

Von der Abwasserreinigung zur Bioelektrotechnologie: Mikroben unter Strom

MIRIAM A. ROSENBAUM | UWE SCHRÖDER | FALK HARNISCH

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 102 erklärt.

Können Bakterien elektrischen Strom leiten? Ja! Die Erforschung dieses Phänomens erfährt seit circa zehn Jahren einen großen Aufschwung. Neben spannenden wissenschaftlichen Erkenntnissen steht dabei die mögliche technische Nutzung in mikrobiellen bioelektrochemischen Systemen im Mittelpunkt. Diese Systeme können Abwasser als Energiequelle nutzen, Schadstoffe abbauen, Chemikalien herstellen und vieles mehr ...

Vor über 100 Jahren wurde das Auftreten elektrochemischer Phänomene bei anaeroben mikrobiellen Stoffabbauprozessen durch den britischen Botaniker M. C. Potter entdeckt [1]. Die beobachteten Effekte (Ströme und Potenziale) waren kaum messbar, jedoch gaben sie schon damals Anlass, um über eine Kopplung von mikrobiellem Stoffabbau und Stromerzeugung nachzudenken.

Wie gelangt allerdings ein Elektron von der lebenden Zelle zu einer Elektrode, wo doch alle relevanten Stoffwechselvorgänge im Zellinneren ablaufen? Bis

zum Ende des 20. Jahrhunderts ging man davon aus, dass ein solcher Elektronentransfer nur durch künstliche Hilfsmittel, wie dem Zusatz so genannter ►Redoxmediatoren, stattfinden kann – wobei diese organischen, oft toxischen Moleküle den Zellen Elektronen aus dem Stoffwechsel quasi entrissen. Für eine technische Relevanz war die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes allerdings zu gering, und die Notwendigkeit eines permanenten Zusatzes von Redoxmediatoren war mit den Zielen der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit nicht vereinbar.

In der Umweltmikrobiologie war schon länger eine Gruppe anaerober Mikroorganismen bekannt, die – zum Beispiel in Sedimenten – anaerobe Atmung betreiben und Elektronen aus dem oxidativen Stoffabbau an feste Metalloxide abgeben (Überblick in [2]). Erst vor etwa 14 Jahren wurde jedoch entdeckt, dass diese metallreduzierenden Mikroorganismen ohne Zusatz artifizierender Substanzen auch zu einem direkten ►extrazellulären Elektronentransfer (EET) an einer Elektrode in der Lage sind [3]. Der EET versetzt diese Bakterien in die Lage, als elektrochemisch aktive Biofilme (Abbildung 1) auf einer Elektrode zu wachsen und mit dieser einen Elektronenaustausch zu betreiben.

Die Aufklärung der Natur des EET ist sicherlich eine der spannendsten wissenschaftlichen Fragestellungen im Bereich der mikrobiellen Elektrochemie. Bislang konnte eine Reihe unterschiedlicher Prinzipien des EET entschlüsselt beziehungsweise vorgeschlagen werden (Abbildung 2) [4].

Als einfachster EET-Mechanismus mag der direkte Elektronentransfer zwischen Zelle und Elektrode mittels transmembraner Redoxproteine (zum Beispiel Cytochromen) angesehen werden (Abbildung 2a). Diese Proteine übertragen Elektronen via multipler Häm-Einheiten über die Zellmembran auf eine in unmittelbarer Nähe befindliche Elektrode. Da dieser Transfermechanismus die direkte Nachbarschaft eines Elektronenempfängers (oder -donors) erfordert, können Elektronen nur über einen direkten Zell-Elektrodenkontakt ausgetauscht werden. Inwiefern auch ein über längere Distanzen (d.h. Biofilme aus mehreren Zellschichten) reichender Elektronentransfer mittels Zell-Zell-Elektronenweitergabe möglich ist, wird derzeit diskutiert.

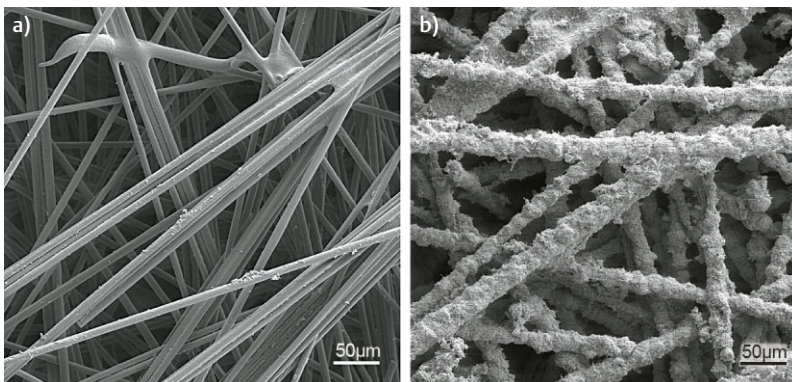
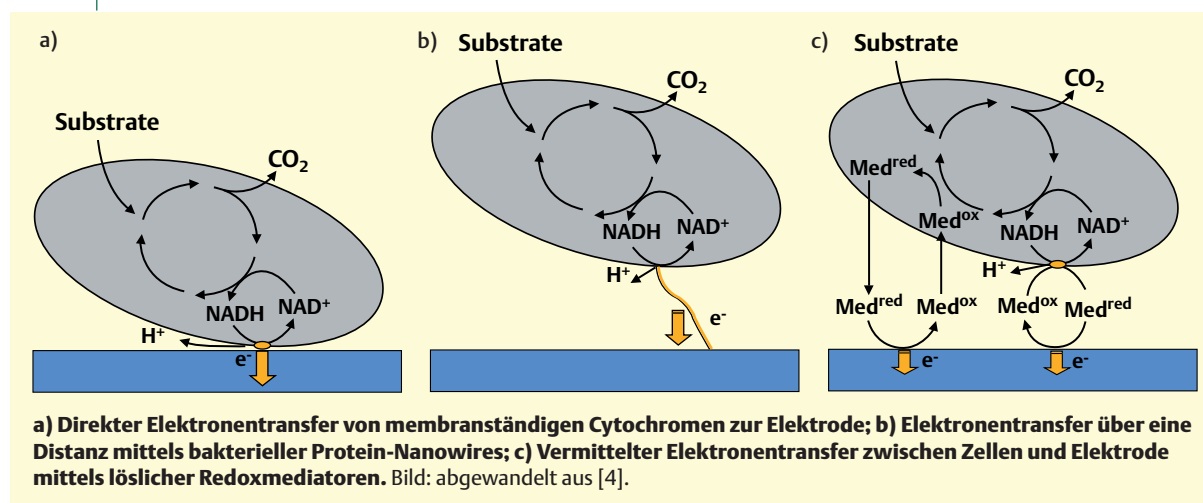


ABB. 1 Ausbildung eines elektrochemisch aktiven Biofilms auf einer Kohlenstoff-Faserelektrode (rasterelektronenmikroskopische Aufnahme). a) Faserelektrode vor der Besiedlung. b) Mit einem Biofilm bedeckte Elektrode einer aus Abwasser selektierten Mischkultur. Bilder: R. Sietmann/ Universität Greifswald.

