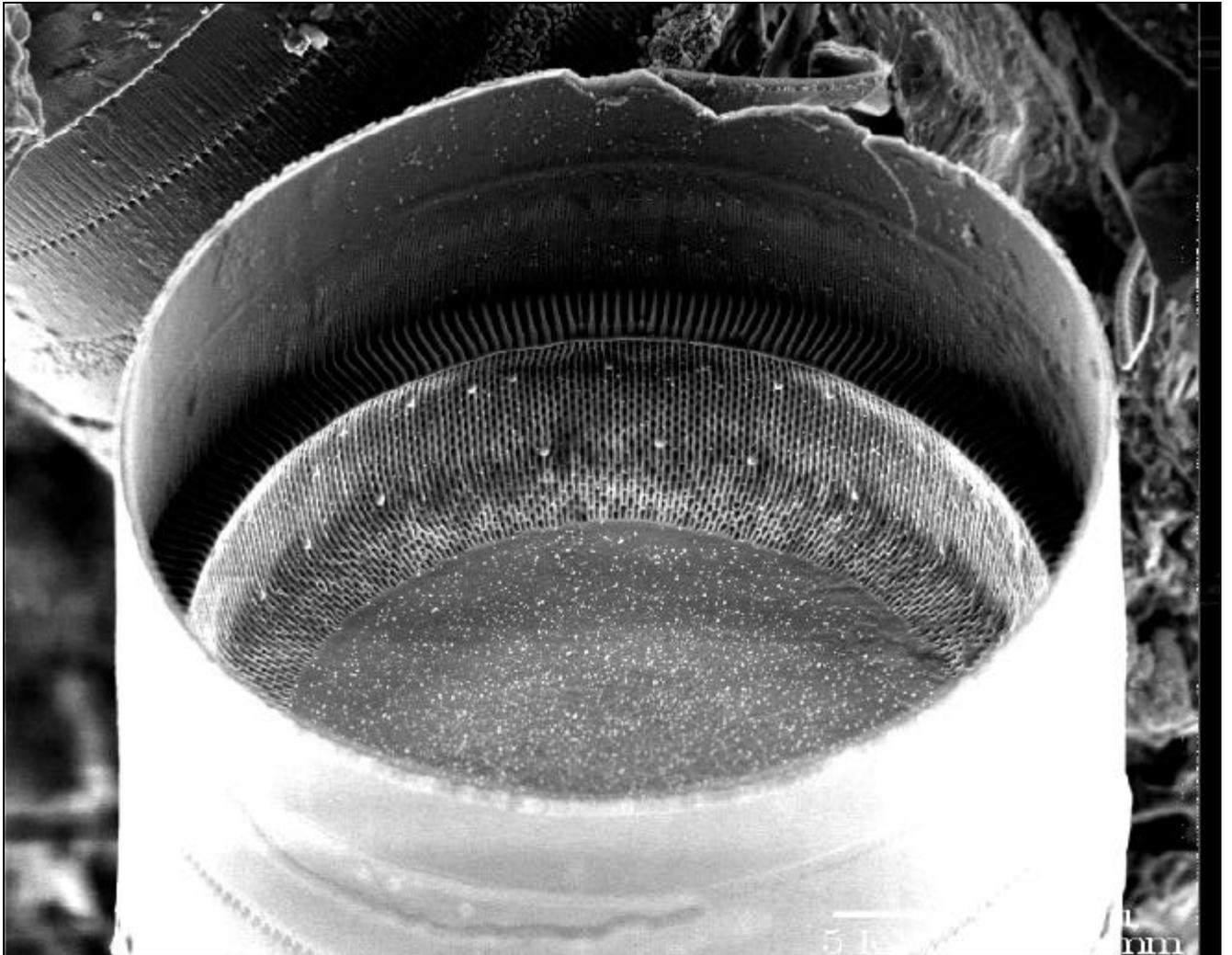
Die folgenden Bilder zeigen einen Zoom mit dem Rasterelektronenmikroskop in diese Kieselalgen.

- Die Algen wachsen in langen Strängen.
- Die zwei Stränge hier sind mit Gold bedampft, damit man sie im Rasterelektronenmikroskop sieht.
- Sie befinden sich auf elektrisch leitfähigem Carbontape.
- Diese Algen wurden uns freundlicherweise von Frau A.M. Schmid der Universität Salzburg zur Verfügung gestellt.



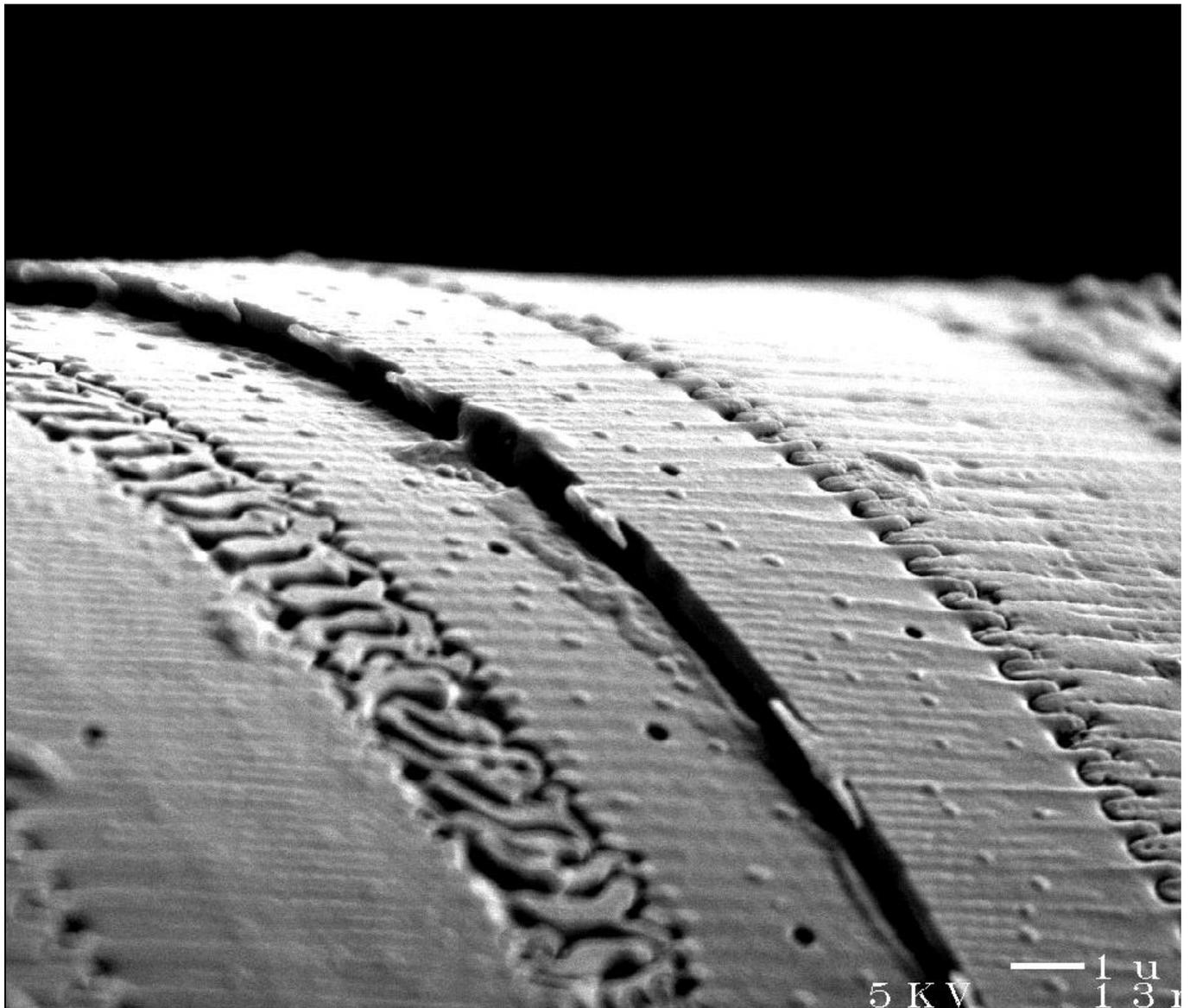
Scalebar (Länge des weissen Balkens): 100 μ m, das sind 0.1 mm, also ein Zehntel eines Millimeters.

- Bei noch mehr Vergrößerung sieht man von oben in eine leere Algenschale hinein.

