

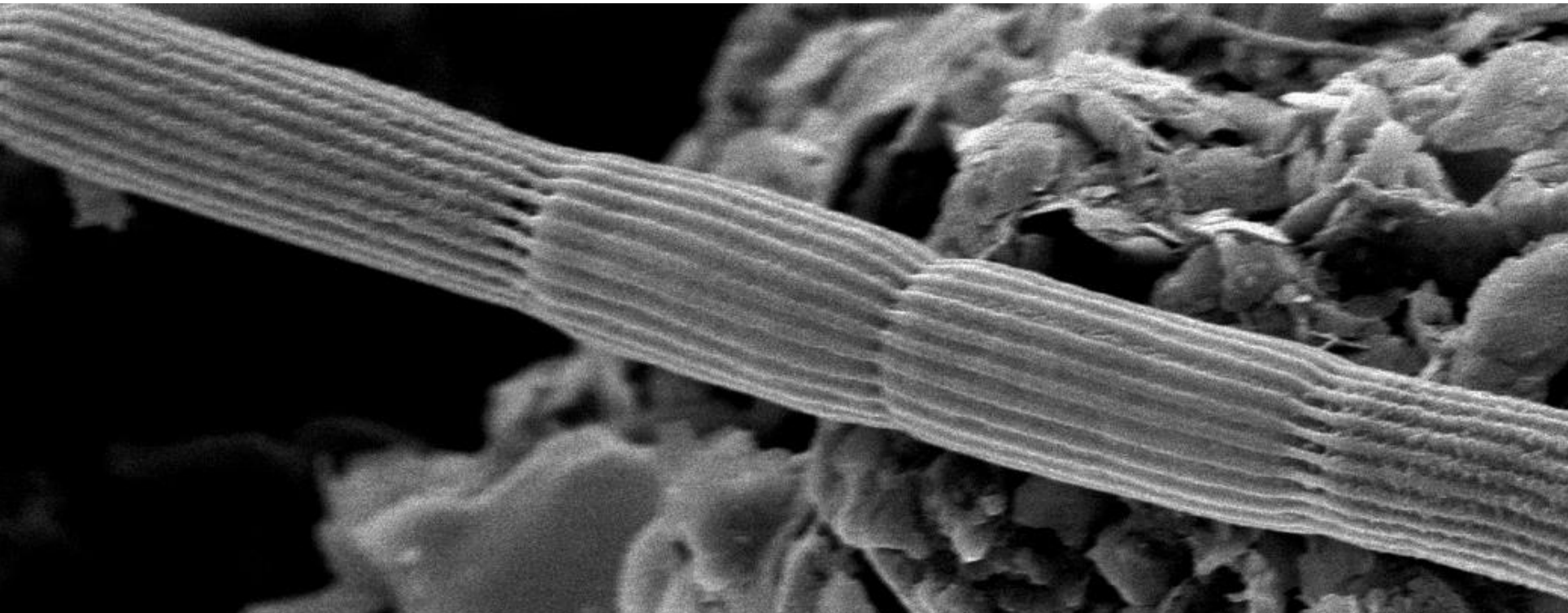


# Mikrobe des Jahres

Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie



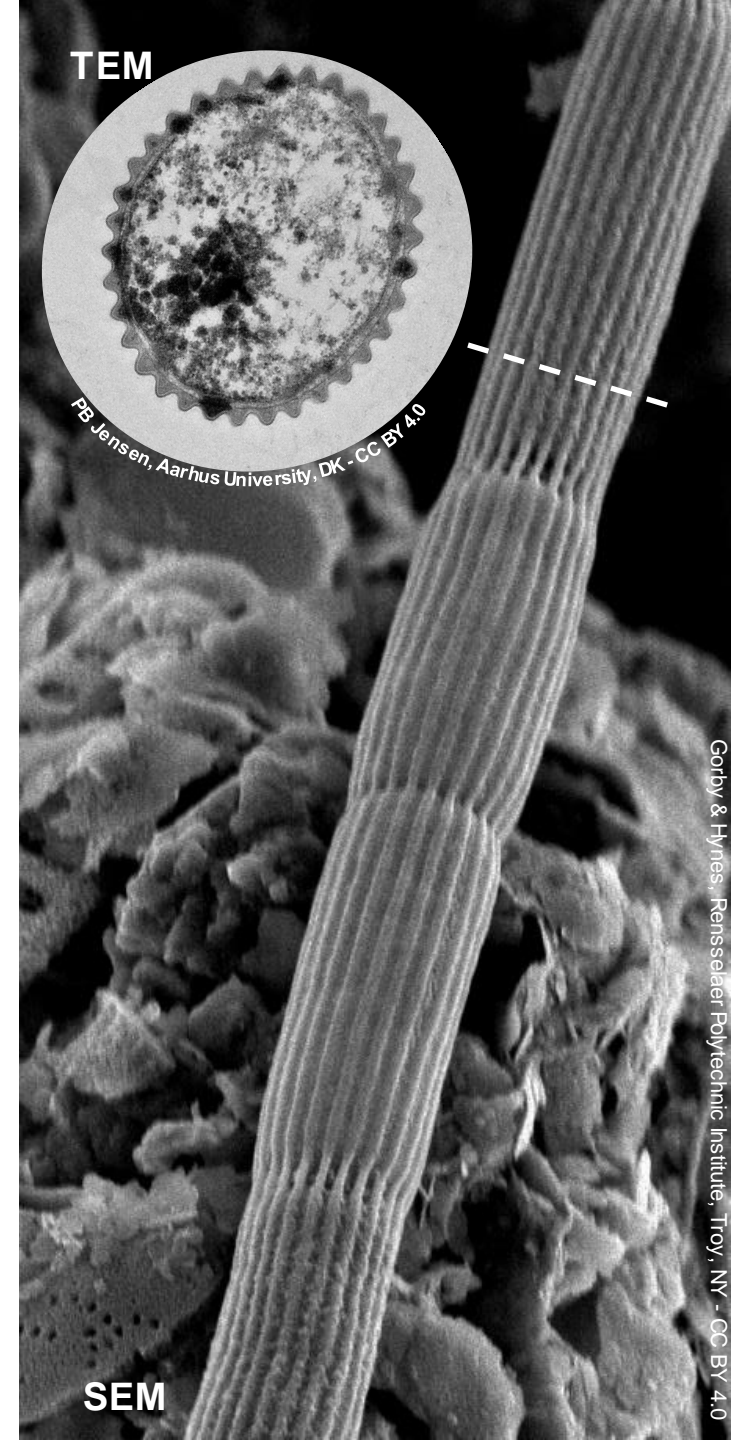
Mikrobe des Jahres 2024  
**Das Kabelbakterium**  
*Candidatus Electronema*



