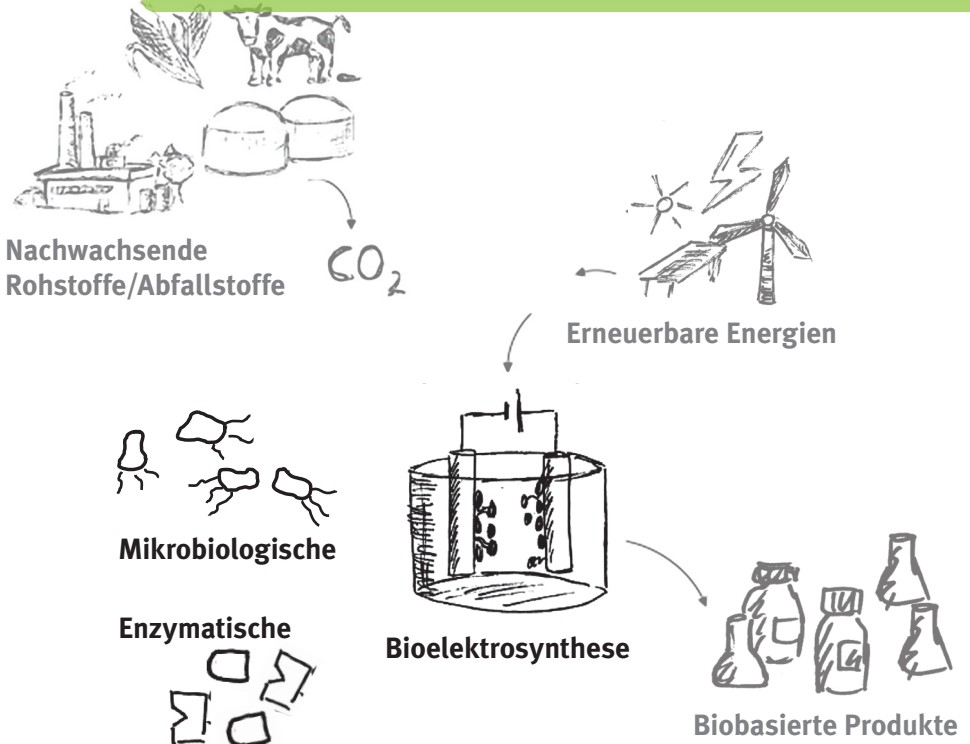


POSITIONSPAPIER

Die Bioelektrosynthese als essentieller Baustein der Bioökonomie



Autoren der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Dirk Holtmann
DECHEMA-Forschungsinstitut
Industrielle Biotechnologie
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Falk Harnisch
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Department Umweltmikrobiologie
Permoserstraße 15
04318 Leipzig

sowie alle Mitglieder des Temporären Arbeitskreises Elektrobiotechnologie

Wir danken Franziska Enzmann für die Gestaltung der Illustrationen.

Inhalt

Zusammenfassung	4
Einleitung	6
Konzepte, Erfolgsbeispiele und Handlungsfelder der Elektrobiotechnologie	9
Enzymatische Elektrosynthesen	9
Mikrobielle Elektrosynthesen	11
Aktuelle Herausforderungen und übergreifende Handlungsfelder	14
Elektrobioraffinerien – ein Zukunftsszenario	16
Literaturverzeichnis	17
Impressum	19

Zusammenfassung

Eine künftige Bioökonomie zur Produktion von Chemikalien und Treibstoffen muss sowohl nachwachsende Rohstoffe nutzen als auch regenerative elektrische Energiequellen einbinden. Mit etablierten Technologien lässt sich die notwendige Verbindung zwischen Chemie- und Energiesektor jedoch nicht oder nur in sehr geringem Umfang erreichen. Enzymatische und mikrobielle Elektrosynthesen – zusammengefasst als „Bioelektrosynthesen“ – können diese Verbindung herstellen. Bioelektrosynthesen basieren auf der Kombination von enzymatischen und mikrobiellen Synthesen mit elektrochemischen Verfahrensschritten und ermöglichen, die Vorteile beider Technologien optimal zu nutzen. Damit können Bioelektrosynthesen einen wesentlichen Beitrag für die zukünftige Bioökonomie leisten.

Das vorliegende DECHEMA-Positionspapier skizziert den Stand der Technik und die Potenziale der Bioelektrosynthese. Es zeigt aber auch, auf welchen Gebieten noch Forschungsbedarf besteht: Das reicht von einem besseren Verständnis der Vorgänge beim Elektronentransfer über die Entwicklung geeigneter elektroenzymatischer oder mikrobieller Systeme bis zum Reaktordesign. Nur mit einer nachhaltigen öffentlichen Förderung, die sowohl wissenschaftliche Grundlagen als auch Kooperationen zwischen Industrie und Akademia einbezieht, wird es möglich sein, aus den vielversprechenden Forschungsergebnissen von heute eine Technologie von morgen zu entwickeln, die einen wesentlichen Beitrag zu Rohstoffsicherung, Nachhaltigkeit und Klimaschutz leisten kann.