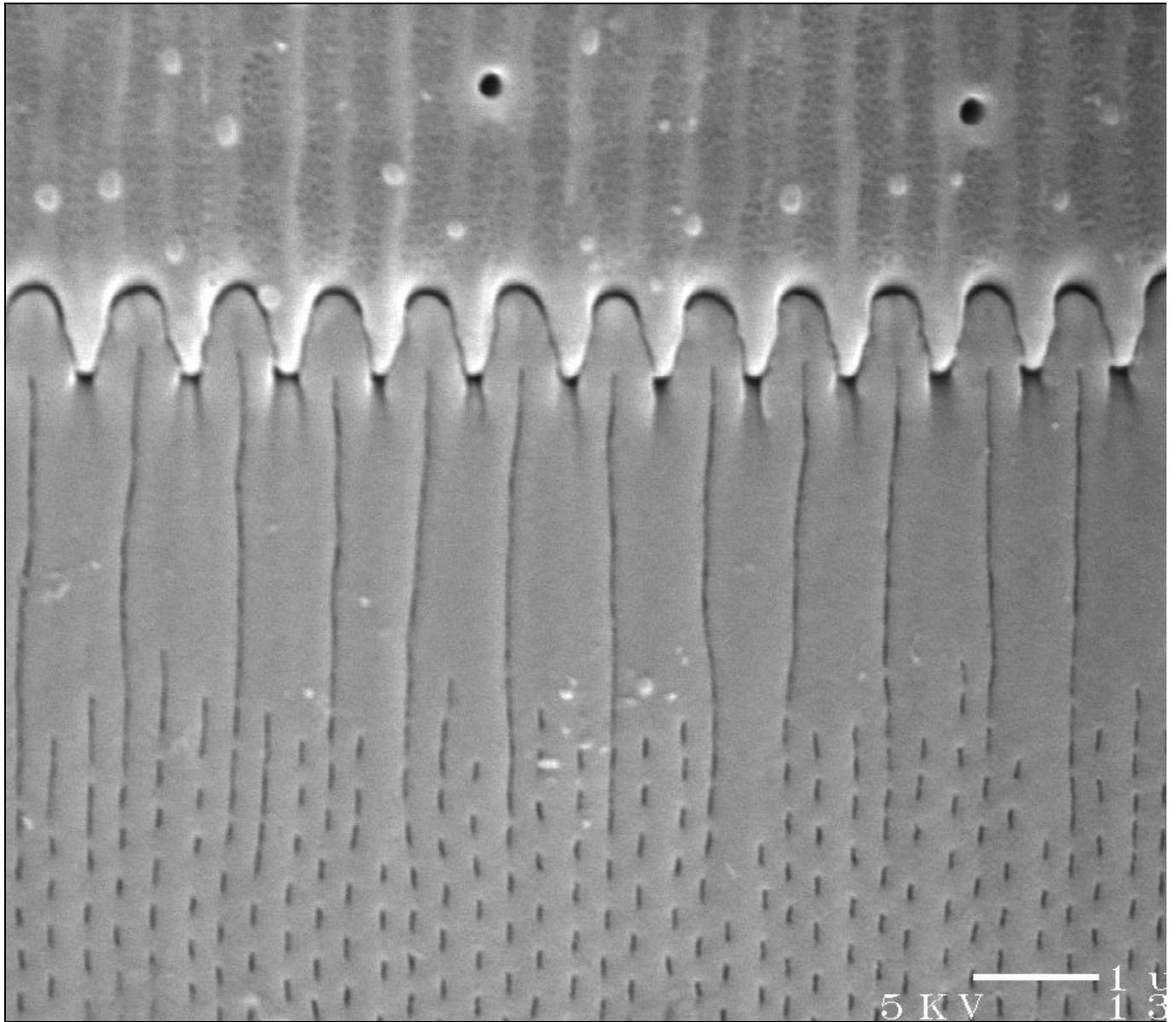


Scalebar (Länge des weissen Balkens): 10 μm , also 0.01 mm, d.i. ein Hundertstel eines Millimeters.

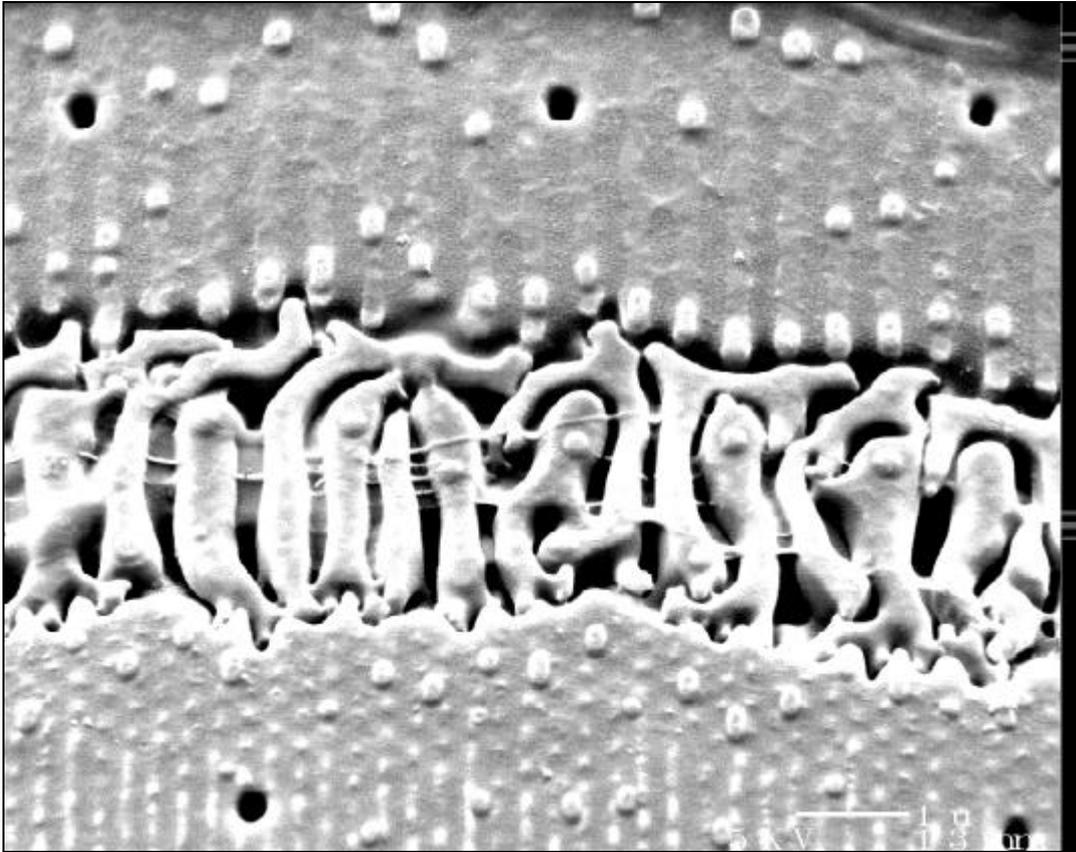
- Bei noch mehr Vergrößerung (jetzt entspricht der Scalebar nur mehr einen Mikrometer, also einem Tausendstel Millimeter) sieht man wunderschöne Detailansichten der Glashülle der Kieselalge *E. arenaria*.



Der Mikromann, komplett mit Augen, Zähnen und Bart:



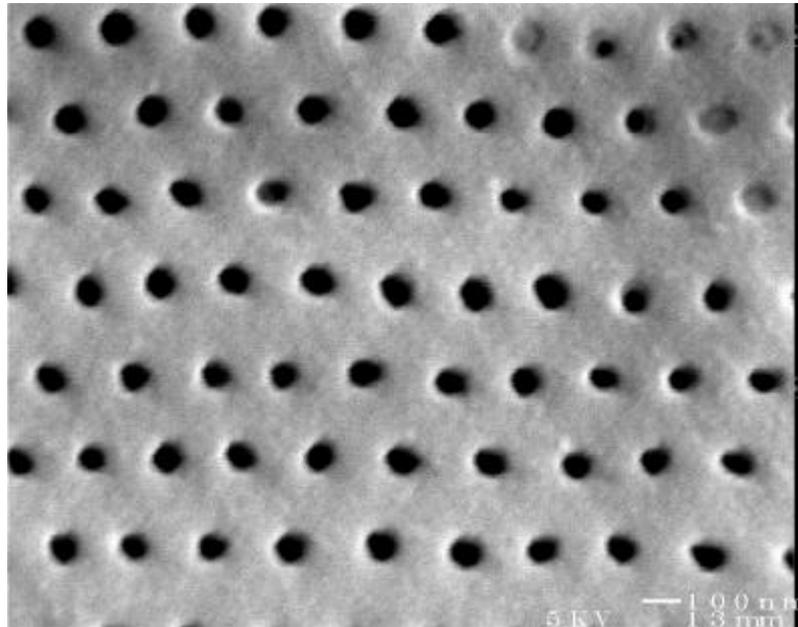
Ein Mantra, von der Natur in Glas geschrieben:



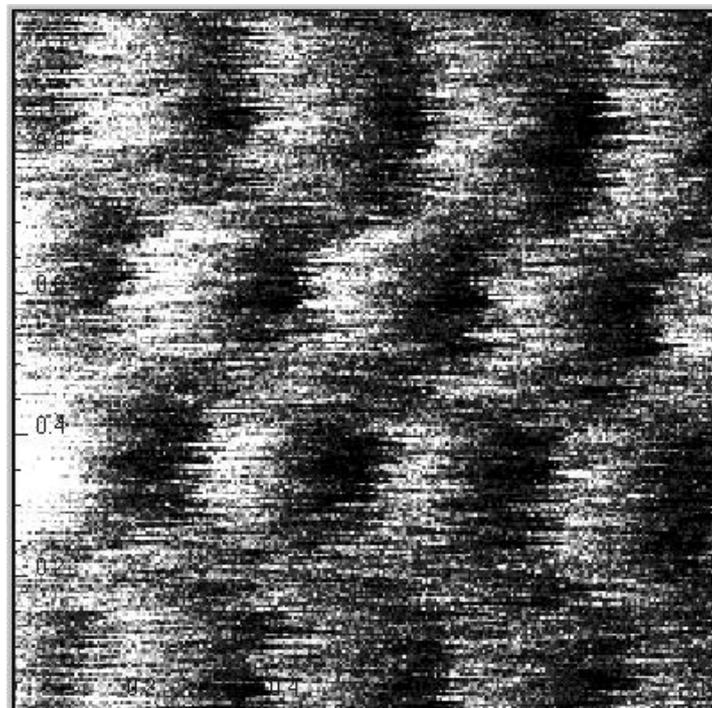
Eines der ältesten Gebete der Welt, das gayatri Mantra, geschrieben in Sanskrit, dem ältesten Alphabet der Welt:

ॐ भूर्भुवः स्वः
ॐ तत्सवितुर्वरेण्यं भर्गो देवस्य
धीमहि धियो यो नः प्रचोदयात् ।

Ein fast perfektes hexagonales Gitter in Glas:



Zum Vergleich: Graphitatom, visualisiert mit meinem Rasterkraftmikroskop an der Techn. Univ. Wien:

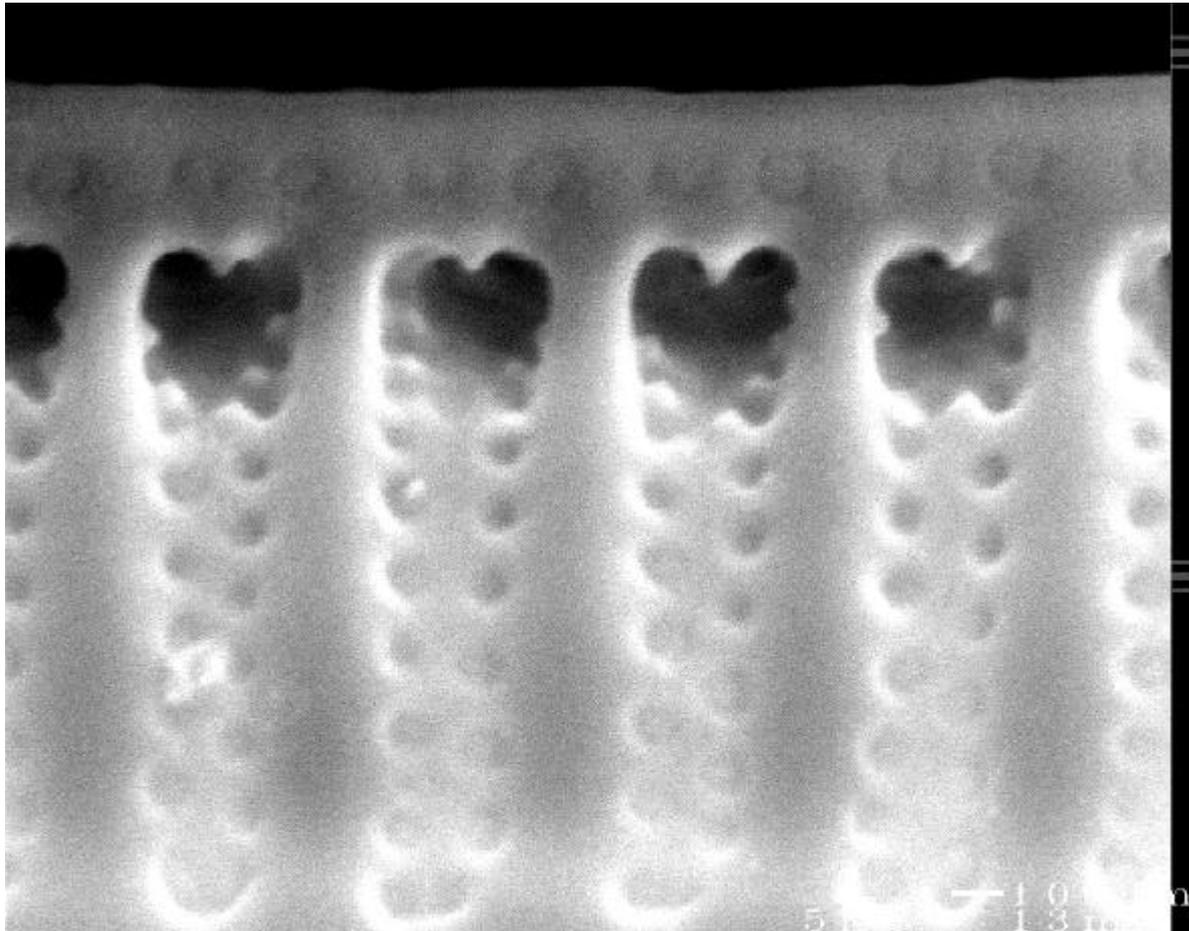


Dieses Bild ist einen Quadratnanometer klein. Der Querschnitt eines Haares beträgt 1 900 000 000 Quadratnanometer.

HERZEN AUS GLAS

zerbrechlich & wunderschön

Diese mir unbekannt Kieselalge befand sich in der *E. arenaria* Probe, die mir Frau Schmid aus Salzburg dankenswerterweise zur Verfügung gestellt hat.

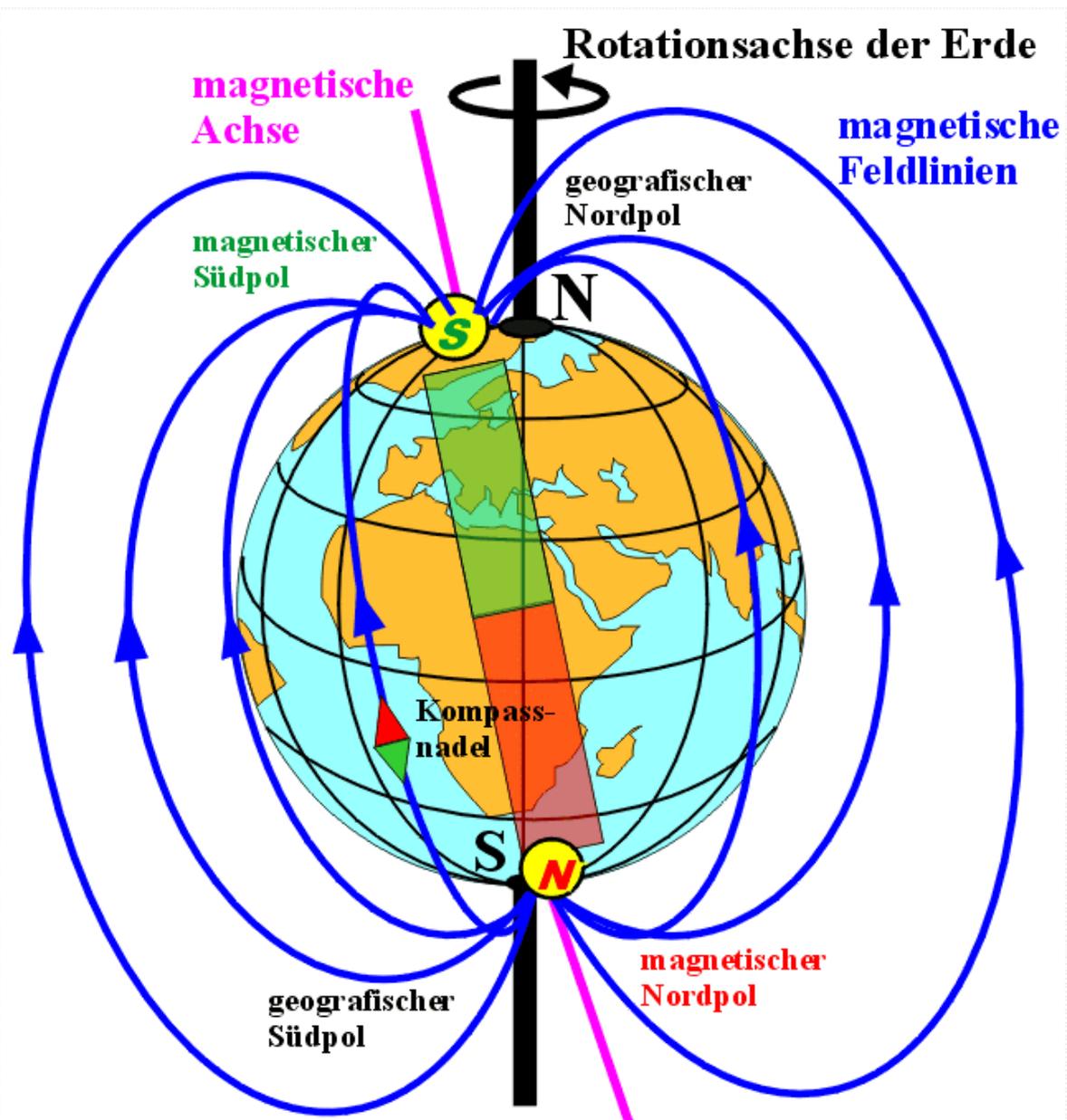


© James Weaver & Ille Gebeshuber, UCSB, 2000
Algae donation by A. M. Schmid, University of Salzburg, Austria.

MAGNETISCHE BAKTERIEN

- Magnetische Bakterien sind in Seen und Meeren weitverbreitet.
- Magnetische Bakterien lassen sich wie eine Kompassnadel durch ein Magnetfeld ausrichten.
- Man findet magnetische Bakterien leicht in Sedimenten, besonders in den oberen sauerstofffreien Schichten. Interessanterweise wandern sie auf der Südhalbkugel bevorzugt nach Süden, während die auf der Nordhalbkugel vorkommenden sich nach Norden orientieren.
- Diese Bakterien produzieren magnetische Kristalle (Magnetosome, bestehend aus Eisenoxid - Fe_3O_4 oder Eisensulfid - Fe_3S_4) mit Hilfe derer sie sich im (Erd-) Magnetfeld orientieren.
- Die Magnetosome sind zwischen 30 und 120 Nanometer (nm) groß. Ein Nanometer (10^{-9} m) ist ein Millionstel Millimeter ! Der Durchmesser eines menschlichen Haares beträgt 100 000 Nanometer.
- Magnetosome sind perfekte Kristalle ohne jede Fehlstelle.
- Die einzelnen Magnetosome sind groß genug um ein permanentes magnetisches Moment zu haben, und gleichzeitig klein genug, um Einzeldomänenmagnete zu sein. Die Kombination dieser zwei Fakten macht Magnetosome zu den stärksten möglichen Magneten ihrer Größe !

Magnetfeld der Erde und die Kompassnadel:

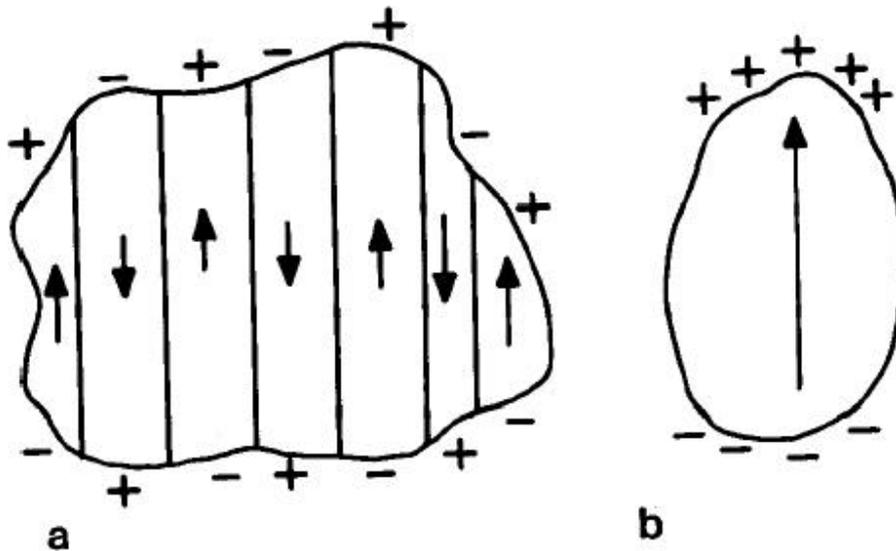


Die Erde hat die magnetische Wirkung eines großen Stabmagneten.