ABB. 2 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VON MECHANISMEN DES EXTRAZELLULÄREN ELEKTRONENTRANSFERS, EET


Eine Elektronenübertragung über mehrere Zellen ist eine wichtige Voraussetzung für hohen bioelektrochemischen Stoffumsatz. Für diese Fernübertragung werden bislang zwei Wege verantwortlich gemacht – der Mediator-basierte Elektronentransfer (Abbildung 2c) und die Elektronenübertragung mittels leitender Pili-Strukturen (Abbildung 2b). In ersterem Fall werden keine künstlichen Redoxmediatoren eingesetzt, sondern es wird die Fähigkeit einiger Organismen zur Produktion eigener Redoxmediatoren ausgenutzt. Diese natürlichen Redoxmediatoren sind dann in der Lage, als „Shuttle“ in zahlreichen Zyklen Elektronen aus dem bakteriellen Stoffwechsel an weit entfernte Elektronenakzeptoren zu liefern. Ein direkter Kontakt von Zellen und Elektroden wird obsolet. Insbesondere für einige *Pseudomonas*- und *Shewanella*-Spezies konnten die beteiligten Moleküle identifiziert werden. Derzeit noch kontrovers diskutiert wird die Elektronenleitung mittels leitfähiger Pilistrukturen. Diese Pili (auch „nanowires“ genannt) werden bei einigen *Geobacter*- und *Shewanella*-Biofilmen für eine teilweise fast metallische Leitfähigkeit verantwortlich gemacht. Welche physikalische Basis zu dieser hohen Leitfähigkeit führt und welchen Einfluss die Matrix aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS), in welche die Zellen eingebettet sind, hier hat, ist allerdings noch vollständig unklar.

Die Biofilmelektrode, das heißt die Einheit aus Elektrodenmaterial (zum Beispiel Graphit) und elektrochemisch aktivem Biofilm, ist das Herz jedes ► mikrobiellen bioelektrochemischen Systems (BES). Der Biofilm dient dabei gewissermaßen als biologischer Elektrokatalysator und ermöglicht so die Verbindung von Biologie und Elektrochemie. Dieser Bioelektrokatalysator ermöglicht den Ablauf von chemischen Reaktionen bei Umgebungsbedingungen, für die es keine chemischen Elektrokatalysatoren gibt, zum Beispiel die Oxidation komplexer Abwasserbestandteile.

Entsprechend der Richtung des Elektronentransfers unterscheidet man zwischen Biofilmanode und -kathode. Bei der Biofilmanode katalysieren die Mikroorganismen die Oxidation von Stoffen (siehe Abschnitt mikrobielle Brennstoffzelle), die Elektronen werden hier von den Organismen auf die Elektrode übertragen. Bei Kathodenprozessen dient die Elektrode als Elektronenquelle für reduktive Stoffwechselreaktionen.

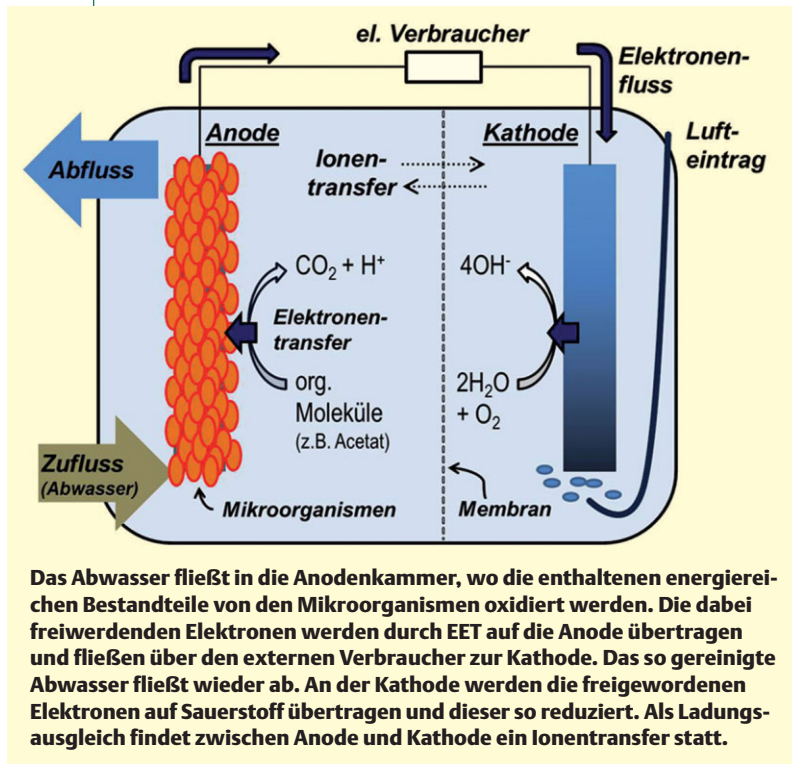
Umwelttechnologische Anwendungen Abwasser als Energieressource: Mikrobielle Brennstoffzellen

Der Urtyp eines BES ist die ► mikrobielle Brennstoffzelle (MBZ). Abbildung 3 stellt das Grundprinzip einer solchen MBZ dar. Die Verwertung von Abwasser zur Erzeugung elektrischer Energie – unter gleichzeitiger Abwasserreinigung – stellt die Hauptmotivation für das große Interesse an elektroaktiven Mikroorganismen dar. Mithilfe von MBZ könnte die heutige Energiesenke Abwasser in eine wertvolle Ressource verwandelt werden (siehe Kasten auf Seite 101).

WELCHE MIKROORGANISMEN PRODUZIEREN STROM?

