

Bioelektrotechnologie

Bioreactors go electro – Bioreaktoren für Bioelektrotechnologie aufrüsten

CARLA GIMKIEWICZ, STEFFI HUNGER, CAROLIN STANG, LUIS F. M. ROSA, ANDREAS ZEHNSDORF, FALK HARNISCH
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG – UFZ, LEIPZIG

Standardized bioreactors allowing systematic process engineering are established. The field of bioelectrotechnology, which combines the microbial or enzymatic conversion with electrical current flow, is still in its infancy. Thus, bioelectrochemical reactor systems are diverse, poorly characterized and not standardized. Here we present a reversible upgrade kit for existing bioreactor systems to perform bioelectrochemical syntheses – allowing a systematic process characterization and development.

DOI: 10.1007/s12268-015-0599-2
© Springer-Verlag 2015

■ Bioelektrotechnologie oder Elektrobiotechnologie ist ein interdisziplinäres und noch sehr junges Forschungsfeld [1–2]. Es kombiniert den Fluss von elektrischem Strom mit mikrobiellen oder enzymatischen Stoffumwandlungen.

Einen besonderen Aufschwung erlebt die Bioelektrotechnologie derzeit vor allem aufgrund ihres Potenzials zur nachhaltigen Her-

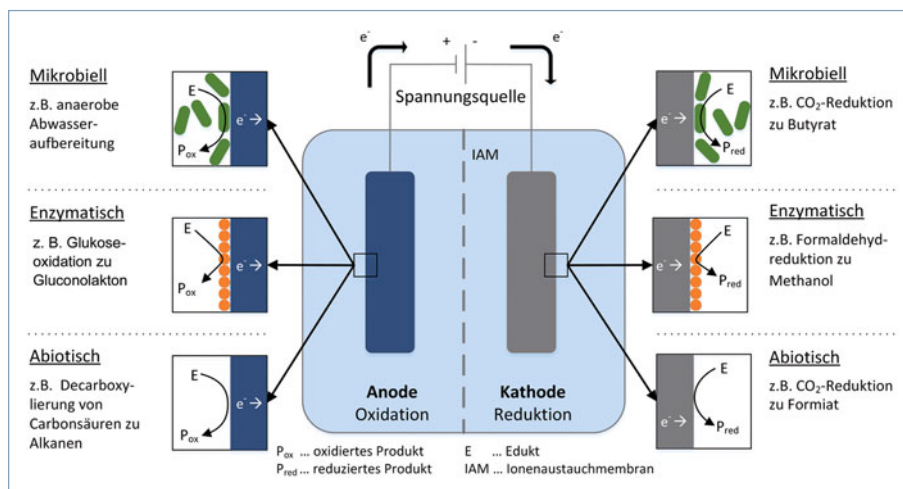
stellung biobasierter Plattformchemikalien. Bei den Biosynthesen müssen die mikrobiellen Zellen stets das Redoxgleichgewicht, das heißt das Gleichgewicht zwischen Oxidations- und Reduktionsreaktionen, einhalten. Daher kommt es bei „klassischen“ Verfahren häufig zur Bildung von unerwünschten Nebenprodukten [3] sowie zur Verringerung der Ausbeute und damit zu zusätz-

lichen Kosten, u. a., um das gewünschte Produkt abzutrennen. Dieses Defizit kann durch die Bioelektrotechnologie ausgeglichen werden: Je nach Elektronenüberschuss oder -mangel können Elektronen über die Elektroden hinzugefügt oder abgezogen werden (**Abb. 1**), um eine selektive Produktbildung zu erreichen. Das elektrochemische Einbringen oder Abziehen von Elektronen in den mikrobiellen Stoffwechsel funktioniert unter der Voraussetzung, dass der Mikroorganismus extrazellulären Elektronentransfer durchführen kann. Eine Eigenschaft, welche einerseits mehr Organismen besitzen, als bisher vermutet, die andererseits aber auch über den Zusatz von Mediatoren realisiert oder über molekularbiologische Methoden eingeführt werden kann [4].