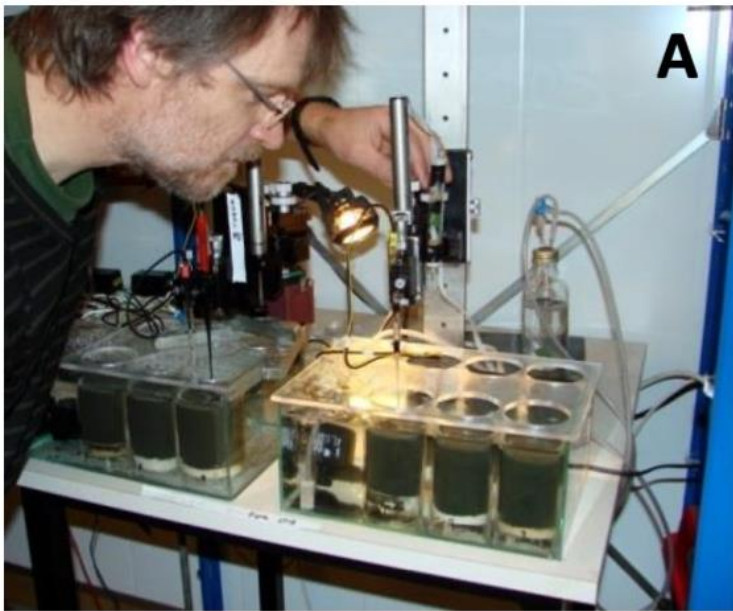
Thorup et al., Syst. Appl. Microbiol. 44 (2021) 126236 - CC BY

# Kabelbakterien...

- kommen weltweit in den obersten Zentimetern von Meeres-, Küsten- und Süßwasser-Sedimenten vor
- gehören zu den *Desulfobacterota*
- bilden zentimeterlange Zellketten durch die oxisch-anoxische Grenzschicht im Sediment
- leiten Strom über zentimeterlange Distanzen
- verbinden die Oxidation von Sulfid in tieferen anoxischen Sedimentschichten mit der Reduktion von Sauerstoff in oberflächennahen Bereichen
- ermöglichen damit einen Elektronenfluss zwischen verschiedenen Sedimentschichten
- sind ein Beispiel für mehrzellige Mikroorganismen mit Arbeitsteilung innerhalb der Zellketten
- haben Anwendungspotenzial in der Umweltsanierung und Bioelektronik







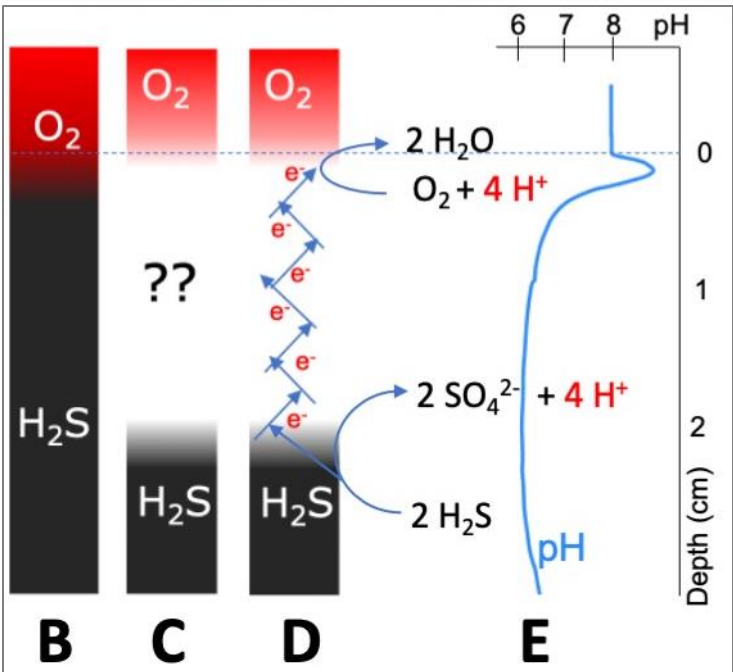
**A**

**Trotz ihrer ubiquitären Verbreitung und ihrer enormen Größe (Zellketten können bis zu 8 cm lang werden!) ist die Existenz von Kabelbakterien erst seit kurzem bekannt**

Ein dänisches Team kam ihnen auf die Spur durch die Messung einer ungewöhnlichen Verteilung von O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S und pH im Ostsee-Sediment der Bucht von Aarhus

Lars Peter Nielsen (Bild A) und Mitarbeiter lieferten dafür 2010 eine mögliche Erklärung: Mikroorganismen bewirken einen elektrischen Stromfluss („*long-distance electron transport*“), der räumlich entfernte Redoxreaktionen verbindet und den Mikroben die Gewinnung von Energie ermöglicht (Bild B-E).

Ein Team um Andreas Schramm, Nils Risgaard-Petersen und Lars Peter Nielsen entdeckte dann 2012 die dafür verantwortlichen Organismen: lange Fäden aus tausenden von Bakterienzellen!