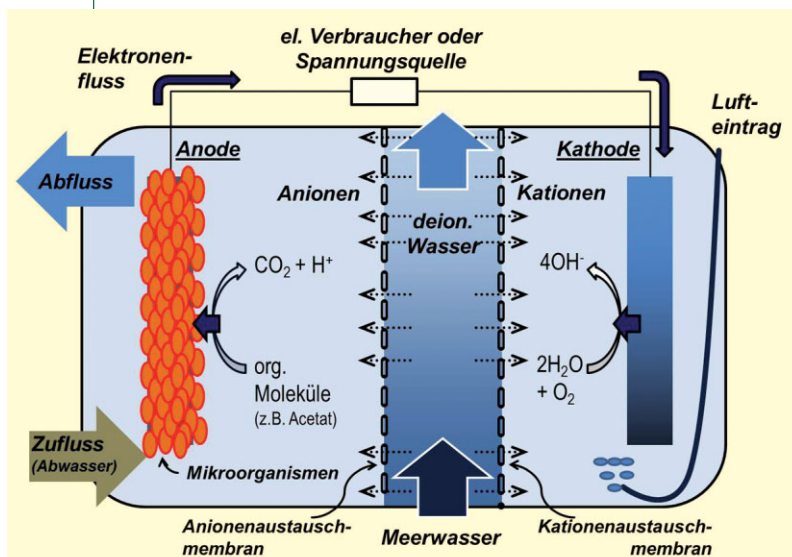
Für viele Anwendungen werden undefinierte mikrobielle Mischkulturen für BES etabliert. Zur Produktion von elektrischem Strom aus Biomasseabfallstoffen sind dabei jedoch unterschiedliche spezifische Funktionen in der Mischkultur essenziell: Es werden hydrolysierende Mikroorganismen benötigt, die höhermolekulares Substrat in organische Säure aufbrechen. Diese organischen Säuren sind dann die bevorzugten Ausgangsstoffe für die elektroaktiven Mikroben in der Stromproduktion. Für die genannten (anodischen) Elektronentransferwege werden derzeit einige Modellorganismen untersucht: *Geobacter sulfurreducens* und *Shewanella oneidensis* für den direkten Elektronentransfer mittels Cytochromen; *Geobacter sulfurreducens* außerdem für die Biofilm-Verdrahtung mittels Protein-Nanowires. Weiter werden *Shewanella oneidensis* und *Pseudomonas aeruginosa* als Modellsysteme für Elektronentransfer mittels natürlicher Redoxmediatoren untersucht. Die Fähigkeit, elektrischen Strom zu erzeugen – aber auch Elektronen aufzunehmen – wurde jedoch noch für viele weitere Mikroorganismen beschrieben.

ABB. 3 | MIKROBIELLE BRENNSTOFFZELLE ZUR ERZEUGUNG ELEKTRISCHER ENERGIE AUS ABWASSER



Das Abwasser fließt in die Anodenkammer, wo die enthaltenen energiereichen Bestandteile von den Mikroorganismen oxidiert werden. Die dabei freiwerdenden Elektronen werden durch EET auf die Anode übertragen und fließen über den externen Verbraucher zur Kathode. Das so gereinigte Abwasser fließt wieder ab. An der Kathode werden die freigewordenen Elektronen auf Sauerstoff übertragen und dieser so reduziert. Als Ladungsausgleich findet zwischen Anode und Kathode ein Ionentransfer statt.

ABB. 4 | MEERWASSERENTSAZUNG



Ausgehend von MBZ (s. hierzu Abb. 3) wird zwischen Anoden- und Kathodenraum durch den Einbau von zwei gegenpoligen ionendurchlässigen Membranen eine zusätzliche Kammer erzeugt. Durch diesen Zwischenraum wird Salzwasser gespült. Durch die (bio)elektrochemischen Reaktionen an Anode und Kathode wird ein Ionentransfer zwischen Anoden- und Kathodenraum angetrieben, der an eine mikrobielle Abwasserreinigung an der Anode gekoppelt ist. Dabei bestimmt die Wahl der Membranen, dass negativ geladene Ionen (Anionen wie Cl^- oder SO_4^{2-}) aus dem Zwischenraum zur Anode und positiv geladene Ionen (Kationen wie Na^+ oder K^+) zur Kathode wandern. Das Resultat ist eine Entsalzung des Wassers im Membranzwischenraum.

Neben den Möglichkeiten zu nachhaltigerer Abwasserbehandlung und Energieerzeugung aus Abwasser können weitere BES-Varianten auch für andere Prozesse im Rahmen des Klärprozesses von Bedeutung sein. So können, bei gleichzeitiger Reinigung des Abwassers durch anodische Oxidation der Abwasserbestandteile, reduktive Reaktionen an der Kathode einen Mehrwert erzeugen [6]. Beispiele sind dabei

- die Abwasserdenitrifizierung an der Kathode, bei welcher oxidierte Stickstoffverbindungen aus dem anodisch vorbehandelten Abwasser in biokathodischen Reaktionen reduziert und geklärt werden;
- die Reduktion von Sauerstoff zu Wasserstoffperoxid, welches kombiniert mit Eisen(II)salzen als Fenton-Reagenz zum Aufschluss schwer abbaubarer Chemikalien zum Einsatz kommt;
- die Erzeugung von molekularem Wasserstoff, der unter anderem als zusätzliche Elektronenquelle innerhalb des Klärprozesses eingesetzt werden kann;
- die reduktive Rückgewinnung von Metallen wie Kupfer aus metallionenhaltigen Abwässern, oder
- die bioelektrochemische Methanbildung, bei welcher Mikroorganismen kathodisch Methangas aus Kohlendioxid bilden.

Ein Teil der genannten Beispiele erfordert die Einbringung von geringen Energiemengen durch Anlegen eines elektrischen Stroms/ einer Spannung. Ist dies der Fall, wird das BES auch als mikrobielle Elektrolysezelle bezeichnet. Die Möglichkeiten sind vielfältig und müssen perspektivisch auf das jeweilige Klärsystem und den Abwassertypus zugeschnitten sein.

Meerwasserentsalzung

Eine interessante umwelttechnologische Anwendung, welche aus mikrobiellen Brennstoffzellen hervorgeht, ist die mikrobiell angetriebene Meerwasserentsalzung [7]. Diese ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Im Idealfall kann so ohne oder nur mit einem sehr geringem Energieaufwand Meerwasser zu Trinkwasser entsalzt werden.