Einleitung

Der Übergang von der bestehenden Ökonomie auf petrochemischer Basis zu einer Bioökonomie stellt einerseits eine große Herausforderung dar. Andererseits eröffnet er Möglichkeiten für neue Produkte, Technologien und damit auch Märkte, die bisher kaum zu erahnen sind. Das gilt insbesondere für ein rohstoffarmes Land wie Deutschland. Eine künftige Bioökonomie zur Produktion von Chemikalien und Treibstoffen muss dabei nicht nur auf der Nutzung nachwachsender Rohstoffe basieren, sondern auch regenerative elektrische Energiequellen einbinden. Die Verknüpfung von chemischen, elektrochemischen, photochemischen, enzymatischen und mikrobiellen Umwandlungsschritten für die Synthese von Chemikalien und Energieträgern ist so nur folgerichtig. Die chemische Industrie verbraucht ca. 10 % der elektrischen Energie in Deutschland und gehört damit zu den sehr energieintensiven Branchen. Die Elektrifizierung chemischer Prozesse kann zusätzlich zur Speicherung elektrischer Energie und einer Stabilisierung der Netze genutzt werden [1]. Die notwendige Verbindung zwischen Chemie- und Energiesektor lässt sich mit etablierten Technologien wie klassischen Elektrosynthesen jedoch nicht oder nur in sehr geringem Umfang erreichen. Daher werden aktuell im Rahmen einer Vielzahl von *Power-to-X*-Projekten, z.B. *Power-to-Chemicals*, neue Konzepte

für die Kopplung und Flexibilisierung der Energiewirtschaft und der Chemieindustrie entwickelt. Die Elektrobiotechnologie stellt eine Erweiterung der bisherigen Konzepte dar.

Die Elektrobiotechnologie basiert auf der Kombination von biotechnologischen und elektrochemischen Verfahrensschritten und kann die Vorteile beider Technologien nutzen: Die Biotechnologie ist in der Lage, komplexe Moleküle spezifisch und häufig in hoher Reinheit (hohe Stereo- und Regioselektivität) zu produzieren, während elektrochemische Verfahren häufig sehr hohe Energie- und Atomeffizienzen aufweisen. Die Elektrobiotechnologie deckt bereits heute ein breites Spektrum möglicher Anwendungen ab; dies beginnt bei Biobrennstoffzellen zur Reinigung von Abwasser und reicht über Biosensoren, die Entfernung von Schadstoffen aus Wasser oder Boden bis hin zur Synthese komplexer Chemikalien (Abbildung 1). Letztere wird als Bioelektrosynthese bezeichnet und bietet eine Technologieplattform, die es ermöglicht, einige der grundlegenden Herausforderungen einer zukünftigen Bioökonomie zu bewältigen. Die Bioelektrosynthese ist eine ideale Plattform, um verschiedene Sektoren (u.a. Energie, Umwelt, Nahrungsmittel, Konsumgüter) zu verknüpfen und Prozesse mit hoher Energie- und Rohstoffeffizienz sowie hoher

Flexibilität zur Pufferung von Stromspitzen zu etablieren. Ein weiteres Plus: CO₂ kann als Rohstoff in Bioelektrosynthesen eingesetzt werden. Damit wird einerseits die Rohstoffbasis erweitert und andererseits das CO₂-Aufkommen reduziert.

Während Forschungen an Biobrennstoffzellen und elektrochemischen Biosensoren teilweise schon sehr fortgeschritten sind, steckt die Entwicklung der Bioelektrosynthese vielfach noch in den Kinder-

schuhen. Dabei könnten Bioelektrosynthesen in vielfältigen Bereichen dazu beitragen, die Ziele der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ [2] zu erreichen. Daher ist eine deutliche Verstärkung der Forschung in diesem Bereich ausdrücklich zu befürworten. Gerade für einen technologiestarken, aber rohstoffarmen Standort wie Deutschland bietet die biobasierte Wirtschaft im Allgemeinen und so die Bioelektrosynthese durch die Verknüpfung mit der Nutzung (erneuerbarer)