A Schramm, *BIOspektrum* 1/2024 - CC BY4.0

Vol 463 | 25 February 2010 | doi:10.1038/nature08790

nature

**2010**

LETTERS

**Electric currents couple spatially separated biogeochemical processes in marine sediment**

Lars Peter Nielsen<sup>1</sup>, Nils Risgaard-Petersen<sup>2</sup>, Henrik Fossing<sup>3</sup>, Peter Bondo Christensen<sup>3</sup> & Mikio Sayama<sup>4</sup>

ARTICLE

doi:10.1038/nature11586

**Filamentous bacteria transport electrons over centimetre distances** **2012**

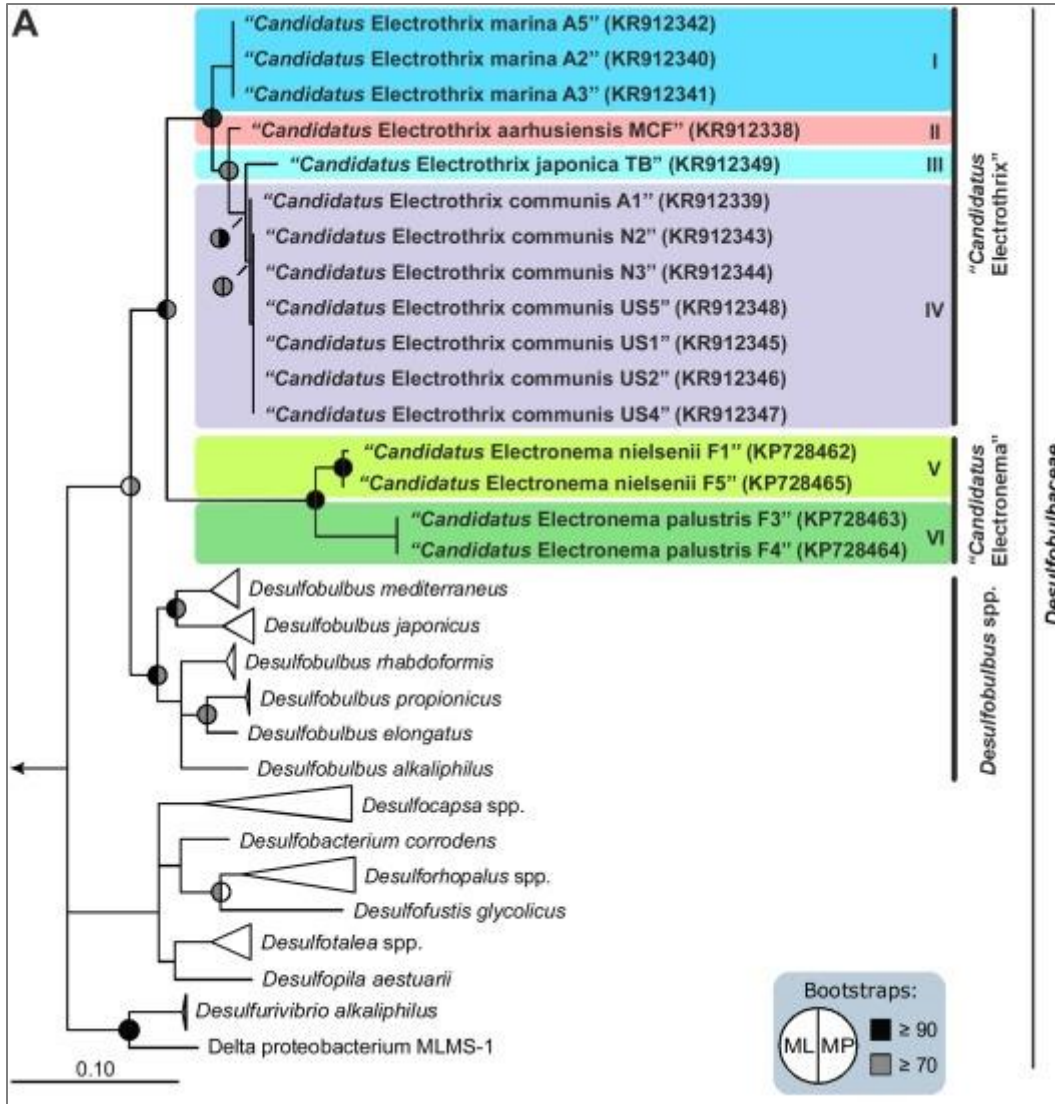
nature

Christian Pfeffer<sup>1</sup>, Steffen Larsen<sup>2</sup>, Jie Song<sup>3</sup>, Mingdong Dong<sup>3</sup>, Flemming Besenbacher<sup>3</sup>, Rikke Louise Meyer<sup>2,3</sup>, Kasper Urup Kjeldsen<sup>1</sup>, Lars Schreiber<sup>1</sup>, Yuri A. Gorby<sup>4</sup>, Mohamed Y. El-Naggar<sup>5</sup>, Kar Man Leung<sup>4,5</sup>, Andreas Schramm<sup>1,2</sup>, Nils Risgaard-Petersen<sup>1</sup> & Lars Peter Nielsen<sup>1,2</sup>

Oxygen consumption in marine sediments is often coupled to the oxidation of sulphide generated by degradation of organic matter in deeper, oxygen-free layers. Geochemical observations have shown that this coupling can be mediated by electric currents carried by unidentified electron transporters across centimetre-wide zones. Here we present evidence that the native conductors are long, filamentous bacteria. They abounded in sediment zones with electric currents and along their length they contained strings with distinct properties in accordance with a function as electron transporters. Living, electrical cables add a new dimension to the understanding of interactions in nature and may find use in technology development.