Schadstoffabbau und Bodensanierung

In der Umwelttechnologie können mikrobielle BES auch eine wichtige Rolle im Abbau umweltrelevanter Schadstoffe spielen [8]. Dabei können in einer mikrobiellen Brennstoffzelle potenziell beispielsweise schwer abbaubare Chemikalien wie Arzneimittelrückstände umgesetzt und somit aus dem Abwasser entfernt werden. Ein weiteres vielversprechendes Anwendungsfeld ist die Bodensanierung (Bioremediation). Das Funktionsprinzip des mikrobiellen bioelektrochemischen Schadstoffabbaus ist in Abbildung 5 am Beispiel eines kontaminierten Grundwasserstroms dargestellt. Darüber hinaus können auch toxische Schwermetalle, unter anderem sogar Uran, aus Wasser entfernt werden. In verwandten technologischen Umsetzungen geht es

manchmal auch nicht um den Schadstoffabbau, sondern um Stromgewinnung aus anaeroben Sedimenten. So kann zum Beispiel mit marinen Sediment-MBZ oder mit Pflanzen-MBZ, die im Wurzelgeflecht von Pflanzen etabliert werden, elektrische Energie in abgelegenen Regionen erzeugt werden [9].

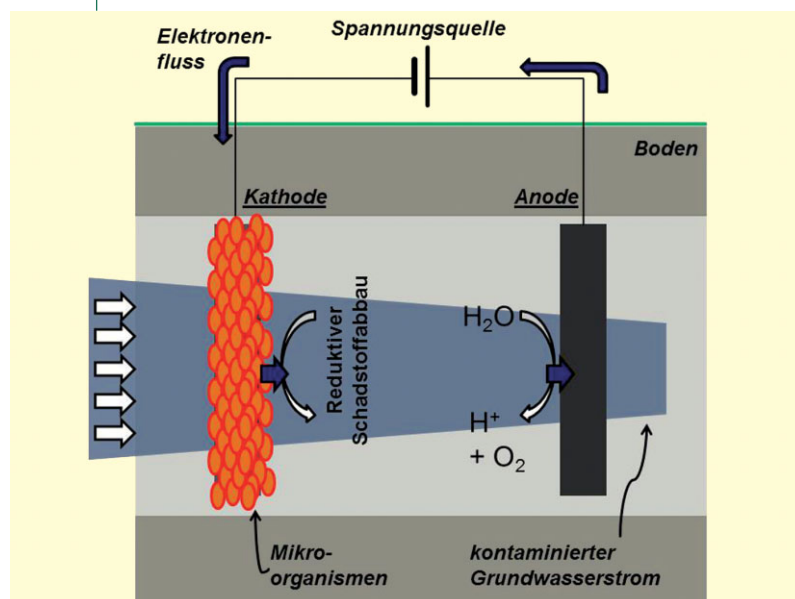
Biotechnologische Anwendungen

Für viele Jahre stand die Nutzung des mikrobiellen EET in undefinierten mikrobiellen Mischkulturen für energetische oder umwelttechnische Prozesse im Vordergrund. Arbeiten mit mikrobiellen Reinkulturen fokussierten hauptsächlich auf wissenschaftliche Fragestellungen zum EET. Außerdem wurde der EET vorwiegend für anodische Oxidationen genutzt und Kathodenreaktionen wurden oft den Bedürfnissen der Anode angepasst. Mechanistische Erkenntnisse zum EET, Fortschritte in der gezielten Manipulation von Mikroorganismen (zum Beispiel durch synthetische Biologie) und erste Studien zur gezielten Aufnahme von kathodischen Elektronen zum Antrieb von Stoffwechselreaktionen eröffnen nun auch vielfältige Anwendungen in der Biotechnologie [10].

Mikrobielle Elektrotransformationen

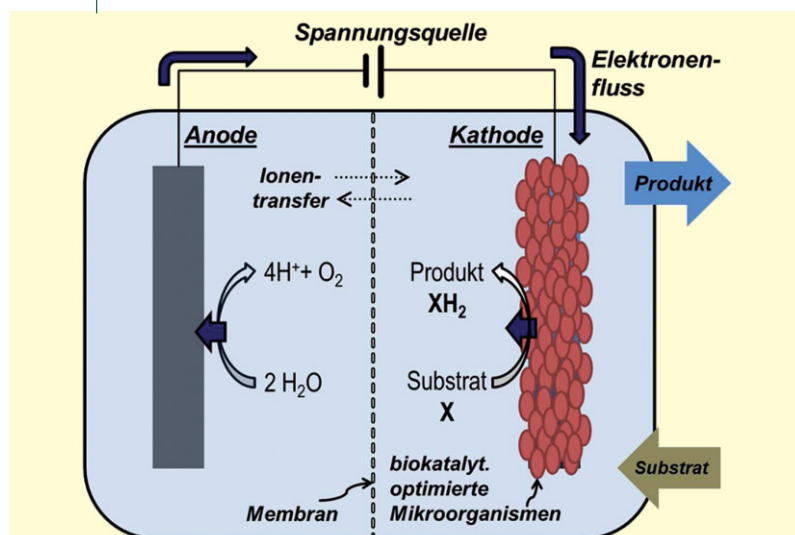
Wenn Mikroben eine Anode oder Kathode gezielt als Elektronenakzeptor oder -donor verwenden können, besteht die Möglichkeit, dies an spezifische enzymatische Reaktionen in deren Stoffwechsel zu koppeln. So können einfache Redoxreaktionen realisiert werden, bei denen ein bis zwei Elektronen von oder auf spezifische Substrate übertragen werden (Abbildung 6). Diese Elektrotransformationen können zum Beispiel bei der Herstellung von Feinchemikalien interessant werden. Der Vorteil der mikrobiellen Bioelektrokatalyse – im Gegensatz zur enzymatischen Redoxkatalyse – besteht darin, dass teures Co-Faktorrecycling durch die Nutzung von ganzzelligen Bioelektrokatalysatoren elegant umgangen werden kann. Man kann solche Prozesse jeweils für Reduktionen oder Oxidationen gestalten, indem wichtige biokatalytische Reaktionen in elektroaktiven Mikroben verankert werden. Synthetische Biologie und rationelles Proteindesign sind dabei wichtige Methoden, um mikrobiellen EET und biokatalytische Schritte zu optimieren. Bisher bekannte Beispielreaktionen (jedoch ohne die Nutzung von synthetischer Biologie) sind die bioelektrokatalytische Wasserstoffproduktion, die Reduktion von CO_2 zu Methan oder die Reduktion von Fumarat zu Succinat. Aktuelle Forschungsvorhaben streben nun Redoxprozesse bei der Herstellung industriell relevanter Feinchemikalien an. Im Gegensatz zur klassischen chemischen Katalyse können auf diesem Wege gezielt chemo-, regio- und stereospezifische Redoxreaktionen in komplexen chemischen Molekülen erzielt werden. Da für die Umsetzung von Feinchemikalien (im Vergleich zu Abwasser in