Der **magnetische Nordpol N** befindet sich in der Nähe des geografischen Südpols S, der **magnetische Südpol S** in der Nähe des geografischen Erd-Nordpols N.

Der **Kompassnadel-Nordpol** zeigt immer **in Feldlinienrichtung** (Bogen) **zum magnetischen Südpol**.

Magnetische Domänen



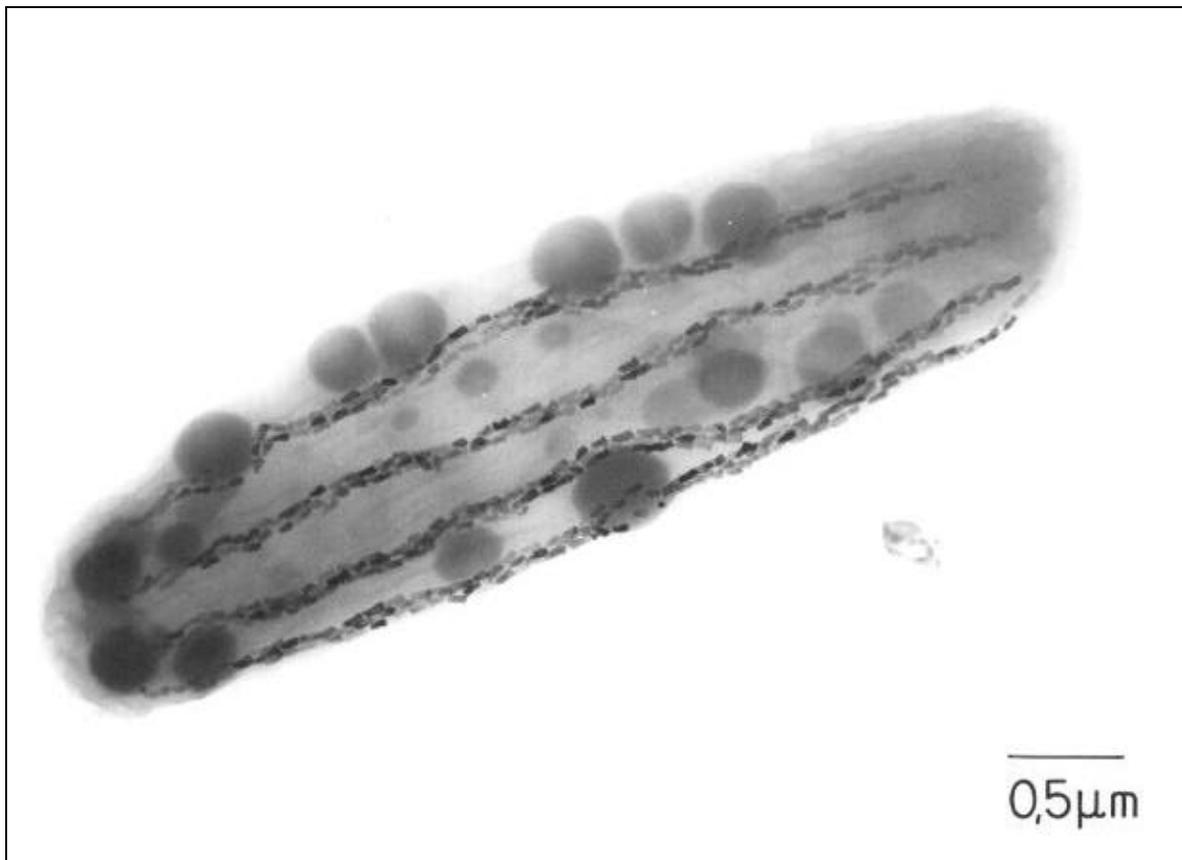
Kleine magnetische Kristalle haben nur eine einzige magnetische Domäne (rechtes Bild). D.h., alle magnetischen Momente sind parallel angeordnet. Damit ist dieser Magnet so stark als nur irgendsmöglich. Magnetite in magnetischen Bakterien sind solche Einzeldomänenkristalle

In größeren Kristallen erscheinen aus Gründen der Energiminimierung mehrfache magnetische Domänen. Diese Mehrfachdomänen reduzieren das gesamte magnetische Moment des Kristalls.

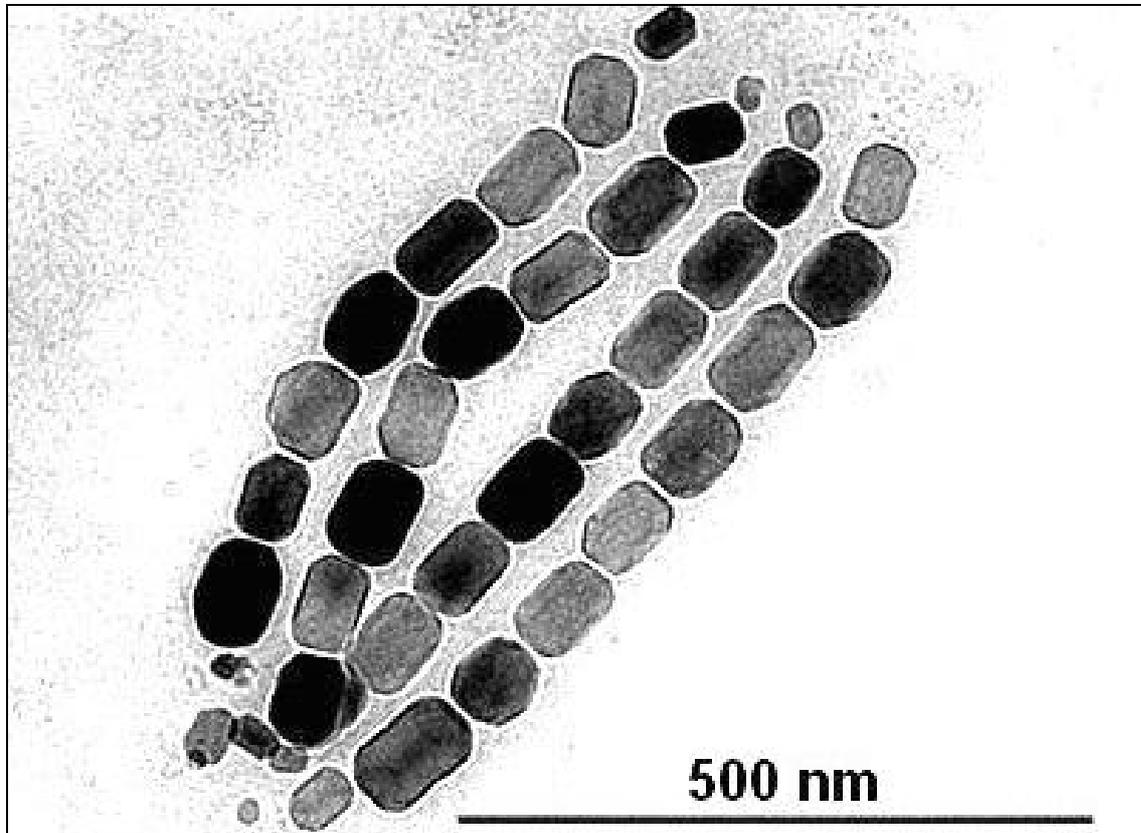
Literatur: Blakemore RP (1975) Magnetotactic bacteria, *Science*, 190:377-379

EINE REISE INS INNERE EINES MAGNETISCHEN BAKTERIUMS

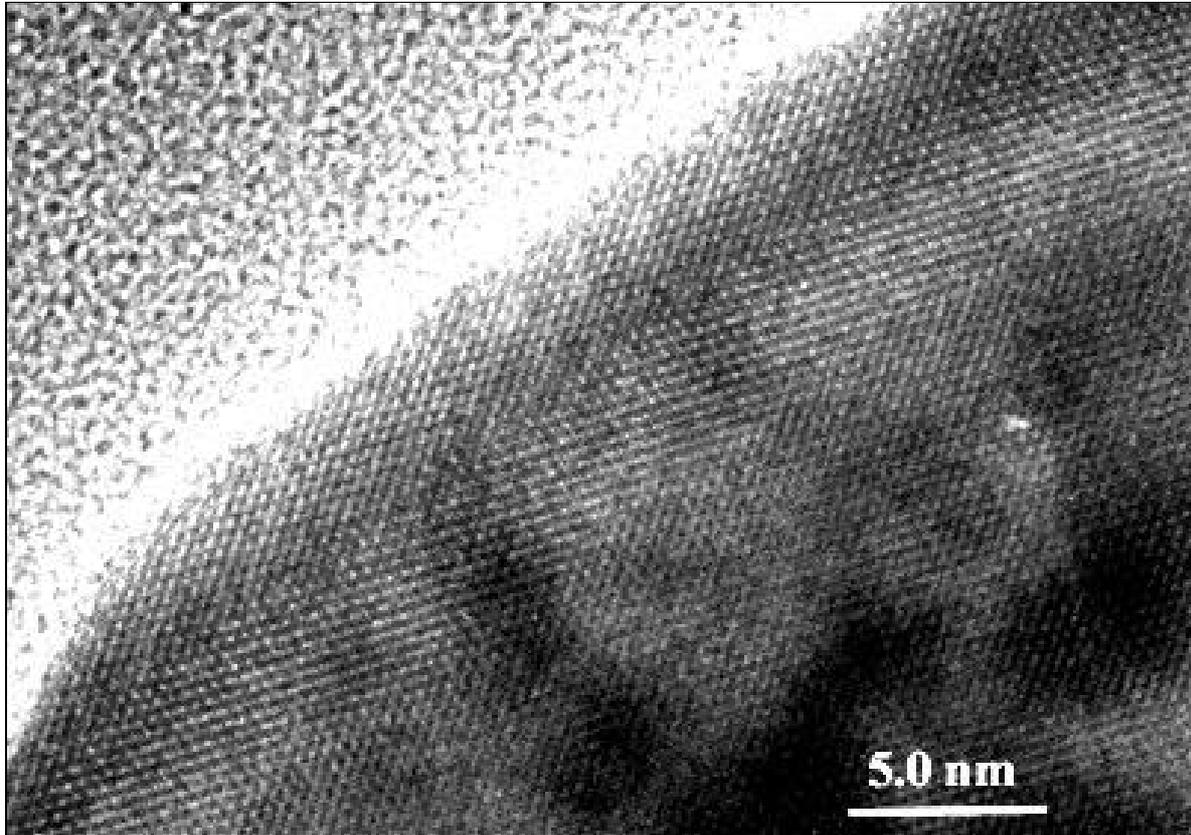
magnetisches Bakterium mit Magnetosomsträngen:



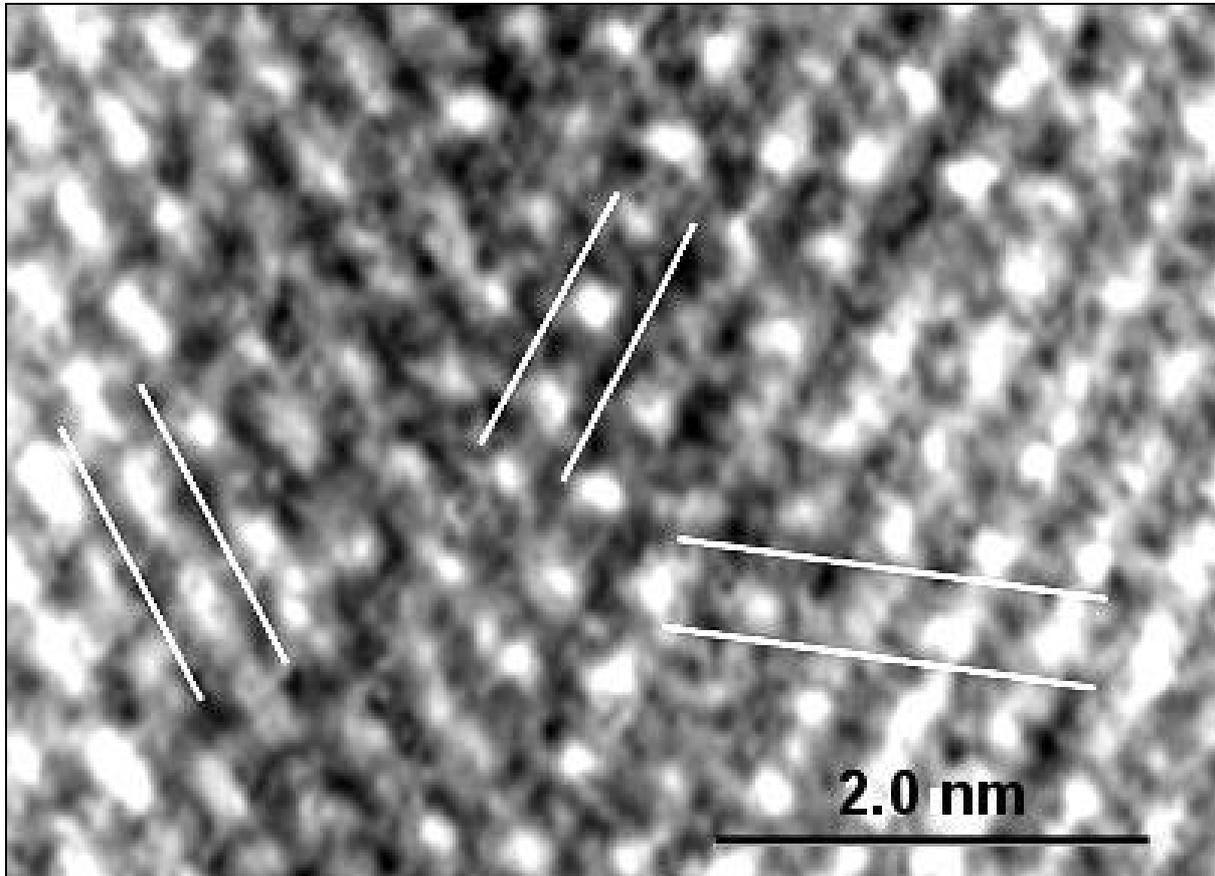
Vergrößerung der Magnetosomstränge:



Magnetosom Netzebenen:



Atomare Reihen aus Magnetit:



Magnetic bacteria

Cells of this ubiquitous and diverse group of motile, mainly aquatic microbes synthesize magnetosomes which are intracellular, membrane-bounded, single-magnetic-domain crystals of a magnetic mineral, either magnetite (Fe_3O_4) or greigite (Fe_3S_4). These crystals impart a permanent magnetic dipole moment to the cell causing it to align along magnetic field lines, like a compass needle, as it swims; a phenomenon called magnetotaxis. In many MB, magnetotaxis, in conjunction with aerotaxis, appears to function as a means for cells to locate and maintain an optimal position (the oxic-anoxic interface) in vertical O_2 and/or redox gradients in natural habitats by reducing a 3-dimensional search problem to a 1-dimensional search problem.

Recently ribosomal RNA comparisons have shown that the two groups are NOT closely related. The development of their ability to construct iron-based particles for magnetaxis is currently being explained in terms of convergent evolution. Fe_3S_4 Greigite is magnetic, but only a third as magnetic as magnetite.

One unusual magnetotactic bacterium makes both magnetite and greigite magnetosomes. Bazylinski and others found it in the Pettaquamscutt River estuary. Each particle contains only one type of mineral, but both types of particles are arranged in each of its two chains. This 3-micron, cigar-shaped, slow-moving bacterium appears to be unique in producing both kinds of magnetosomes, and since it is found in both microaerophilic and anaerobic environments, the type of magnetic mineral it produces may depend on how much oxygen is in its environment at the time.

Although little is known about the biochemistry and chemistry involved in magnetosome synthesis, the narrow size (~35–120 nm) distributions, the species-specific morphologies, and the pure chemical compositions of the mineral crystals in the MB and the fact that most MB organize their magnetosomes in chains within the cell indicate that the MB use a precise biologically-controlled mineralization process in synthesizing the magnetosome mineral phase. Some elongated Fe_3O_4 particle morphologies appear to be unique to the MB and have never been

observed in abiotically synthesized Fe_3O_4 particles. Dead cells eventually release their mineral crystals in the surrounding environment (e.g., sediments) as “magnetofossils” that have been used as evidence of the past presence of MB.

In addition, magnetosomes are often an unusual shape. Natural crystals of magnetite and greigite tend to be roughly round (cubo-octahedral if you want to get technical), whereas magnetosomes are often anisotropic (not regularly shaped) -- and may be elongated, or even tooth- or bullet-shaped, with their long axes along the axis of the chain, indicating that one face of the crystal has grown faster than the others.

In addition, magnetosomes are unusually free of structural defects -- areas where the layers of material added to the developing crystal didn't line up quite right and grew together any old way. This kind of structural defect occurs more often in inorganic, rapidly growing crystals.

Magnetotactic bacteria, common in aquatic and marine habitats, produce and carry the magnetic crystals in a chain. The chain, which looks like a faux backbone under a microscope, acts like a compass as the bacterium swims along Earth's magnetic field lines.

Domain walls have to have a certain thickness -- in magnetite that thickness is about 150 nm (150 nanometers, or 150 billionths of a meter). Particles of magnetic material that are too small to hold a domain wall have to be a single magnetic domain.