# Ca. Electronema: die erste „unkultivierbare“ Mikrobe des Jahres



**Kabelbakterien** konnten bisher noch nicht als klassische Reinkultur isoliert werden.

Sie wurden daher 2016 aufgrund genomischer, morphologischer und funktioneller Merkmale als „**Candidatus**“-Arten beschrieben.

Vertreter gehören zu den beiden Schwestergattungen *Ca. Electrothrix* und *Ca. Electronema* (Familie *Desulfobulbaceae*)

**2021: erste stabile Anreicherung** einer Kabelbakterien-Art:

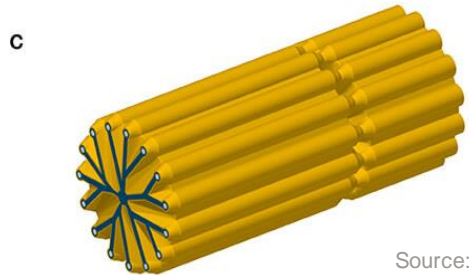
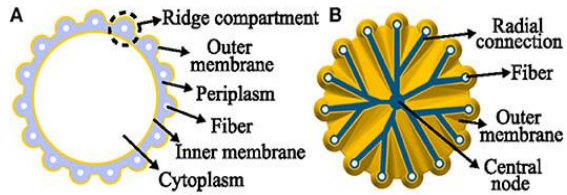
***Ca. Electronema aureum***, die MdJ 2024

Trojan et al., Syst. Appl. Microbiol. 39: 297-306 (2016) 126236 (CC-BY-NC-ND)

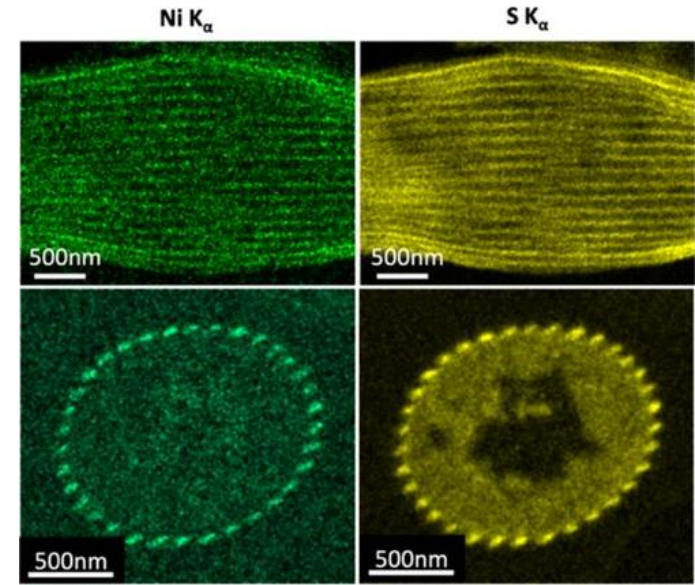
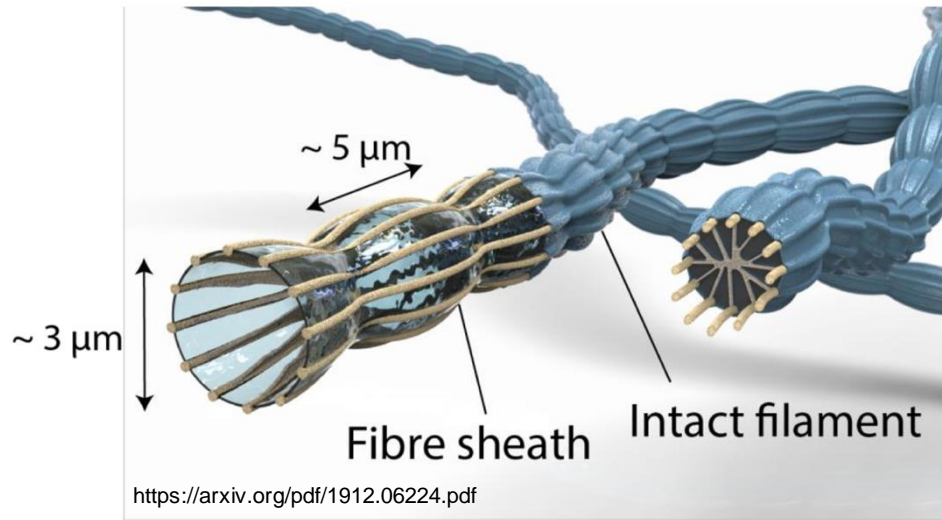
Thorup et al., Syst. Appl. Microbiol. 44 (2021) 126236



# Einzigartige Zellbiologie: periplasmatische „Stromleitungen“ durch neuartige Ni-S-Cofaktoren



Source: Wikimedia.



STEM-EDX detection of Ni and S in the wire of a *Ca. Electronema aureum* cell (top) and cross-section (bottom). Digel et al, bioRxiv 2023, <https://doi.org/10.1101/2023.05.24.541955>

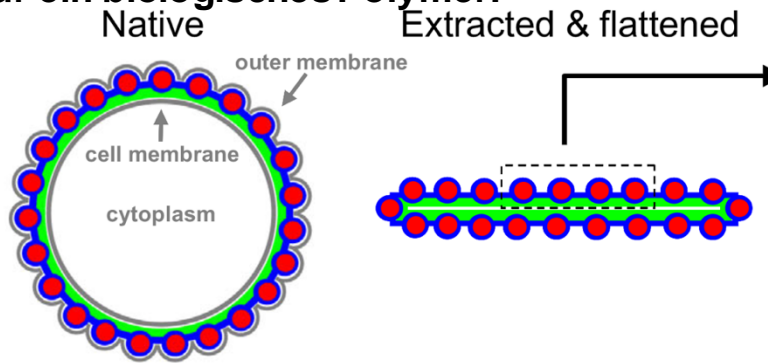
„Kabel“artige Morphologie: gemeinsame äußere Membran + durchgängige strangartige periplasmatische Strukturen, die aus Nickel-Schwefelproteinen und Polysacchariden bestehen