ABB. 5 | MIKROBIELLES ELEKTROCHEMISCHES SYSTEM ZUM SCHADSTOFFABBAU IN GRUNDWASSER



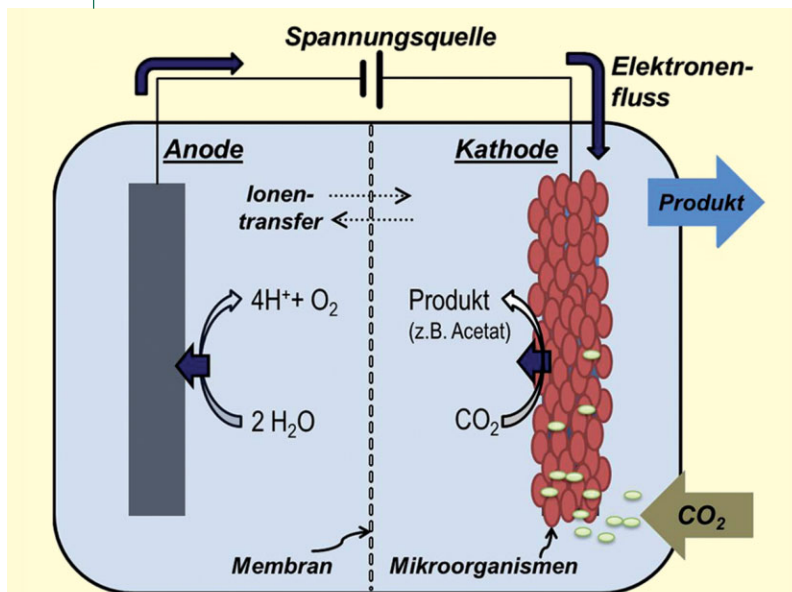
Die beiden Elektroden werden in eine grundwasserführende Schicht eingesetzt, wobei aufgrund der räumlichen Trennung keine Membran notwendig ist. Ein wichtiger Unterschied zu mikrobiellen Brennstoffzellen (Abb. 3) ist allerdings, dass die Gesamtreaktion der Zelle nur unter Energieaufwand abläuft und daher eine externe Energiequelle notwendig ist. Weiterhin sind viele Abbaureaktionen Reduktionen, welche an der Kathode stattfinden.

ABB. 6 | MIKROBIELLE ELEKTROTRANSFORMATION UNTER NUTZUNG VON MIKROBIELLEM EET (HIER AN EINER KATHODE)



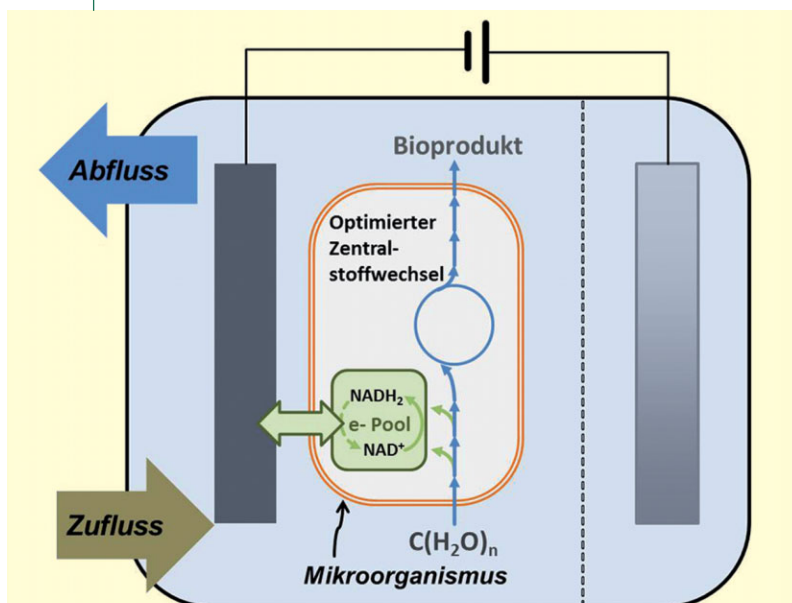
Ein Biofilm eines biokatalytisch optimierten Mikroorganismus reduziert an einer Kathode ein Substrat X selektiv zum Produkt XH_2 . Für biotechnologisch interessante Konzepte wird vor allem die Chemo-, Regio-, und Stereospezifität der Reaktion von großem Wert sein. Dabei wird das Reaktionssubstrat nicht als Wachstumssubstrat für den Biofilm verwendet, sondern ein separates Wachstumssubstrat sorgt für stabile stationäre Eigenschaften des Biofilms. Analog können auch anodische Konzepte (d.h. zur mikrobiellen Elektrooxidation) entwickelt werden.

ABB. 7 | AUFBAU EINER MIKROBIELLEN ELEKTROSYNTHESEZELLE



An einer Kathode wird Kohlendioxid durch mikrobielle Bioelektrokatalyse zu Biochemikalien reduziert. Im Gegensatz zu mikrobiellen Brennstoffzellen, die elektrischen Strom erzeugen (Abb. 3), muss für diese Reaktion elektrische Energie investiert werden. Diese Technologie bietet somit die Möglichkeit, elektrische Energie als chemische Energie zu speichern. Durch die genetische Manipulation von Mikroorganismen sind vielfältige biochemische Produkte möglich. An der Anode können verschiedene Reaktionen ablaufen; hier gezeigt ist die Elektrolyse von Wasser.

ABB. 8 | BIOELEKTROCHEMISCHE FERMENTATIONSSTEUERUNG



Ein Großteil biotechnologischer Prozesse beruht auf Redoxreaktionen. Für eine optimierte Produktbildung ist daher eine ausgeglichene Redoxbilanz über das Gleichgewicht des $\text{NAD}^+/\text{NADH}_2$ -Pools erstrebenswert. In mikrobiellen BES können Anoden überschüssige Energie (als Reduktionsäquivalente) abziehen oder Kathoden fehlende Energie beisteuern (d.h., die linke gezeichnete Elektrode fungiert je nach gewünschter Richtung des Elektronenflusses als Anode oder Kathode).

MBZ) auch die Prozessgrößenordnung und damit die Investitionskosten um ein Vielfaches sinken, ist die Realisierbarkeit solcher Systeme durchaus greifbar. Mit Spannung können wir uns daher auf ganz neue Strategien in der Redox-Biotechnologie freuen.

