

Kabelbakterium *Electronema* – Mikrobe des Jahres 2024

Anwendungen der Kabelbakterien in der Umwelt- und Biotechnologie

VINCENT SCHOLZ¹, TILLMANN LUEDERS²

¹ ZENTRUM FÜR ELEKTROMIKROBIOLOGIE, UNIVERSITÄT AARHUS, DÄNEMARK

² 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

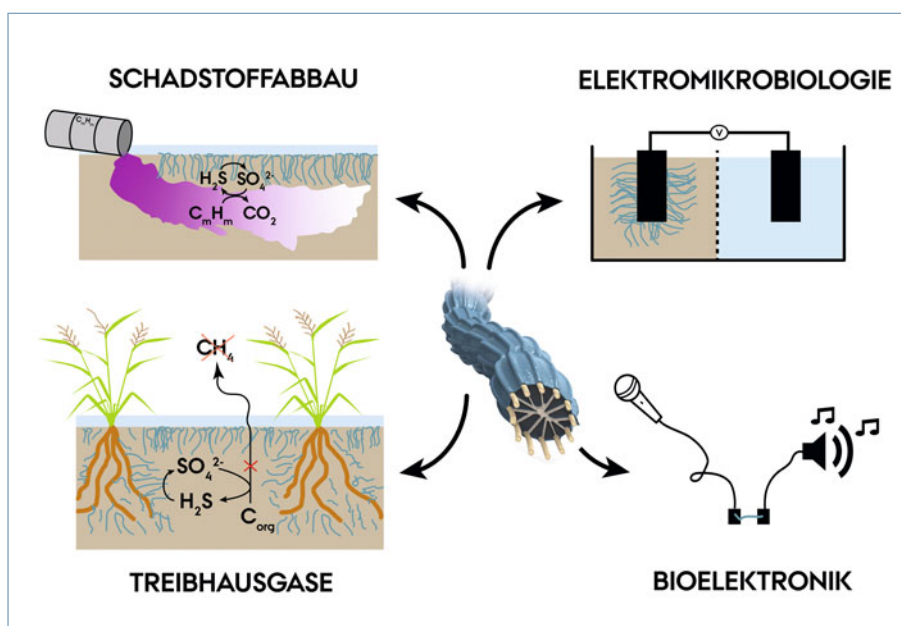
Die Auswahl der Kabelbakterien des *Candidatus*-Genus *Electronema* zur Mikrobe des Jahres 2024 ist eine Premiere. Erstmals präsentiert die Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie (VAAM) einen noch nicht in Reinkultur isolierten Mikroorganismus und somit letztlich einen Vertreter der noch nicht kultivierten Mehrheit der Mikroben. Dennoch sind die Süß-

wasser-Kabelbakterien der *Ca. Electronema* spp. [1], ebenso wie auch die bereits zuvor entdeckten marinen *Ca. Electrothrix* spp., viel mehr als nur metagenomische Vorhersagen. Ihre Populationen lassen sich in aquatischen Sedimenten mikroskopisch beobachten, im Labor in Mikrokosmen und Anreicherungskulturen experimentell untersuchen sowie ihre Biomasse und zellulären Kom-

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 Anwendungsperspektiven und auch die Forschung sind meist nicht auf *Ca. Electronema* beschränkt, daher werden die Süßwasser-Kabelbakterien hier gemeinsam mit den marinen *Ca. Electrothrix* betrachtet.

Biogeochemischer Fußabdruck der Kabelbakterien

Die ursprüngliche Entdeckung der Kabelbakterien war nicht zuletzt auf ihren bemerkenswerten biogeochemischen Fußabdruck in aquatischen Sedimenten zurückzuführen [2]. Kabelbakterien haben sich in ganz besonderer Art und Weise an dieses Habitat und die darin vorherrschenden konträren Diffusionsgradienten aus Sauerstoff und Sulfid angepasst: Über ihre Fasern sind sie in der Lage, Redox-Halbreaktionen über Zentimeter-Abstände zu entkoppeln. Im gemeinsamen Periplasma dieser Gram-negativen *Desulfobulbaceae* finden sich charakteristisch gebündelte, elektrisch leitfähige Proteinfasern, durch welche die Elektronen entlang der teilweise über 1 cm langen Zellfilamente geleitet werden. Die Elektronen fließen vom Sulfid-oxidierenden anodischen Teil des Filaments aus dem Sediment hin zum Sauerstoff-atmenden kathodischen Ende an der Sedimentoberfläche. Dadurch generieren Kabelbakterien eine charakteristische sauerstoffarme (suboxische) Zone, in der die klassische diffusionsgetriebene Sequenz