- **Elektrische Stromdichte von  $10^6 \text{ A m}^{-2}$ : ähnelt einem Kupfer-Kabel!**
- **Leitfähigkeit  $> 20 \text{ S cm}^{-1}$ : neuer Rekord für ein biologisches Polymer!**

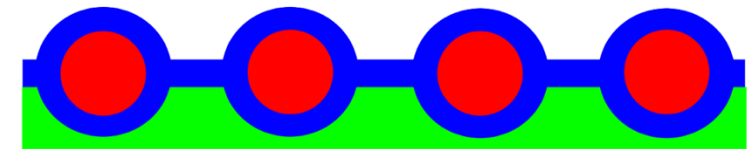
NATURE COMMUNICATIONS | (2021)

Efficient long-range conduction in cable bacteria through nickel protein wires

Henricus T. S. Boschker<sup>1,2,8</sup>, Perran L. M. Cook<sup>3</sup>, Lubos Polerecky<sup>4</sup>, Raghavendran Thiruvallur Eachambadi<sup>5</sup>, Helena Lozano<sup>6</sup>, Silvia Hidalgo-Martinez<sup>2</sup>, Dmitry Khalemkov<sup>7</sup>, Valentina Spampinato<sup>8</sup>, Nathalie Claes<sup>9</sup>, Paromita Kundu<sup>9</sup>, Da Wang<sup>9</sup>, Sara Bals<sup>9</sup>, Karina K. Sand<sup>10</sup>, Francesca Cavezza<sup>11</sup>, Tom Hauffman<sup>11</sup>, Jesper Tataru Bjerg<sup>2,12,13</sup>, Andre G. Skirtach<sup>7</sup>, Kamila Kochan<sup>3</sup>, Merrilyn McKee<sup>3</sup>, Bayden Wood<sup>3</sup>, Diana Bedolla<sup>14</sup>, Alessandra Gianoncelli<sup>14</sup>, Nicole M. J. Geerlings<sup>4</sup>, Nani Van Gerven<sup>15,16</sup>, Han Remaut<sup>15,16</sup>, Jeanine S. Geelhoed<sup>2</sup>, Ruben Millan-Solsona<sup>6,17</sup>, Laura Fumagalli<sup>18,19</sup>, Lars Peter Nielsen<sup>12,13</sup>, Alexis Franquet<sup>8</sup>, Jean V. Manca<sup>5</sup>, Gabriel Gomila<sup>6,17</sup> & Filip J. R. Meysman<sup>1,2,8</sup>



ca. 60 nm



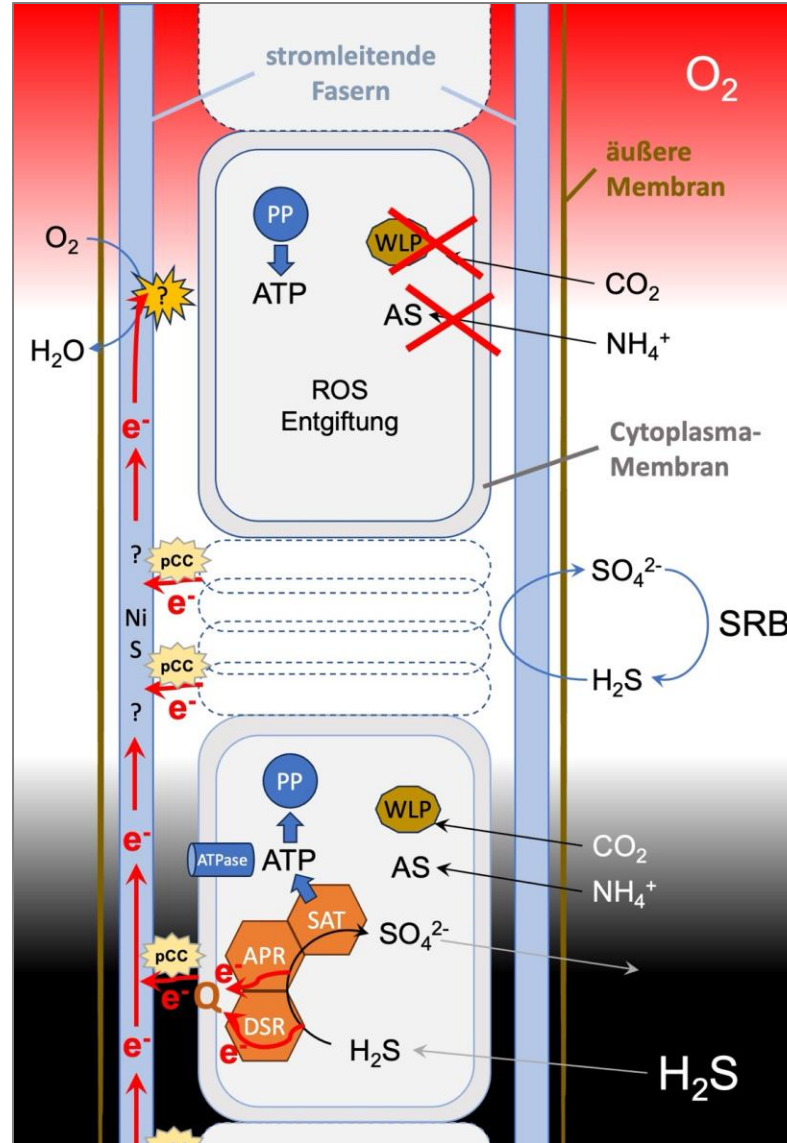
- Insulating protein shell
- Conductive core with NiS-rich protein
- Polysaccharide-rich base layer