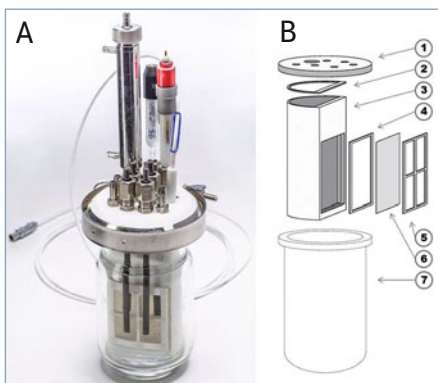
Die Produkte von bisher gezeigten Bioelektrosynthesen, die potenziell alle Redoxreaktionen einschließen (**Abb. 1**), reichen von Wasserstoff [5] und Methan [6] über Essigsäure bis hin zu komplexeren Molekülen wie 1,3-Propandiol [7] und 2-Oxobutyrat [8, 9] (für eine aktuelle Übersicht siehe [10]). Am Beispiel der Lysin-Herstellung aus Saccharose konnte gezeigt werden, dass bei entsprechender Ausbeute ein realistisches Marktpotenzial von mikrobiellen Bioelektrosynthesen gegeben ist [10].

Reaktoren für enzymatische und mikrobielle Bioelektrosynthesen: Status quo

Der vielversprechenden Ausgangslage der Bioelektrotechnologie steht jedoch bisher der Mangel an vergleichbaren Reaktorsystemen gegenüber. Bisher publizierte Reaktorsysteme für bioelektrochemische Synthesen sind häufig individuelle Eigenbauten im kleinen Maßstab, die nur sehr wenig Prozessüberwachung und -steuerung zulassen und damit keine systematische Entwicklung von bekannten und neuen Prozessen ermöglichen [10]. Eine Standardisierung [10–12] ist daher unabdingbar, um die Lücke zwischen Forschung und Anwendung zu schließen.



▲ **Abb. 1:** Schema potenzieller Bioelektrosynthesen. Ein bioelektrochemisches System besteht aus zwei Elektroden, die durch eine ionenselektive Membran voneinander getrennt sein können. An den Elektroden finden mikrobiell, enzymatisch oder abiotisch katalysierte Oxidationen (Anode) bzw. Reduktionen (Kathode) statt. Abhängig von der Reaktion handelt es sich dabei um einen Prozess, der elektrische Energie benötigt oder bereitstellt.



▲ **Abb. 2:** Aufrüstung von Bioreaktoren für die Bioelektrotechnologie: **A**, Aufrüstset im 0,5-Liter-Maßstab (Foto: André Künzelmann, UFZ). **B**, Schema: (1) Reaktordeckel mit Anschlussmöglichkeiten (z. B. Elektroden, Rührer etc.), (2) Dichtung, (3) innere Reaktionskammer mit Öffnung zum Anbringen der Membran, (4) Dichtung, (5) Abdeckung zur Fixierung der ionenselektiven Membran (6), (7) standardisierter Bioreaktor.

Einführung eines universellen Aufrüstsets für Bioreaktoren

Diese Lücke zwischen Grundlagenuntersuchungen und Prozessentwicklung bis hin zum Pilotmaßstab soll das hier präsentierte Aufrüstset schließen helfen (**Abb. 2**). In **Tabelle 1** sind die potenziellen Vorteile zusammengefasst. Besonders hervorzuheben ist hier, dass sich mit diesem Aufrüstset bestehende Bioreaktorsysteme problemlos erweitern lassen, sodass ein reversibler Umstieg von konventionellen Synthesen auf Bioelektrosynthesen möglich ist. Durch die Kopplung mit der vorhandenen Reaktorinfrastruktur kann damit eine kontrollierte Prozessüberwachung und -steuerung erfolgen. Somit erlaubt diese Standardisierung erstmalig nicht nur eine systematische Entwicklung und Skalierung, sondern auch den direkten Vergleich von Bioelektrosynthesen untereinander sowie mit konventionellen Synthesen.

Im Rahmen unserer Entwicklungen wurde das Aufrüstset bereits für klassische elektroaktive Kultivierungen (Geobacteraceae, Shewanellaceae) als auch für neuartige Synthesen, z. B. durch Kopplung mit der *in situ* CO₂-Reduktion, erfolgreich eingesetzt.