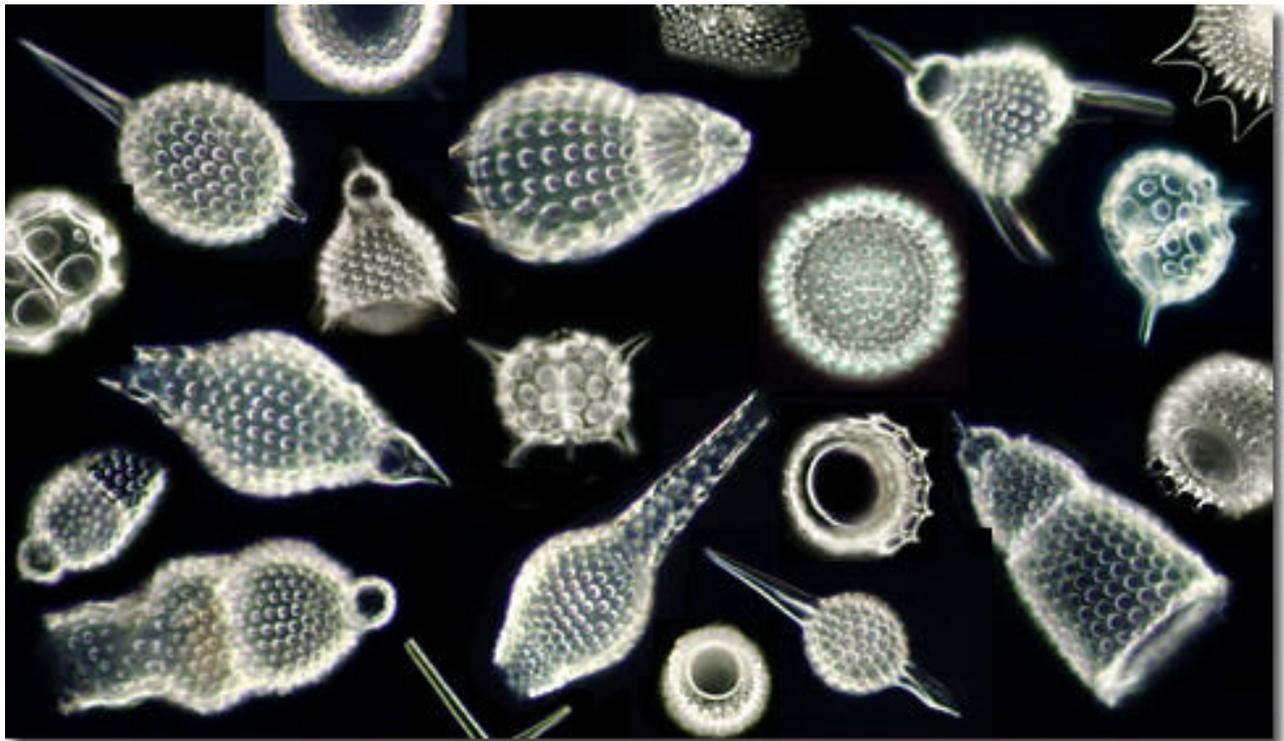
On the other hand, particles that are really small don't have a permanent magnetization of their own -- their magnetic moment is constantly being altered by the thermal motion of their atoms (the slight motion, even in solids, of every atom as a result of its temperature). Magnetotactic bacteria synthesize magnetic particles between 30 and 100 nm in every dimension, big enough to have a permanent magnetic moment, but small enough to be a single domain. This makes the magnetic particles as strong as they can possibly be for their size.

In some cases there is more than one chain of magnetosomes. In cases like these the chains of magnetosomes will repel each other, like two aligned bar magnets placed side by side. Calculations of the forces involved show the chains will press against the sides of the cell, holding each other in place by friction, so that when they orient in an external magnetic field, so does the cell. Cells have been observed with up to five chains of magnetosomes -- at this point the chains of magnetosomes may be acting like boning in a bodice, stiffening the wall of the cell and holding the cell "open."

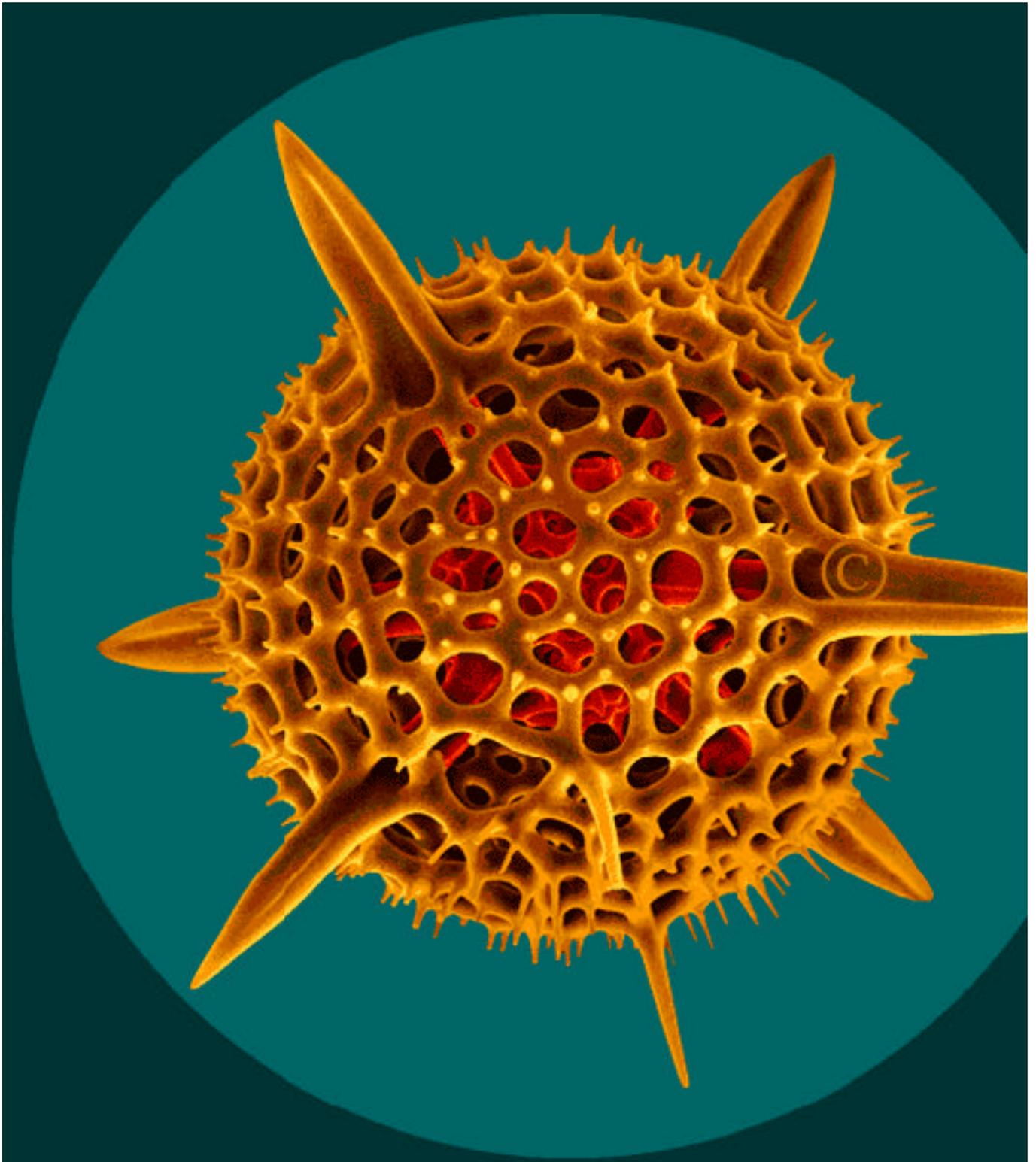
Magnetotactic bacterium with chains of magnetosomes (TEM)
bact11.jpg

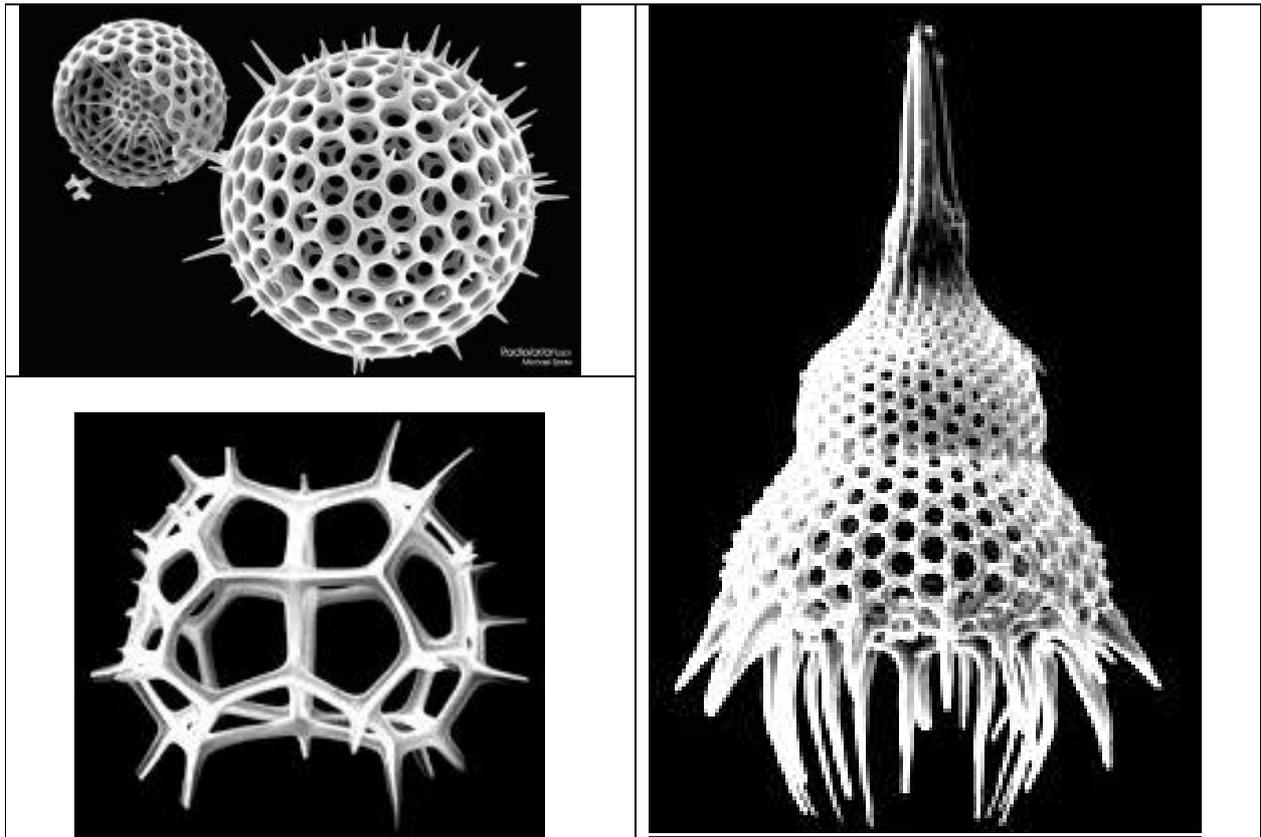
RADIOLARIEN

- Radiolarien sind einzellige Tiere mit einem Skelett aus Kieselsäure bzw. Strontiumsulfat.
- Die Größe der Radiolarien liegt zwischen 30 μm und 2 mm.
- Die Innenskelette sind meist aus Gitterkugeln und radiär abstehenden Stacheln bzw. Nadeln aufgebaut. Es gibt aber auch scheiben- und helmförmige, Gerüste und Plattenkonstruktionen.