▲ Abb. 1: Übersicht der unterschiedlichen Anwendungspotenziale der Kabelbakterien.

der Redoxprozesse über die Tiefe außer Kraft gesetzt ist.

Über ihre elektrische Verbindung erhöhen Kabelbakterien letztlich die indirekte Verfügbarkeit von Sauerstoff als Elektronenakzeptor im Sediment und geben Raum für eine elektrische Biosphäre, in der so eine Vielzahl interessanter mikrobieller Interaktionen und Prozesse möglich wird. So wurde bereits früh gezeigt, dass Kabelbakterien in saisonal suboxischen Wasserkörpern als Brandmauer entgegen einer übermäßigen Freisetzung von toxischem Sulfid und Nährstoffen aus dem Sediment wirken [5]. In der durch die Kabelbakterien gebildeten suboxischen Zone sind zudem viele sonst sauerstoffabhängige mikrobielle Aktivitäten und Populationen stimuliert [6]. Möglicherweise können also Kabelbakterien auch durch andere Mikroorganismen als Elektronenakzeptor, zumindest aber als Elektronensenke genutzt werden. Diese Aspekte sind äußerst relevant in der Diskussion der Anwendungspotenziale dieser Mikrobe des Jahres.

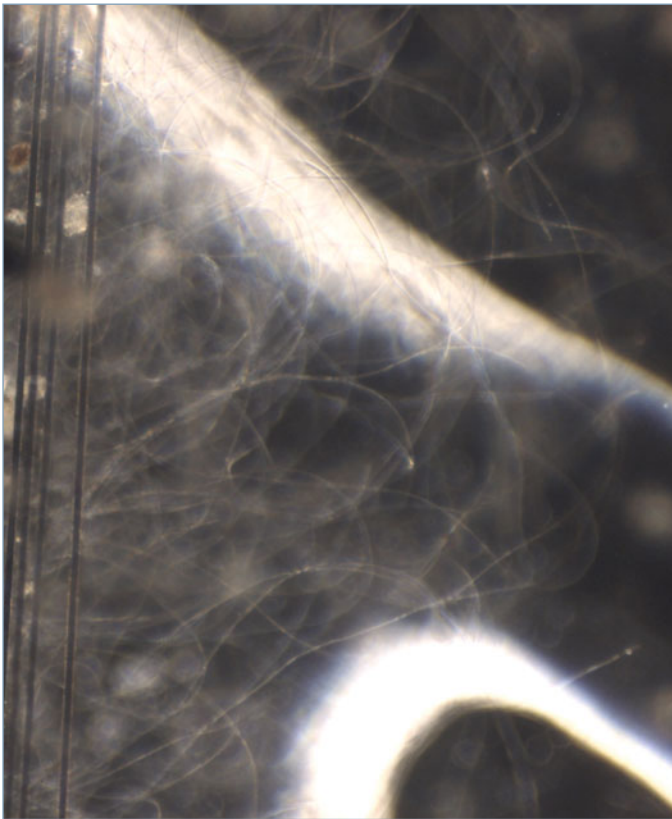


▲ **Abb. 2:** Aktuell laufender Feldversuch in einem Reisfeld in den USA, in dem versucht wird, die Abundanz und Aktivität der Kabelbakterien zu stimulieren. Im Bild zu sehen sind vier Messkammern zur Bestimmung der Methanemissionen verschiedener Behandlungen.

Hier steht eine Anzeige.



Springer



◀ **Abb. 3:** Ein Bündel Kohlefaser-Elektroden (Fasern am linken Bildrand) ist nach Inkubation mit geeigneter Spannung dicht mit Kabelbakterien besiedelt (gewundene, haarähnliche Filamente).