Mikrobielle Elektrosynthese

Kürzlich wurden Bakterien identifiziert, die kathodische Elektronen direkt als Energiequelle für komplexere Biosynthesen verwenden können. So wurde unter anderem für eine Reihe von homoacetogenen Clostridien die Reduktion von Kohlendioxid zu Acetat mit kathodischen Elektronen beschrieben (Abbildung 7) [11]. Diese Reaktionen laufen derzeit noch mit sehr geringen Umsatzraten ab. Grundsätzlich fehlt bislang ein tieferes wissenschaftliches Verständnis der mikrobiellen Physiologie, um diese Raten gezielt verbessern zu können. Es ergeben sich damit jedoch völlig neue potenzielle Anwendungsfelder für mikrobielle BES: die Speicherung von elektrischer Energie in Form von bioelektrochemisch erzeugten Chemikalien oder Brennstoffen. Während die nachhaltige Erzeugung von Elektrizität bereits weit voran geschritten ist, liegen die Hauptprobleme bei der großflächigen Umsetzung in der schwankenden Produktivität vieler erneuerbarer Energiequellen (zum Beispiel Wind, Sonne, Wasser). Effiziente Energiespeicher für elektrische Energie in Überproduktionszeiten sind daher von großem Interesse. Die mikrobielle Elektrosynthese (ausgehend von CO_2 oder anderen Grundbausteinen wie Formiat oder Methanol) kombiniert mit synthetischer Biologie für gezieltes Reaktionswegedesign unterstützt theoretisch zahlreiche Möglichkeiten der (bio)chemischen Energiespeicherung (und gleichzeitige Verwertung des Treibhausgases Kohlendioxid). Es muss jedoch bedacht werden, dass dieses junge Forschungsfeld noch in den Kinderschuhen steckt und eine ökonomische Umsetzung derzeit noch nicht abgeschätzt werden kann.

Fermentationssteuerung

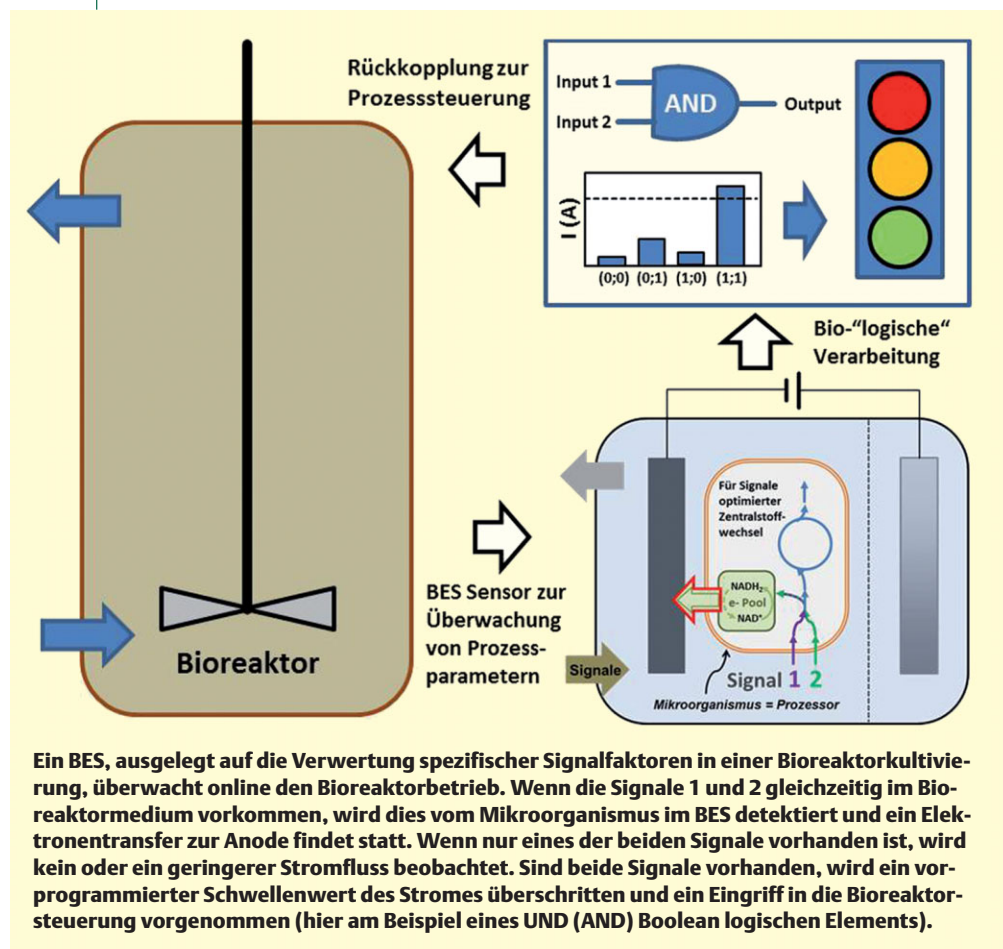
Eine weitere Anwendung von BES in der Biotechnologie, die schon etwas länger Tradition hat, ist die Steuerung von Fermentationsprozessen. Ausgewogene metabolische Redoxbilanzen sind eine Grundvoraussetzung für eine hohe Produktivität in Fermentationsprozessen und eine Unterversorgung oder ein Überschuss von Reduktionsäquivalenten (d. h. Elektronen) sind häufig Ursache für geringe Produktivität und unerwünschte Nebenprodukte. Schon frühzeitig wurden polarisierte Elektroden in Bioreaktoren integriert, um die Redoxbedingungen während der Fermentation zu beeinflussen [12]. Unser relativ frisches Wissen über mikrobiellen EET und neue Methoden der genetischen Manipulation erlauben es nun, auch gezielt in Fermentationen mit einem Redoxungleichgewicht einzugreifen (Abbildung 8). So wurde das anoden-aktive Bakterium *Shewanella on-*

eidensis genetisch mit einem Fermentationsweg ausgestattet, bei dem Glycerol zu Ethanol umgewandelt wird [13]. Da Glycerol reduzierter ist als das Produkt Ethanol und somit jeweils zwei Elektronen aus dem Substrat „entsorgt“ werden müssen, läuft diese Fermentation normalerweise nur ineffektiv unter Produktion reduzierter Nebenprodukte ab. *Shewanella oneidensis* ist nun in der Lage, die überschüssigen Elektronen an die Anode abzugeben. Prozessoptimierung führte hier am Ende zu einer stöchiometrischen Umsetzung von Glycerol zu Ethanol – d.h. eine Umsetzung von einem Abfallprodukt der Biodieselherstellung in einen wertvollen Biobrennstoff.