# Evolution und Stoffwechsel von Kabelbakterien

Einblicke durch Untersuchungen an Anreicherungen von *Ca*. Electronema-Bakterien und Analyse ihrer Genomsequenzen:

- **Stammen ab** von Sulfat-reduzierenden Bakterien, kehren den Weg der dissimilatorischen Sulfat-Reduktion (DSR) um für die Sulfid-Oxidation
- **Arbeitsteilung:**
  - >80% der Zellen im Filament liefern Elektronen durch Sulfid-Oxidation, nur wenige Zellen sind in Kontakt mit  $O_2$  und verbrauchen Elektronen
  - Energiekonservierung, Zellteilung und Assimilation von C & N nur in den anoxischen Zellen

Kjeldsen et al. PNAS 2019, Geelhoed et al. PNAS 2020



A Schramm, BIOSpektrum 1/2024 - CC BY4.0

## Metabolismus von *Ca*.

**Electronema** im Sauerstoff-Sulfid-Gradienten ( $O_2$  rot -  $H_2S$  schwarz). Es ist eine oxische (oben) und eine anoxische Zelle (unten) gezeigt, dazwischen liegen hunderte bis tausende, hauptsächlich anoxische Zellen (gestrichelt).

**PP:** Polyphosphat

**WLP:** Wood-Ljungdahl-Weg

**AS:** Aminosäuren

**ROS:** reaktive Sauerstoffspezies

**pCC:** periplasmatische Cytochrome

**Q:** Chinon-Pool

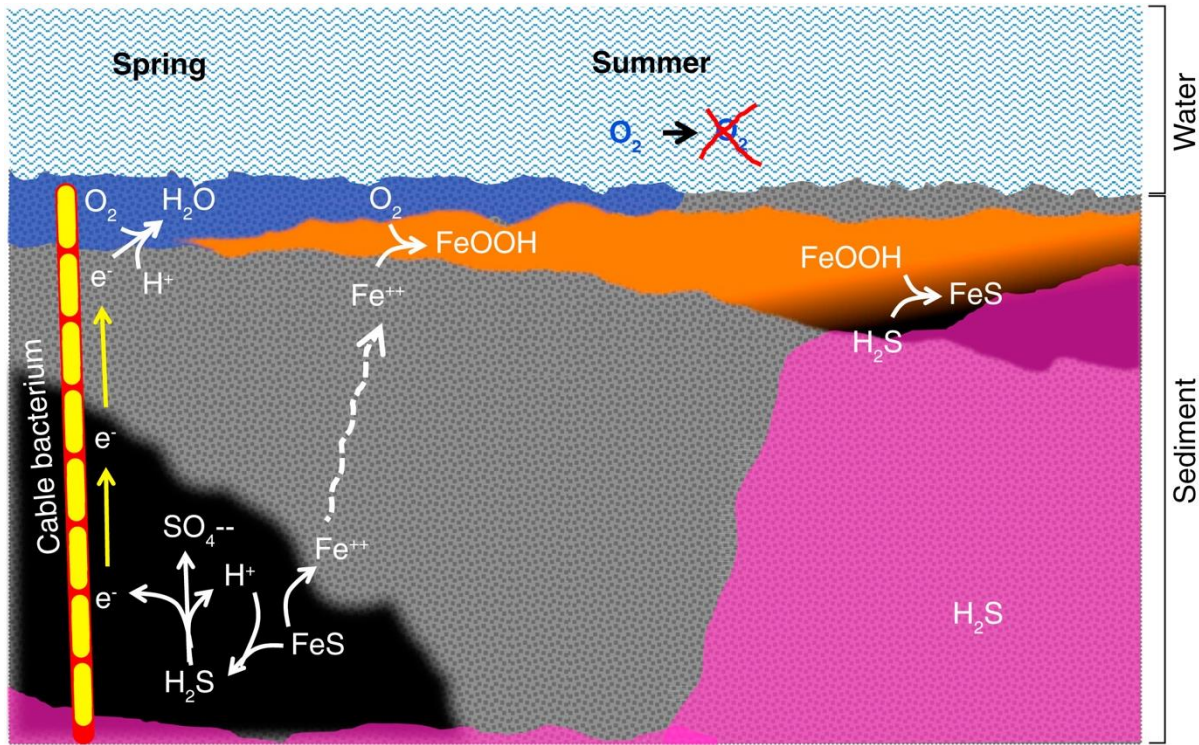
**DSR, APR, SAT:** Komplexe des DSR-Wegs

**SRB:** sulfatreduzierende Bakterien (sorgen im suboxischen Sediment für kontinuierliche Versorgung der Kabelbakterien mit Sulfid)