© <http://micro.magnet.fsu.edu/micro/gallery/radiolarians/radiolarians.html>





© Kjell R. Bjørklund (links oben und unten), Michael Spaw (rechts)

Literatur: Anderson, O.R., 1983. Radiolaria.
Springer-Verlag, New York, 1-355.

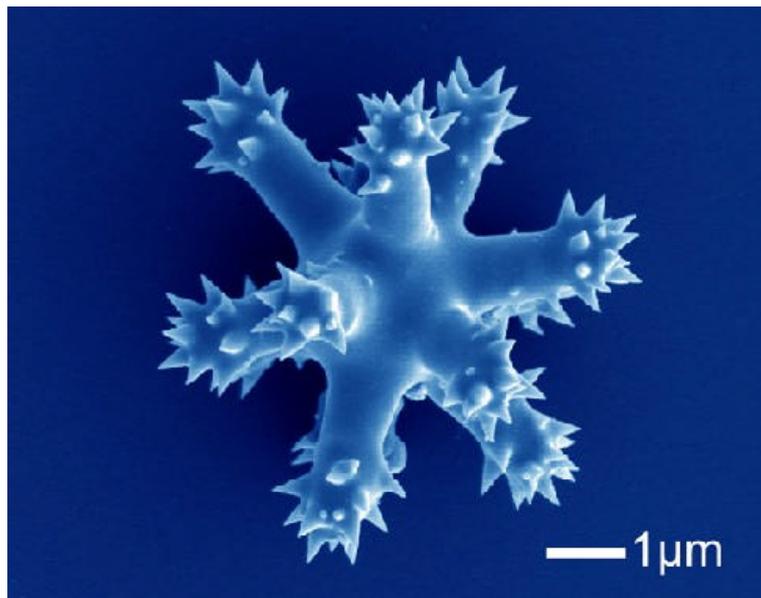
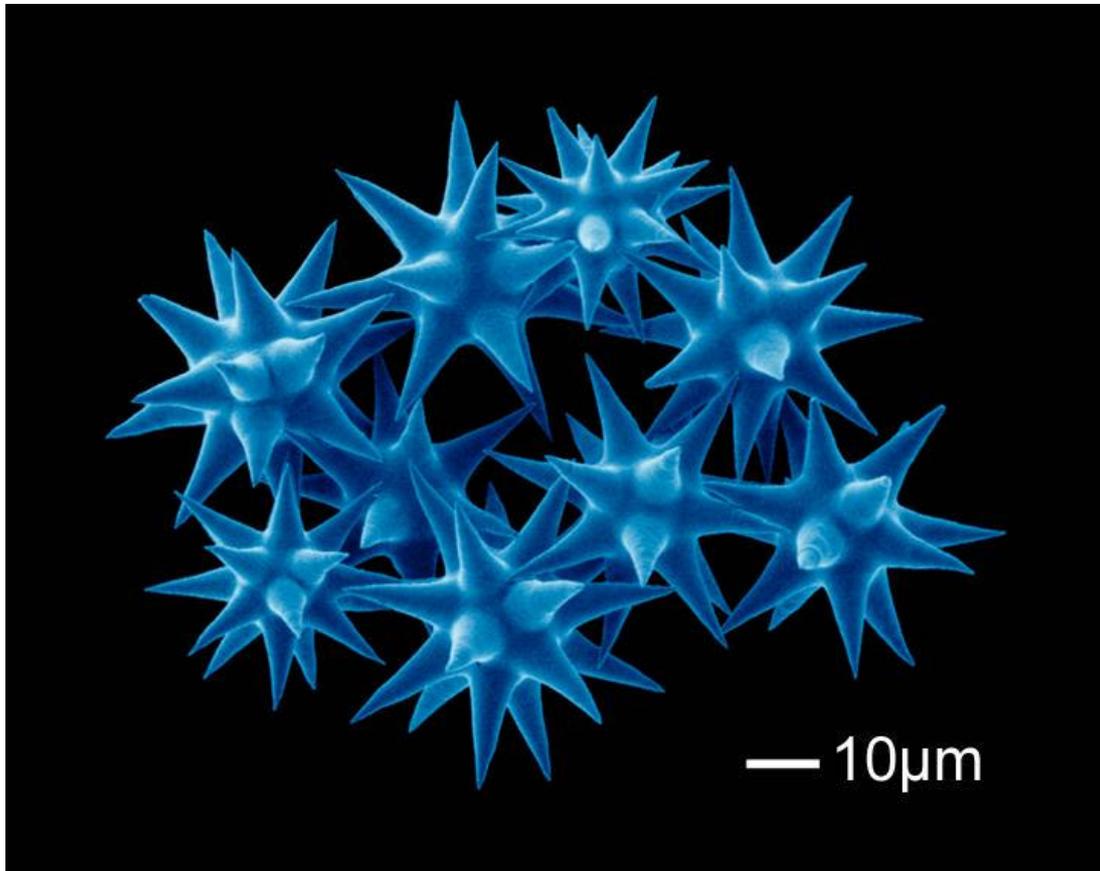
SCHWÄMME

- Schwämme gibt es seit mehr als 600 Millionen Jahren. Sie sind mehrzellige Tiere. Manche Schwämme – aber zum Glück nicht der Badeschwamm ☺ – besitzen Skelettnadeln (Spikulen) aus Kalk (Calcit) oder Glas (Siliziumoxid).
- Es gibt 10 000 verschiedene Arten von Schwämmen, in allen möglichen Farben und Formen.
- Die Größe der Schwämme liegt zwischen einem Zentimeter und zwei Metern, einzelne Spikulen sind einige zehn Mikrometer (μm) groß.
- Die Spikulen bilden das stabile Kalk- oder Glasgerüst, das dem Schwamm seine Festigkeit gibt.



© <http://www.scubapelicano.de/images/fische/schwamm.jpg>

Spikulen des Schwammes Spheraster (Hauptvorkommen Santa Barbara, CA):



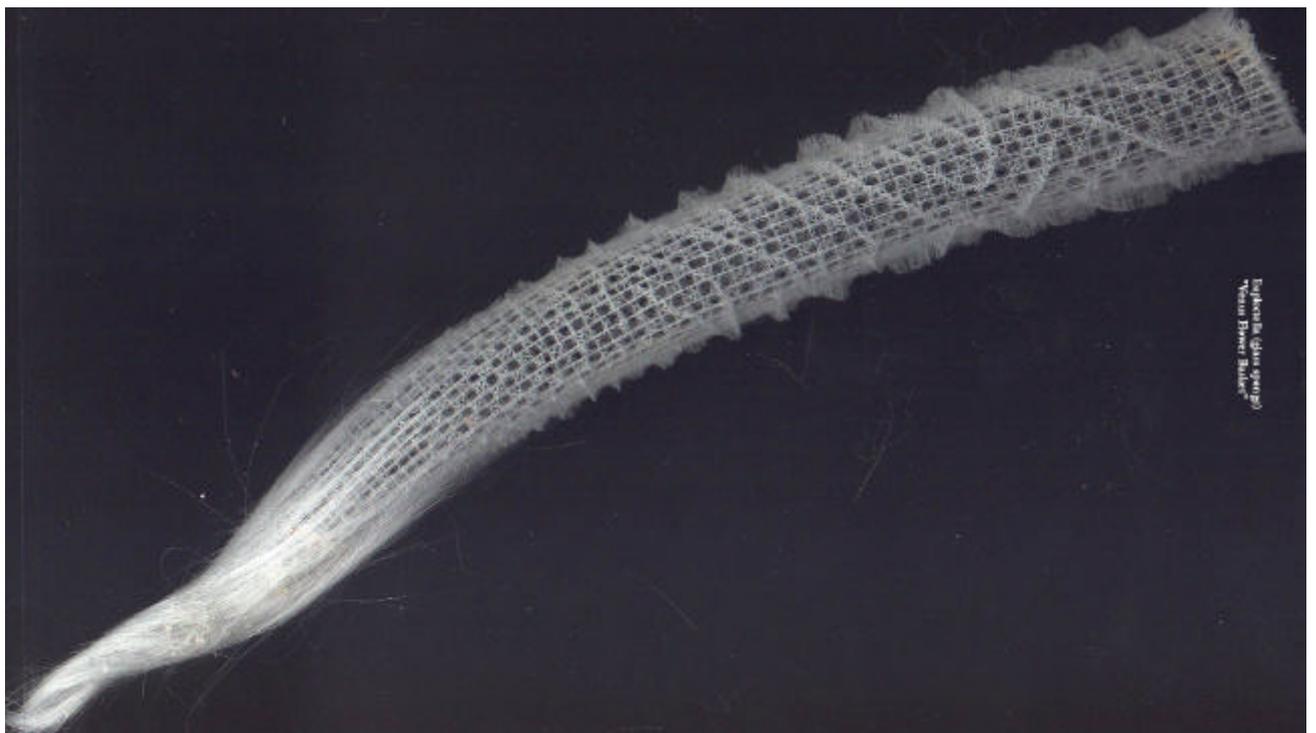
© James Weaver @ UCSB

Ein ganz besonderer Schwamm, der in ca. 200 bis 1000 Meter Tiefe lebt, ist der so genannte Venusblumenkorb.

Zwei kleine, junge Shrimps mit dem wissenschaftlichen Spongiicola schwimmen in den Schwamm, wachsen darin auf und können ihn nicht mehr verlassen. Sie müssen den Rest ihres Lebens zusammen im Schwamm verbrihngen.

Dieser Schwamm wird in Japan gerne als Hochzeitsgeschenk verschenkt.