Biocomputing

In mikrobiellen BES wird ein elektrischer Strom erzeugt, der direkt von der mikrobiellen Stoffwechselaktivität abhängt. Dies bietet sich für Anwendungen in der Biosensorik geradezu an. So können BES als Sensoren für den biochemischen Sauerstoffbedarf oder bestimmte Stoffwechselprodukte oder Toxine, die einen mikrobiellen Grundstrom beeinflussen, entwickelt werden. Auch in der Bioprozesstechnik sind Sensoren, die zum Beispiel die Fermentation überwachen (am besten online und in Echtzeit), von großer Bedeutung. Da die Aktivität der elektroaktiven Mikroorganismen und somit die BES-Stromproduktion von externen Einflussbedingungen (d.h. Signalen) abhängig ist, können diese für logische Entscheidungen in der Prozesssteuerung herangezogen werden [14]. Dabei aktivieren beziehungsweise deaktivieren verschiedene externe Einflusssignale (zum Beispiel Substratkonzentration, Nebenprodukte, Makronährstoffe, Toxine) die Mikroorganismen, welche dann als „Übersetzer“ (Prozessoren) *via* einfacher Boolean Logik (UND, ODER, ENTWEDER-ODER usw.) dienen (Abbildung 9). Das Ergebnis – ein veränderter Stromfluss – kann dann als „Schalter“ für die Prozesskontrolle dienen, zum Beispiel Prozessstopp bei unerwünschten Nebenprodukten, Steigerung der Substratzufuhr, Alarmierung von Kontrollpersonal. Da hierbei relativ kleine BES in Prozessnebenströmen eingesetzt werden können (~100 mL), sind technische und ökonomische Herausforderungen für eine reale Umsetzung von BES in diesem Bereich eher gering. Die Hauptaufgabe für die For-

ABB. 9 | MIKROBIELLES BIOCOMPUTING



Ein BES, ausgelegt auf die Verwertung spezifischer Signalfaktoren in einer Bioreaktorkultivierung, überwacht online den Bioreaktorbetrieb. Wenn die Signale 1 und 2 gleichzeitig im Bioreaktormedium vorkommen, wird dies vom Mikroorganismus im BES detektiert und ein Elektronentransfer zur Anode findet statt. Wenn nur eines der beiden Signale vorhanden ist, wird kein oder ein geringerer Stromfluss beobachtet. Sind beide Signale vorhanden, wird ein vorprogrammierter Schwellenwert des Stromes überschritten und ein Eingriff in die Bioreaktorsteuerung vorgenommen (hier am Beispiel eines UND (AND) Boolean logischen Elements).

schung besteht hier deshalb in erster Linie darin, stabile und reproduzierbare mikrobielle Prozessoren für spezifische Anwendungen zu etablieren. Ganz ähnliche Biocomputing-Ansätze gibt es übrigens auch für enzymatische bioelektrochemische Prozessoren, die für spannende Anwendungen im medizinischen Bereich entwickelt werden [15].

ABWASSER ALS ENERGIEQUELLE?!

Abwasser ist eine vielfältige und komplexe Mischung energiereicher Moleküle. Allerdings liegen diese sehr verdünnt vor, weshalb die Energie im Abwasser mit vielen etablierten Technologien nicht oder nur schwer nutzbar ist. Ganz im Gegenteil: Derzeit muss viel Energie aufgebracht werden, um Abwasser zu reinigen. Beispielsweise wird in Deutschland circa 20% des kommunalen Stromverbrauchs den Kläranlagen zugeschrieben [5]. Da Bakterien aber oft auf genau auf diese „verdünnten“, d.h. niedrigerenergetischen Energiequellen spezialisiert sind, lässt sich die Energie im Abwasser mit deren Hilfe hervorragend nutzen. Eine Sonderrolle können in diesem Zusammenhang industrielle Abwässer spielen. Im Gegensatz zu kommunalen Abwässern zeichnen diese sich oft durch eine konstante und definierte Zusammensetzung aus. Hier könnten beispielsweise Abwässer der Lebensmittelindustrie, welche eine hohe Konzentration an organischen Nährstoffen besitzen (u.a. aus Brauereien oder Zuckerraffinerien), als hervorragende Energiequellen für die Stromerzeugung in mikrobiellen Brennstoffzellen dienen.

Danksagung
M.A.R. dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für finanzielle Förderung über das Exzellenzcluster „Tailor-Made Fuels from Biomass“ und über das Zukunftskonzept II der RWTH Aachen. F.H. dankt dem BMBF (Forschungspreis Biotechnologie 2020+) sowie der Helmholtzgemeinschaft deutscher Forschungszentren für Förderung.

Zusammenfassung

Stromleitende Mikroben – das klingt nach Science Fiction oder zumindest nach einem exotischen natürlichen Phänomen. Intensive Grundlagenforschung in diesem Bereich zeigt jedoch, dass dieser Prozess in der anaeroben mikrobiellen Ökologie weit verbreitet scheint. Mikroben „verdrahten“ sich mit ihrer belebten und unbelebten Umwelt, um energetische Netzwerke aufzubauen. In mikrobiellen bioelektrochemischen Systemen wird versucht, diese Erkenntnisse für umwelt- und biotechnologische Anwendungen nutzbar zu machen. Während frühe Vorhaben fast ausschließlich darauf abzielten, mit Hilfe dieser Netzwerke Energie als elektrischen Strom in mikrobiellen Brennstoffzellen zu gewinnen, entsteht mittlerweile eine wachsende Vielfalt weiterführender Anwendungen. Dabei ermöglicht uns unser wachsendes Verständnis des mikrobiellen extrazellulären Elektronentransfers, diese Prozesse kontrolliert für uns nutzbar zu machen.

Summary

Microbes wired up – From wastewater treatment to bioelectrotechnology
Electron conducting microbes – this still sounds like science fiction or at least like an exotic natural phenomenon. Groundbreaking research in this area, however, indicates that this process seems to be widely spread within anaerobic microbial ecology. Microbes „wire up“ with their living and non-living surrounding to construct energetic networks. With microbial bioelectrochemical systems, we try to utilize this knowledge for environmental and biotechnological applications. While initially, the recovery of energy as electric current in microbial fuel cells was the main R&D target, our new scientific insights of microbial extracellular electron transfer allow us to make controlled use of this phenomenon for a multitude of further applications.

GLOSSAR

Extrazellulärer Elektronentransfer (EET): physiologischer Elektronentransfer zu oder von festen extrazellulären Elektronenakzeptoren oder Elektronendonoren, bspw. Eisenmineralen oder Elektroden.