Stimulierter Schadstoffabbau

Kabelbakterien werden häufig an stark mit Kohlenwasserstoffen belasteten Standorten gefunden, auch in Oberflächengewässern und im Grundwasser [7, 8]. Entsprechend spannend ist die Frage, ob sich die Aktivität der Kabelbakterien nutzen ließe, um direkt oder indirekt den Schadstoffabbau anzukurbeln. So wurden durch die Anwesenheit von Kabelbakterien bzw. ihrer leitfähigen Strukturen in Sedimenten bereits Steigerungen der Abbauraten aromatischer Kohlenwasserstoffe von 10–20 % gezeigt [8, 9]. Viel drastischer aber war eine drei- bis vierfache Stimulation der Sulfatreduktion in stark nährstoffbelasteten Seesedimenten [10]. Beides weist auf eine indirekte Stimulation des Schadstoffabbaus bzw. mikrobieller Aktivitäten über das Recycling des Sulfats als Elektronenakzeptor hin. Dieses kann nach elektrogener Oxidation im Sediment wieder durch Schadstoffabbauer und Sulfatreduzierer genutzt werden. Ob Kabelbakterien sich möglicherweise auch direkt am Abbau von organischen Schadstoffen beteiligen können, ist noch unklar; (meta)genomische Hinweise auf ein entsprechendes katabolisches Repertoire gibt es bislang noch nicht.

Dessen unbenommen gibt es bereits einige Ideen, wie sich Kabelbakterien gezielt in der

Bioremediation kontaminierter Standorte nutzen lassen könnten [11]. Besonders der Einsatz von Elektroden zur gezielten Selektion und Stimulation von Kabelbakterien scheint hier vielversprechend [12, 13]. In dieser Elektrobioremediation könnten die Kabelbakterien den Wirkradius oxidativer Elektrodensystemen im Sediment um ein Vielfaches erhöhen (**Abb. 3**).

Verringerung von Treibhausgasemissionen

Eine weitere in der Entwicklung befindliche Anwendung für Kabelbakterien hat die Reduktion von Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft zum Ziel. Hier trägt besonders der Anbau von Reis erheblich zu den jährlichen anthropogen verursachten Methanemissionen bei. In der Rhizosphäre von Reis wurden bereits Kabelbakterien nachgewiesen, ebenso wie auch bei anderen Wasserpflanzen [14]. Die Stimulation dieser Populationen ist eine interessante und neuartige Strategie zur Verringerung des Methanausstoßes im Reisanbau (**Abb. 2**). Die gängige Praxis der periodischen Drainage von Reisfeldern ist während der Regenzeit oft nicht möglich, und kann sogar zu unerwünschten Nebeneffekten, wie z. B. erhöhten Lachgas-Emissionen führen (N_2O ist ebenso

ein Treibhausgas wie CH_4). Alternativ kann eine Zugabe von Sulfat (z. B. über Gips) zwar die Sulfatreduktion im Reisfeldboden stimulieren und dadurch die Methanogenese hemmen, aber eine wiederholte Zugabe kann durch die verstärkte Bildung von H_2S die Pflanzen schädigen.

Eine neue Lösung könnte in einem geschlossenen Schwefelkreislauf liegen: Hier kommen die Kabelbakterien ins Spiel. In Versuchen im Gewächshaus konnte bereits gezeigt werden, dass sich nach der Zugabe von *Ca. Electronema* sp. zum Boden die Methanemission um über 90 % verringerten [15]. Als Mechanismus wird ein „Anzapfen“ der Sauerstoffversorgung durch die Reiszurzel und auch des überstehenden Wassers vermutet, wodurch die Kabelbakterien ein andauerndes Recycling von Sulfat im Boden ermöglichen. Dadurch wird die Methanogenese effizient gehemmt. Es bleibt aber noch zu beantworten, inwieweit Kabelbakterien in Reisfeldern nicht nur bereits natürlich vorkommen, sondern durch Anbaupraktiken gezielt so stimuliert werden können, dass Methanausstöße über die Vegetationsperiode stark verringert werden. Auch für andere geflutete Böden und Feuchtgebiete sind diese Fragen von Relevanz.