„ ... bis dass der Tod Euch scheidet.“



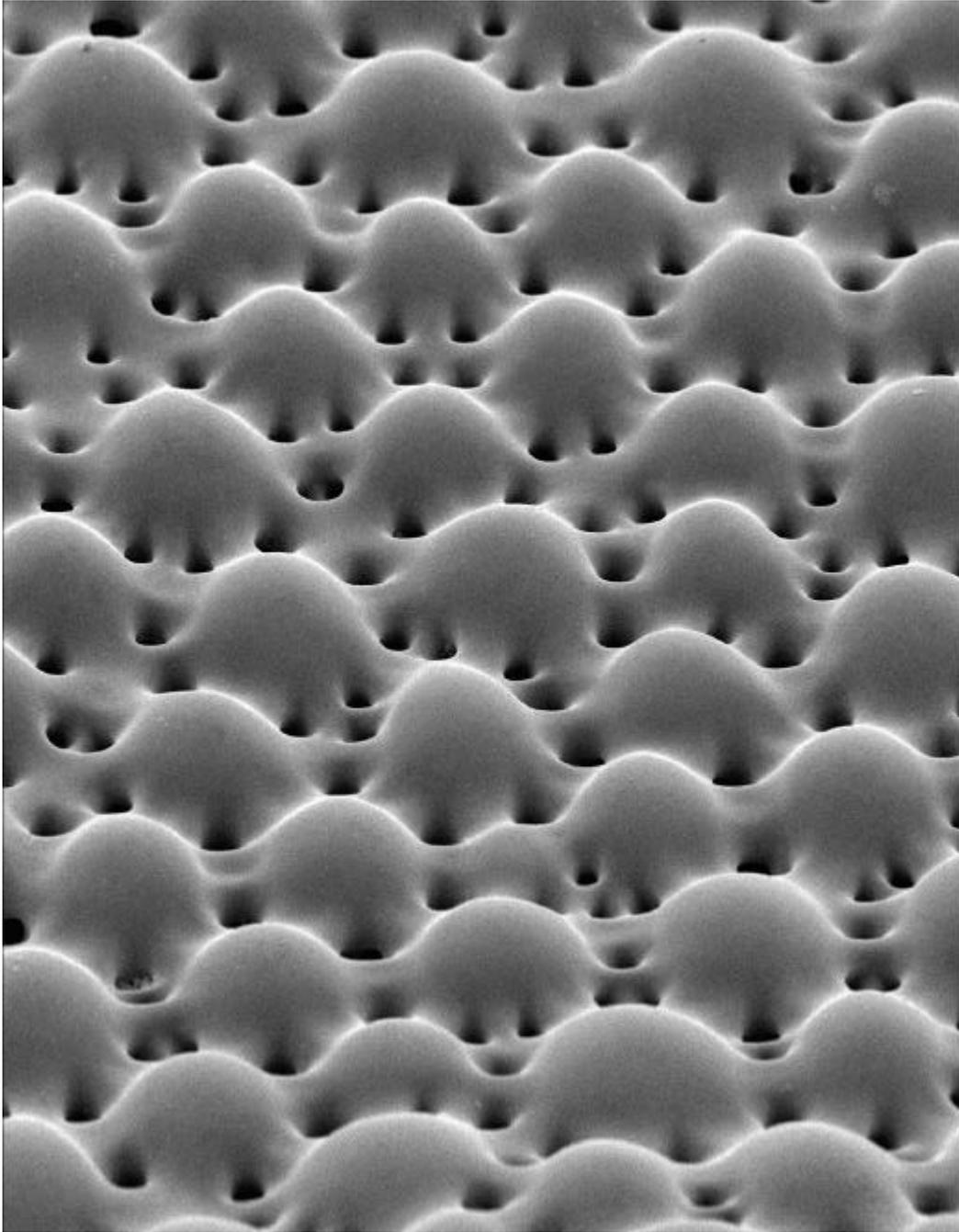
SEESTERNE

- Seesterne steuern – wie viele andere Lebewesen auch – überaus raffiniert das Wachsen von Kristallen.
- Aber ein Seestern namens *Ophiocoma wendtii* kann noch ein bisschen mehr: sein Panzer aus kristallinem Kalk weist optisch perfekte Mikrolinsenfelder auf, die den Panzer zugleich zum Komplexauge machen !
- Dieser Seestern hat sich als Besitzer einer Optik herausgestellt, um die ihn Carl Zeiss beneidet hätte.





Prof. Joanna Aizenberg von den Bell Laboratories in New Jersey, USA, mit den Tieren, die sie berühmt gemacht haben.



Mikrolinsenfeld auf der Oberfläche des Seesterns. Der Durchmesser einer Einzellinse beträgt 20 bis 40 μm .

Die ganze Oberfläche des Haarsterns ist mit Mikrolinsensfeldern bedeckt, der Durchmesser der Einzellinsen liegt zwischen 20- und 40 tausendstel Millimetern (μm). Und weil das Tier vollständig damit bedeckt ist, kann es in alle Richtungen zugleich sehen, jede Linse zeigt in eine andere Richtung. So macht sich der Organismus ein Bild von seiner kompletten Umgebung. Und Frau Prof. Aizenberg denkt sogar, diese ganze Ansammlung von Linsen arbeitet zusammen wie ein Komplexauge, wie es eine Fliege hat.

Wenn man einen Kristall aus Calcit auf eine Zeitung legt, sieht man die Schrift in der Regel doppelt, Ursache ist das Phänomen der Doppelbrechung. Es gibt nur eine Richtung im Kristall, in der ein normales Bild zu sehen ist, entlang der sogenannten c-Achse - der Haarstern schafft es, seine Mikrolinsen genau so zu kristallisieren, dass ein normales Bild entsteht. Mehr noch: *Ophioma wendtii* stattet seine Linsen mit optischen Raffinessen aus, mit denen Carl Zeiss, Jena, berühmt und groß geworden ist.

Die Form der Linsen ist genau so, dass die sphärische Aberration korrigiert wird. "Sphärische Aberration", das hat der Industrie schwer zu schaffen gemacht, das erzeugt schwere Abbildungsfehler, es ist, als ob man einen Flaschenboden als Linse benutzen würde, das ganze Bild ist verzerrt. Alle (unkorrigierten) sphärischen Linsen haben diesen Effekt. Aber dieser Organismus lässt seine Linsen aus orientiertem Calcit wachsen, ohne sphärische Aberration.

Im Ergebnis, versichert Joanna Aizenberg, die die Seestern-Optik mit modernen Methoden vermessen hat, stellen die Mikrolinsen Menschenwerk in den Schatten:

Die besten Linsen, die wir uns denken können, zehn bis zwanzigmal besser als alles, was bisher an sphärischen Linsen dieser Größenordnung von der Industrie machbar war.

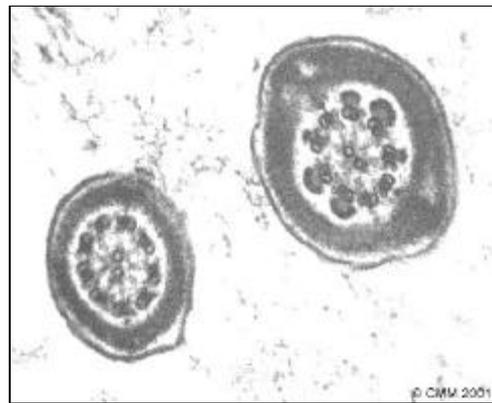
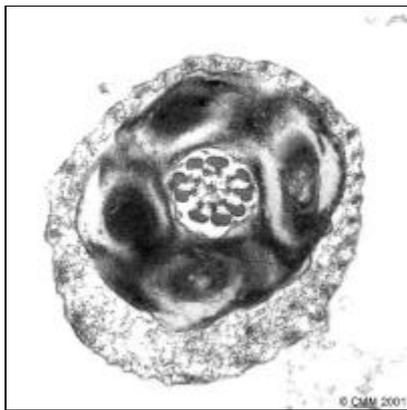
Die von Gordon Hender am Museum für Naturgeschichte in Los Angeles gefundenen Pigmente schließlich stellten sich als eine Art einstellbare Sonnenbrille heraus:

Sie haben ein Pigment, das sich am Tag vor die Lichtrezeptoren schiebt, wie eine Sonnenbrille, und nachts wird das Pigment wieder weggenommen, für eine bessere Weitsicht, ein bisschen wie die Iris unserer Augen. Alles zusammen eine erstaunliche optische Leistung.

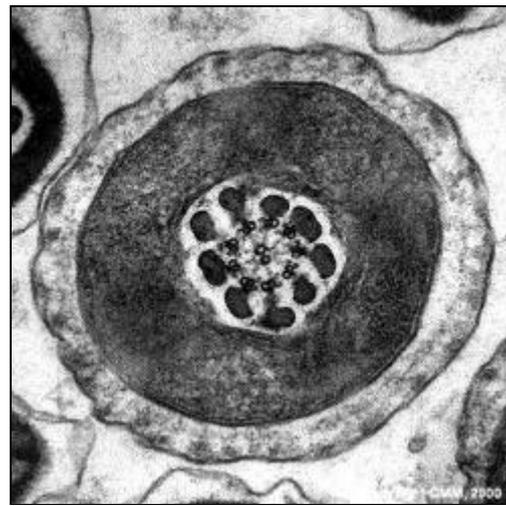
SPERMIEN

- Der Schwanz eines Spermiums heißt Flagellum.
- Die innere Struktur eines Flagellums ist aus elf beweglichen kleinen Röhrcchen aufgebaut: Zwei dieser Röhrcchen sind im Zentrum, und die anderen neun Röhrcchen (die eigentlich jeweils Doppelröhrcchen sind), bilden einen Kreis darum herum.
- Flagellen können sich bewegen, da in ihrem Inneren kleine biologische Motoren aktiv werden.

Querschnitt durch ein Känguruh spermium



Querschnitt durch ein menschliches Spermium



"There are more things in heaven and earth, Horatio,
than are dreamt of in your philosophy."

"Es gibt mehr Dinge zwischen Himmel und Erde,
als deine Schulweisheit sich träumen lässt, Horatio."

(Shakespeare, Hamlet, 1601)