# Kabelbakterien als „Ökosystem-Ingenieure“: Wichtige Rolle im Kreislauf von C, N, S, P, Fe und Spurenmetallen

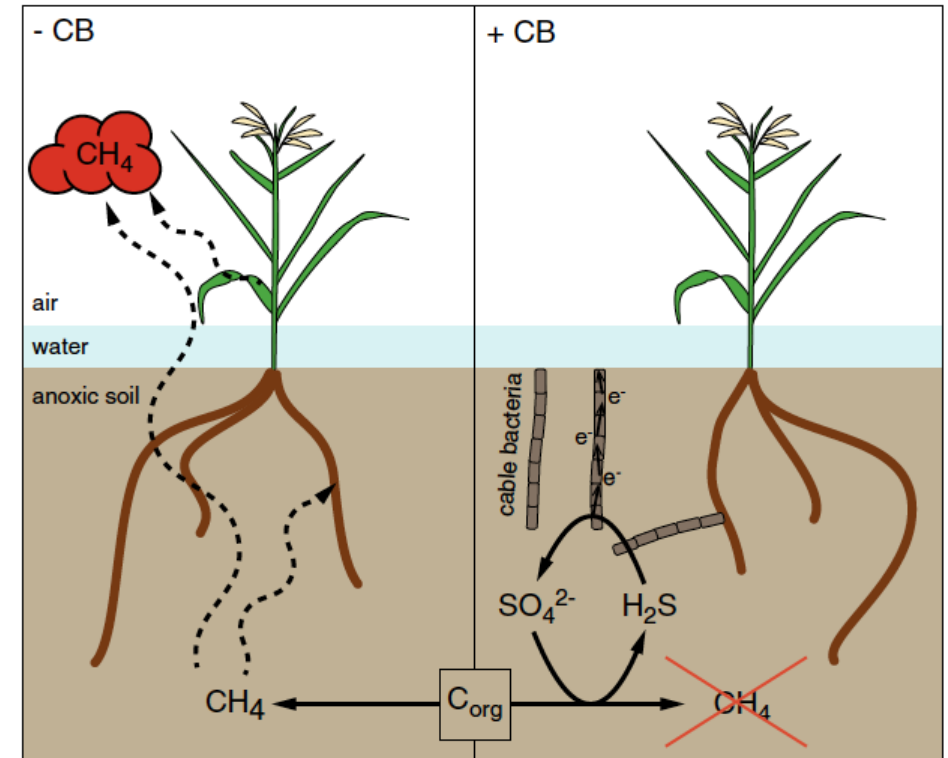


Kabelbakterien-Aktivität führt zu  $\text{H}_2\text{S}$ -Oxidation und Auflösung von  $\text{FeS}$ ; das freigesetzte  $\text{Fe}^{2+}$  wandert im elektrischen Feld nach oben und wird als Fe-Oxid ausgefällt, wo es als "Brandmauer" gegen  $\text{H}_2\text{S}$  wirkt, falls der Gewässerboden anoxisch wird.

Nielsen, L.P. Current Biology (2016) <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.11.014> (Elsevier user license, may be used for non-commercial purposes)

Current Biology

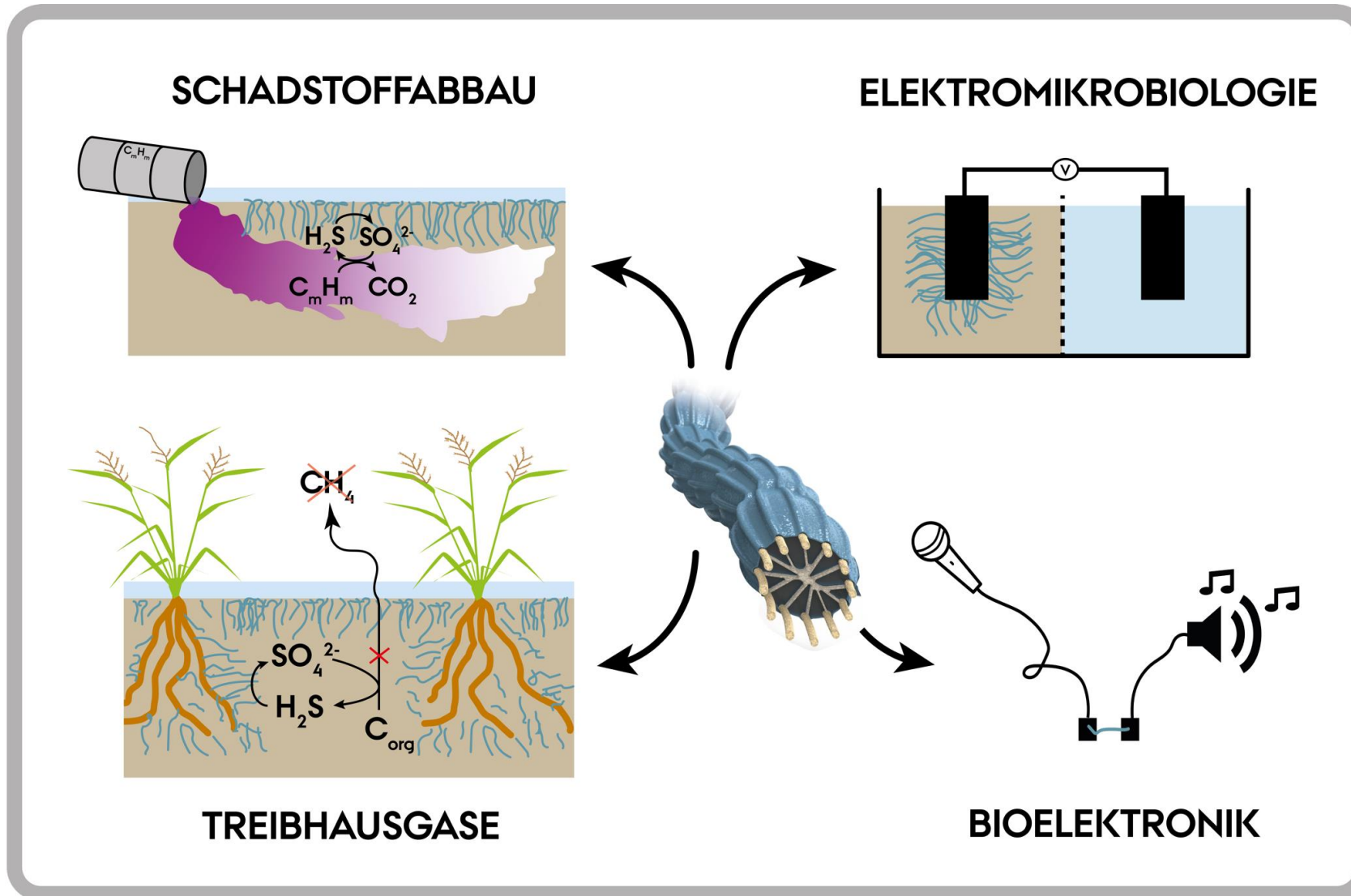
Kabelbakterien-Aktivität stimuliert Sulfat-reduzierende Bakterien, die wiederum konkurrierenden methanogenen Mikroorganismen Nährstoffe (bzw. Elektronen) entziehen. Dies kann die Freisetzung klimaschädlichen Methans unterdrücken (z.B. in Reisfeldböden), aber auch den Abbau von organischem Material und Schadstoffen (z.B. Öl-Kontamination) beschleunigen.