Tab. 1: Vorteile des Aufrüstsets für Bioreaktoren zur Bioelektrotechnologie

Ausgewählte Vorteile	
... gegenüber den bisherigen bioelektrochemischen Reaktorsystemen	... bei der Umrüstung von einem klassischen Standardbioreaktor auf Bioelektrosynthesen
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Einfache Handhabung ✓ Sterilisierbar bei mind. 121 °C ✓ Prozesssteuerung und -überwachung (z. B. T, pH, pO₂, Substratzugabe) ✓ Flexibel mit oder ohne Abschirmung (1- oder 2-Kammersysteme) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Potenziell höhere Chemo-, Regio- und Stereospezifität ✓ Geeignet für planktonische als auch Biofilmprozesse ✓ Kombinierbar mit bestehenden Reaktorsystemen zahlreicher Hersteller ✓ Für verschiedene Reaktorgrößen auslegbar ✓ Verschiedene Reaktorgeometrien möglich
Bei Nutzung der Trennung mittels Membran:	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperierung beider Reaktionskammern möglich ✓ Einfache Membranfixierung ✓ Membran austauschbar 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aufrüstung ist reversibel, sodass teure Doppelaufschaffungen vermieden werden ✓ Anschlussfähig für Weiterentwicklungen, z. B. ist eine systematische Skalierung der Prozesse bis hin zum industriellen Maßstab möglich ✓ Bestehende Peripherie und Expertise weiterhin nutzbar

Danksagung

Die Autoren danken dem Team der Werkstatt für den wissenschaftlich-technischen Gerätebau des UFZ um Peter Portius für die exzellente Zusammenarbeit. Das Projekt wurde von der Helmholtz-Gemeinschaft im Rahmen des Programms Erneuerbare Energien gefördert. F. Harnisch dankt dem BMBF (Forschungspreis „Nächste Generation biotechnologischer Verfahren – Biotechnologie 2020+“) sowie der Helmholtz-Gemeinschaft (Helmholtz-Nachwuchsgruppe) für die Unterstützung. ■

Literatur

- [1] Rabaey K, Rozendal RA (2010) Microbial electrosynthesis – revisiting the electrical route for microbial production. *Nat Rev Micro* 8:706–716
- [2] DECHEMA-Arbeitskreis Elektrobiotechnologie, www.dechema.de/Elektrobiotechnologie.html
- [3] Flynn JM, Ross DE, Hunt KA et al. (2010) Enabling unbalanced fermentations by using engineered electrode-interfaced bacteria. *MBio* 1:e00190-10
- [4] Agler-Rosenbaum M, Schröder U, Harnisch F (2013) Mikroben unter Strom. *Biologie in unserer Zeit* 43:96–103
- [5] Rozendal RA, Jeremiasse AW, Hamelers HV et al. (2008) Hydrogen production with a microbial biocathode. *Environ Sci Technol* 42:629–634
- [6] Cheng S, Xing D, Call DF et al. (2009) Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis. *Environ Sci Technol* 43: 3953–3958
- [7] Zhou M, Chen J, Freguia S et al. (2013) Carbon and electron fluxes during the electricity driven 1,3-propanediol biosynthesis from glycerol. *Environ Sci Technol* 47:11199–11205
- [8] Nevin KP, Woodard TL, Franks AE et al. (2010) Microbial electrosynthesis: feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds. *MBio* 1:e00103-10

- [9] Nevin KP, Hensley SA, Franks AE et al. (2011) Electrosynthesis of organic compounds from carbon dioxide is catalyzed by a diversity of acetogenic microorganisms. *Appl Environ Microbiol* 77:2882–2886
- [10] Harnisch F, Rosa LF, Kracke F et al. (2014) Electrifying white biotechnology: engineering and economic potential of electricity-driven bio-production. *ChemSusChem* 8:758–766
- [11] Harnisch F, Rabaey K (2012) The diversity of techniques to study electrochemically active biofilms highlights the need for standardization. *ChemSusChem* 5:1027–1038
- [12] Sharma M, Bajracharya S, Gildemyn S et al. (2014) A critical revisit of the key parameters used to describe microbial electrochemical systems. *Electrochim Acta* 140:191–208



Luis F. M. Rosa, Steffi Hunger, Andreas Zehndorf, Carolin Stang, Carla Gimkiewicz und Falk Harnisch (v. l. n. r.).

Korrespondenzadresse:

Dr. Falk Harnisch
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Department Umweltmikrobiologie
Permoserstraße 15
D-04318 Leipzig
Tel.: 0341-235-1337
Fax: 0341-235-45-1315
falk.harnisch@ufz.de