Nanowire (Mikrobieller Nanodraht): Spezielle extrazelluläre Proteinstrukturen, die einen mikrobiellen Biofilm elektronisch vernetzen können, hier ist der EET auch über größere Distanzen möglich.

Redoxmediatoren: hier lösliche abiotische oder natürliche reversibel redox-aktive Substanzen, die den EET zwischen Mikroorganismen und Elektronenakzeptoren/-donoren gewährleisten können.

Mikrobielles bioelektrochemisches System (BES): Umwelt- oder biotechnologischer Reaktor zur Nutzung von extrazellulären Elektronentransferprozessen an Elektroden.

Mikrobielle Brennstoffzelle (MBZ): BES zur Umwandlung von chemischer Energie (z.B. aus Abwasser) in elektrische Energie, wobei jeweils die Brennstoffoxidation (Abwasser) an der Anode und die Reduktion des Oxidationsmittels (Sauerstoff) an der Kathode durch Mikroorganismen katalysiert werden kann.

Schlagworte

Bioenergie, Abwasser, mikrobieller Elektronentransfer, mikrobielle Brennstoffzelle, Redox-Biotechnologie

Literatur

- [1] M. C. Potter, Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds, Proc. Roy. Soc. London (B) 1911, 84, 260–276.
- [2] K. H. Neelson, A. Belz, B. McKee, Breathing metals as a way of life: Geobiology in action, A. van Leeuw. J. Microb. 2002, 81, 215–222.
- [3] B.-H. Kim, H.-J. Kim, M.-S. Hyun, D.-H. Park, Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*, J. Microbiol. Biotechnol. 1999, 9, 127–131.
- [4] U. Schröder, Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency, Phys. Chem. Chem. Phys. 2007, 9, 2619–2629.
- [5] K. Fricke, Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2009.
- [6] F. Harnisch, U. Schröder, From MFC to MXC: chemical and biological cathodes and their potential for microbial bioelectrochemical systems, Chem. Soc. Rev. 2010, 39, 4433–4448.
- [7] X. Cao et al., A new method for water desalination using microbial desalination cells, Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 7148–7152.
- [8] F. Aulenta, M. Majone, Bioelectrochemical systems (BES) for subsurface remediation. In: Bioelectrochemical Systems: from extracellular electron transfer to biotechnological application. K. Rabaey, L. T. Angenent, U. Schröder, J. Keller, eds. (2010) London: International Water Association. 305–326.
- [9] H. Deng, Z. Chen, F. Zhao, Energy from plants and microorganisms: Progress in plant–microbial fuel cells, ChemSusChem 2012, 5, 1006–1011.
- [10] K. Rabaey, R. A. Rozendal, Microbial electrosynthesis – revisiting the electrical route for microbial production, Nat. Rev. Microbiol. 2010, 8, 706–716.
- [11] K. P. Nevin et al., Electrosynthesis of organic compounds from carbon dioxide catalyzed by a diversity of acetogenic microorganisms, Appl. Environ. Microbiol. 2011, 77, 2882–2886.
- [12] R. Emde, W. Trosch, W. Krischke, B. Schuppert, Microbial fermentation using continuously regenerated redox mediator, where microbe is anaerobic, facultative anaerobe, or is micro-aerophilic or aero-tolerant (1992) Germany DE4024937: Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V.
- [13] J. M. Flynn, D. E. Ross, K. A. Hunt, D. R. Bond, J. A. Gralnick, Enabling unbalanced fermentations by using engineered electrode-interfaced bacteria, mBio 2010, 1, no. 5e00190-10.
- [14] M. A. TerAvest, Z. Li, L. T. Angenent, Bacteria-based biocomputing with cellular computing circuits to sense, decide, signal, and act, Energy Environ. Sci. 2011, 4, 4907–4916.
- [15] M. Pita, M. Privman, E. Katz, Biocatalytic enzyme networks designed for binary-logic control of smart electroactive nanobiointerfaces, Top. Catal. 2012, 55, 1201–1216.

Internet-Ressourcen

Informationen über Hintergründe, Forschungsgruppen und Publikationen unter: www.is-met.org (International Society of Microbial Electrochemistry and Technology)

Die Autoren



Miriam Agler-Rosenbaum ist seit Sommer 2011 Juniorprofessorin für das Fach „Definierte Mikrobielle Mischkulturen/ Mikrobielle Elektrokatalyse“ an der RWTH Aachen. Die aktuelle Arbeit konzentriert sich auf Untersuchungen zur mikrobiellen Physiologie des EET, gepaart mit synthetischer Biologie für die gezielte Gestaltung von mikrobiellen bioelektrochemischen Prozessen. Ihre wissenschaftliche Arbeit in diesem Forschungsfeld begann während des Studiums zur Diplom-Biochemikerin an der Universität Greifswald. Im Jahre 2004 fertigte sie dort zunächst ihre Diplomarbeit und 2006 auch ihre Doktorarbeit als Stipendiatin des Fonds der Chemischen Industrie unter Anleitung von Uwe Schröder (damals Habilitant bei Prof. Dr. Fritz Scholz) an. Anschließend wechselte Dr. Rosenbaum als Postdoc und Forschungsassistentin in die Gruppe von Prof. Dr. Lars Angenent (2007-2008 Washington University in St. Louis, MO; 2008-2011 Cornell University, Ithaca, NY).



Uwe Schröder, geboren 1971, ist Professor für Nachhaltige Chemie und Energieforschung am Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie der TU Braunschweig. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Elektrochemie. Hierbei stehen grundlegende Fragestellungen der elektrochemischen Energiekonversion im Mittelpunkt. Seit über zehn Jahren bilden die mikrobielle Elektrochemie und die mikrobiellen Brennstoffzellen ein Hauptarbeitsgebiet und Publikationsfeld.



Falk Harnisch leitet seit November 2012 die Nachwuchsgruppe „Mikrobielle Bioelektrokatalyse & Bioelektrotechnologie“ am Department für Umweltmikrobiologie des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ in Leipzig. Falk Harnisch studierte Biochemie an der Universität Greifswald und fertigte im Jahre 2006 seine Diplomarbeit unter Anleitung von Uwe Schröder an. Danach schloss er eine Promotion in Umweltchemie – als Stipendiat der Studienstiftung des deutschen Volkes und der Bundesstiftung Umwelt – ebenda an.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Miriam Agler-Rosenbaum
RWTH Aachen
Institut für Angewandte Mikrobiologie
Mikrobielle Elektrokatalyse
Worringerweg 1
52074 Aachen
E-Mail: miriam.rosenbaum@rwth-aachen.de