Scholz et al., Nat. Comm. (2020) <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15812-w>



# Potenzielle Anwendungen von Kabelbakterien



Vincent Scholz &  
Tillmann Lüders,  
BIOspektrum 1/24



## Kabelbakterium *Electronema* – Mikrobe des Jahres 2024

### Lebende Stromkabel mit überraschender Arbeitsteilung

ANDREAS SCHRAMM  
SEKTION FÜR MIKROBIOLOGIE & CENTER FOR ELECTROMICROBIOLOGY,  
UNIVERSITÄT AARHUS, DÄNEMARK

Centimeter-long, multicellular bacteria that form electric wires as good as semiconductors? That split their energy-conserving redox reaction into two half reactions, performed in distant parts of their filamentous "body", so some cells "eat" while other cells "breathe"? Sounds like science fiction, doesn't it? And yet that's what "cable bacteria" do. Here's their story, from their surprise discovery 12 years ago to the selection of the candidate genus *Electronema* as Microbe of the Year 2024.

DOI: 10.1007/s12268-024-2077-1  
© Der Autor 2024

konnten sie ebenfalls ausschließen. Anstatt die rätselhaften Daten als Messfehler abzutun, kam Lars Peter Nielsen auf eine radikale Erklärung: eine elektrische Verbindung zwischen Sulfidoxidation in der Tiefe und Sauerstoffreduktion an der Sedimentoberfläche (Abb. 1). Dabei würden Protonen in der Tiefe produziert und an der Oberfläche verbraucht – und tatsächlich war diese vorhergesagte pH-Anomalie im Sediment messbar und bestätigte die elektrischen Ströme im Meeresboden [1]. Nur welche Mikroorganismen daran beteiligt waren, blieb völlig unklar, da alle bekannten „elektrischen“ Bakterien Elektronen maximal ein paar Mikrometer extrazellulär transportieren konnten, nicht aber mehrere Zentimeter.

## Kabelbakterium *Electronema* – Mikrobe des Jahres 2024

### Anwendungen der Kabelbakterien in der Umwelt- und Biotechnologie

VINCENT SCHOLZ<sup>1</sup>, TILLMANN LUEDERS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ZENTRUM FÜR ELEKTROMIKROBIOLOGIE, UNIVERSITÄT AARHUS, DÄNEMARK

<sup>2</sup> LEHRSTUHL FÜR ÖKOLOGISCHE MIKROBIOLOGIE, UNIVERSITÄT BAYREUTH

Cable bacteria are living electric wires, exerting remarkable effects on their surroundings. Despite still refusing pure culture isolation, their biological conductivity and their impact on aquatic sediments give rise to interesting application prospects in environmental and bio-engineering, including bioremediation, the mitigation of greenhouse gas emissions, and bioelectronics. Here, we summarize how research is currently striving to realize the very versatile application potential of these fascinating bacteria.

DOI: 10.1007/s12268-024-2076-2  
© Die Autoren 2024

ponenten einer weiterführenden bio- und elektrochemischen Untersuchung zuführen. Die (immer noch) nicht in Labor- oder gar großtechnischer Kultur befindliche Mikrobe des Jahres kommt – anders als ihre Vorgänger – natürlich noch nicht großtechnisch in der Biotechnologie oder Lebensmittelindustrie zum Einsatz. Dennoch sind die Kabelbakterien seit ihrer Entdeckung [2] nicht nur mikrobiologisch und biogeochemisch eine Sensation; ihre Erforschung war stets und ist zunehmend ebenso motiviert durch äußerst spannende Perspektiven auf mögliche Anwendungen (Abb. 1). Diese haben sogar bereits zur Gewährung von Patenten auf ihre elektrisch leitfähigen Strukturen geführt [3, 4]. Die Anwendungs-

## MIKROBIOLOGIE

### Kabelbakterien – Leben in Himmel und Hölle

Mikroben vermögen eine Unzahl verschiedener Verbindungen bis hin zu kleinsten Metallionen mit der Umwelt auszutauschen. Seit einigen Jahren weiß man, dass Bakterien selbst Elektronen unmittelbar auf Festkörper und andere Zellen übertragen können. Diese Fähigkeit haben Kabelbakterien perfektioniert – sie leiten Strom über weite Strecken und schaffen damit eine direkte Verbindung zwischen oxischen und anoxischen Zonen im Sediment von Gewässern.

Harald Engelhardt  
BIUZ, 2020



**Die Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie (VAAM)** vertritt über 3400 mikrobiologisch orientierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Forschung und Industrie. Seit zehn Jahren wählt die VAAM die Mikrobe des Jahres, um auf die Vielfalt der mikrobiologischen Welt aufmerksam zu machen. Alle Informationen sind auch auf Englisch verfügbar unter <https://microbeoftheyear.org/>.

## Werde Mitglied in der VAAM und profitiere von den Vorteilen einer Mitgliedschaft:

- Starke **Netzwerke** in Industrie und Wissenschaft
- **Nachwuchsförderung:** Promotions- und Posterpreise, *VAAMentoring* für Promovierende und Postdocs
- **Reisekostenzuschüsse**, auch zu internationalen Tagungen und reduzierte Tagungsgebühren für die VAAM-Jahrestagung, Fachgruppensymposien und Veranstaltungen der GBM, DECHEMA und DGHM
- Bezug der Mitgliederzeitschrift **BIOspektrum** (7 Ausgaben/ Jahr)