Vermeidung von Elektroschrott

Die elektrische Leitfähigkeit der Kabelbakterien ist vergleichbar mit der von gedopten organischen Halbleitern, während die grundlegende Stromleitung der periplasmatischen Proteinfasern einem metallischen Kabel entspricht [16]. Im Unterschied zu unseren Nervenzellen, die lediglich Potenziäle über lange Distanzen senden und deshalb nicht in der organischen Elektronik genutzt werden können, leiten Kabelbakterien tatsächlich Strom. Diese Eigenschaft ist für eine auf Biomaterialien basierende Elektronik äußerst interessant. In der globalen Elektroindustrie besteht ein großes Problem darin, dass von den jährlich über 50 Millionen Tonnen Elektroschrott nur etwa 20 % recycelt werden. Hier können neue, biologisch abbaubare Stromleiter einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigeren Elektroindustrie leisten [17], besonders auch vor dem Hintergrund der endlichen metallischen Rohstoffe. Wie eingangs bereits erwähnt, wurden die leitfähigen Strukturen der Kabelbakterien bereits durch verschiedene europäische Wissenschaftler patentiert [3, 4]. Inwiefern sich diese Patente kommerziell realisieren lassen, wird sich in den nächsten Jahren zeigen.



◀ **Abb. 4:** Die spanische Künstlerin Anna Pasco Bolta nutzt die elektrische Leitfähigkeit der Kabelbakterien bereits in ihren Projekten: Mit *Candidatus Electronema*-Filamenten verbindet sie Mikrofon und Verstärker für ihre über Kabelbakterien gelesene Gedichte (<https://www.instagram.com/apascobolta/>).

Sehr viel greifbarer aber ist die elektrische Leitfähigkeit der Kabelbakterien heute bereits in den Projekten der spanischen Künstlerin Anna Pasco Bolta: Sie experimentiert mit frisch aus Sedimenten extrahierten *Ca. Electronema*-Filamenten und verbindet damit Mikrofon und Verstärker (**Abb. 4**, www.annapascobolta.com/). Auf ihrem Instagram-Account sind ihre so über Kabelbakterien (sic!) gelesene Gedichte hinterlegt.

Nächstes Ziel: Kultivierung

Die hier dargestellten Beispiele unterstreichen die bemerkenswerten Anwendungsperspektiven dieser faszinierenden Mikrobe des Jahres. Für jegliche biotechnologische Anwendung besteht aber nach wie vor das Problem der ungelösten Kultivierbarkeit. Auch wenn regelmäßig neue Ideen und Strategien für eine gezieltere Anreicherung von Kabelbakterien publiziert werden [13, 18], scheinen unsere Kultivierungssysteme im Labor die spezielle ökologische Nische dieser Gradientenorganismen in der Natur noch immer nicht gut genug zu reflektieren. Ein solches Verständnis wird weiterhin essenziell sein, um die Mikrobe des Jahres 2024 ihrem vollen zukünftigen Anwendungspotenzial zuzuführen.

Danksagung

Wir danken allen Kolleginnen und Kollegen für die gemeinsame Forschung zum Thema Kabelbakterien. Ebenso danken wir Robin Bonn , Ugo Marzocchi und Kartik Aiyer (CEM Aarhus) für die Bereitstellung von Bildmaterial und Diskussionen zum Artikel sowie Kamiel Ceysens und dem X-Lab (Universität Hasselt) für Bildmaterial. ■

Literatur

- [1] Trojan D, Schreiber L, Bjerg JT et al. (2016) A taxonomic framework for cable bacteria and proposal of the candidate genera *Electrothrix* and *Electronema*. *Syst Appl Microbiol* 39: 297–306
- [2] Pfeffer C, Larsen S, Song J et al. (2012) Filamentous bacteria transport electrons over centimetre distances. *Nature* 491: 218–221
- [3] Nielsen LP, Meyer RL, Boesen T et al. (2013) Bacterial conductive fibres. *EP13162128.6A*
- [4] Meysman F (2019) Isolated microbial conductive fiber material. *EP3543342A1*
- [5] Seitaj D, Schauer R, Sulu-Gambari F et al. (2015) Cable bacteria generate a firewall against euxinia in seasonally hypoxic basins. *PNAS* 112: 13278–13283
- [6] Bjerg JJ, Lustermaans JJM, Marshall IPG et al. (2023) Cable bacteria with electric connection to oxygen attract flocks of diverse bacteria. *Nat Commun* 14: 1614
- [7] M ller H, Bosch J, Griebler C et al. (2016) Long-distance electron transfer by cable bacteria in aquifer sediments. *ISME J* 10: 2010–2019
- [8] Huang Y, Hu W, Dong M et al. (2023) Cable bacteria accelerate the anaerobic removal of pyrene in black odorous river sediments. *J Hazard Mater* 443: 130305
- [9] Liu F, Wang Z, Wu B et al. (2021) Cable bacteria extend the impacts of elevated dissolved oxygen into anoxic sediments. *ISME J* 15: 1551–1563
- [10] Sandfeld T, Marzocchi U, Petro C et al. (2020) Electrogenic sulfide oxidation mediated by cable bacteria stimulates sulfate reduction in freshwater sediments. *ISME J* 14: 1233–1246

- [11] Yuan Y, Zhou L, Hou R et al. (2021) Centimeter-long microbial electron transport for bioremediation applications. *Trends Biotechnol* 39: 181–193
- [12] Marzocchi U, Palma E, Rossetti S et al. (2020) Parallel artificial and biological electric circuits power petroleum decontamination: The case of snorkel and cable bacteria. *Water Res* 173: 115520
- [13] Li C, Reimers CE, Alleau Y (2020) Inducing the attachment of cable bacteria on oxidizing electrodes. *Biogeosciences* 17: 597–607
- [14] Scholz VV, M ller H, Koren K et al. (2019) The rhizosphere of aquatic plants is a habitat for cable bacteria. *FEMS Microbiol Ecol* 95: fiz062
- [15] Scholz VV, Meckenstock RU, Nielsen LP, Risgaard-Petersen N (2020) Cable bacteria reduce methane emissions from rice-vegetated soils. *Nat Commun* 11: 1878
- [16] Bonn  R, Hou J-L, Hustings J et al. (2020) Intrinsic electrical properties of cable bacteria reveal an Arrhenius temperature dependence. *Sci Rep* 10: 19798
- [17] Bonn  R, Wouters K, Lustermaans JJM, Manca JV (2022) Biomaterials and electroactive bacteria for biodegradable electronics. *Front Microbiol* 13: 906363
- [18] Sachs C, Kanaparthi D, Kublik S et al. (2022) Tracing long-distance electron transfer and cable bacteria in freshwater sediments by agar pillar gradient columns. *FEMS Microbiol Ecol* 98: fiac042

Funding note: Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.
Open Access: Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäss nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Korrespondenzadressen:

Dr. Vincent Scholz
 Zentrum für Elektromikrobiologie (CEM)
 Universität Aarhus
 Ny Munkegade 114-116
 DK-8000 Aarhus C
vincent.scholz@bio.au.dk

Prof. Dr. Tillmann L uders
 Lehrstuhl für ökologische Mikrobiologie
 Bayreuther Zentrum für Ökologie und
 Umweltforschung (BayCEER)
 Universität Bayreuth
 Dr.-Hans-Frisch-Straße 1-3
 D-95448 Bayreuth
tillmann.lueders@uni-bayreuth.de

AUTOREN



Vincent Scholz

Jahrgang 1992. 2012–2018 “Water Science”-Studium an der Universität Duisburg-Essen. 2018–2023 Promotion und PostDoc am Zentrum für Elektromikrobiologie, Universität Aarhus, Dänemark.



Tillmann L uders

Biologiestudium. 1999–2001 Promotion am Max-Planck-Institut (MPI) für terrestrische Mikrobiologie, Marburg. 2002–2004 PostDoc am MPI Marburg. 2004–2009 Nachwuchsgruppenleiter (Tenure-Track) am Institut für Grundwasser kologie des Helmholtz Zentrums München. 2013 Habilitation an der TU München. 2016–2019 stellvertretender Institutsleiter am Helmholtz Zentrum München. Seit 2019 Lehrstuhlinhaber für ökologische Mikrobiologie, Universität Bayreuth.