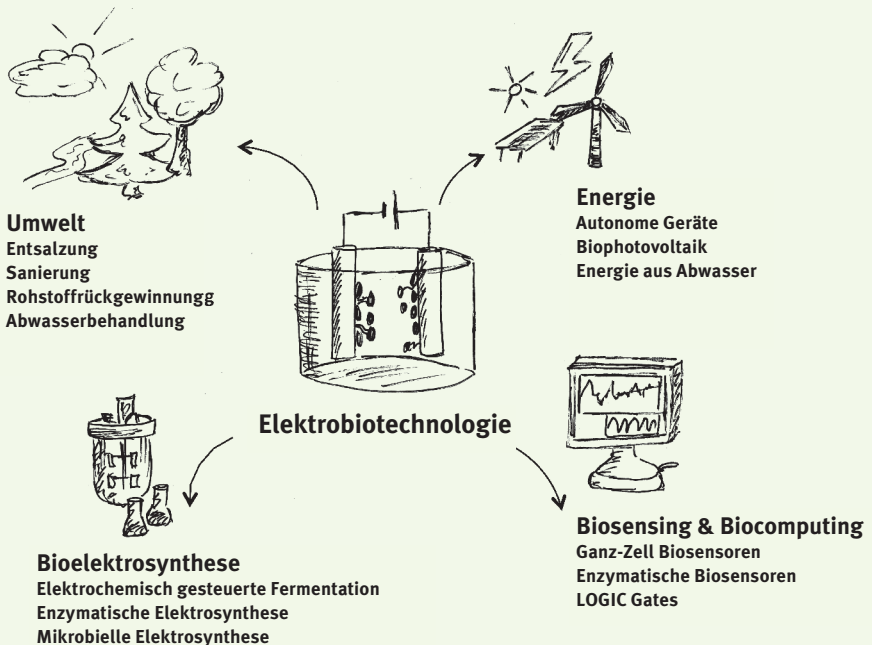


Abbildung 1: Anwendungsfelder der Elektrobiotechnologie (modifiziert nach [4])

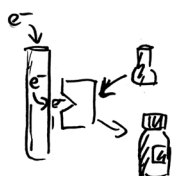
elektrischer Energie im Besonderen große Chancen, auch in Zukunft global wettbewerbsfähig zu bleiben; gleichzeitig lässt sich mit der Elektrobiotechnologie eine saubere, sichere und lebenswerte Umwelt für kommende Generationen gestalten. Im Fokus der Forschungen sollten dabei enzymatische und mikrobielle Elektrosynthesen, aber auch die technische Umsetzung der Verfahren stehen [3]. Ein Beispiel dafür stellen schon heute die mikrobiellen Brennstoffzellen dar, da in diesem Bereich

in den letzten Jahren sehr große Erfolge mit klarer Anwendungsperspektive erzielt wurden. Dieses in Deutschland verankerte Know-How kann für den Transfer elektrobiotechnologischer Verfahren zu anderen Anwendungsschwerpunkten hervorragend genutzt werden. Im folgenden Kapitel werden die entsprechenden Konzepte, Erfolge und Perspektiven vorgestellt.

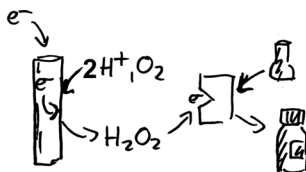
Konzepte, Erfolgsbeispiele und Handlungsfelder der Elektrobiotechnologie

Die Vielfalt an Reaktionen, die durch elektrobiotechnologische Verfahren ermöglicht werden können, und die Verknüpfung von elektrischer Energie mit biologischen Stoffumwandlungen haben Wissenschaftler seit je fasziniert. So erwachte schon früh das Interesse an der Bioelektrochemie. Häufig wurden die zugrundeliegenden Prozesse zunächst nur beschrieben. Erst als sich politische und gesellschaftliche Bedingungen veränderten, neue Methoden und Erkenntnisse

entwickelt wurden und sich eine interdisziplinäre Herangehensweise durchsetzte, wurden sie anwendungsorientiert – im Sinne der heutigen Elektrobiotechnologie – weiterentwickelt. So beschrieb beispielsweise bereits 1911 M.C. Potter die erste mikrobielle Brennstoffzelle [5]. Diese Entdeckung galt jedoch lange Zeit nur als Kuriosität ohne tiefere wissenschaftliche oder gar technische Relevanz [6]. Zwar gab es zwischen 1950 und 1960 große Entwicklungsprogramme im Rah-



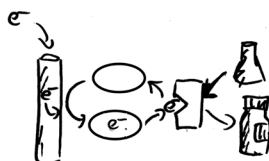
Direkter Elektronentransfer



Elektronengeneration von H_2O_2



Regenerierung von Kofaktoren



Substitution von Kofaktoren

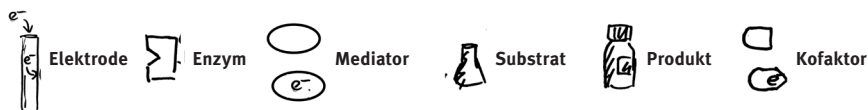


Abbildung 2: Beispielhafte Verbindung von Enzymkatalyse und kathodischen elektrochemischen Reaktionen zu neuartigen enzymatischen Elektrosynthesen

men der Weltraumforschung, u.a. der NASA, aber erst Entdeckungen um die Jahrtausendwende haben dazu geführt, dass für Biobrennstoffzellen heute weitreichende Nutzungskonzepte vorliegen. Die Bioelektrosynthese ist im Vergleich zu Biobrennstoffzellen nicht minder vielversprechend, steht jedoch in einem noch früheren Stadium ihrer Entwicklung. Viele der grundlegenden Entwicklungsarbeiten der Bioelektrochemie können dabei anwendungsübergreifend genutzt werden. So hat die Forschung auf dem Gebiet der elektrochemisch-enzymatischen Biosensoren wesentliche Impulse für die Entwicklung der enzymatischen Elektrosynthesen gegeben. Ebenso lassen sich viele der grundlegenden Mechanismen und Erkenntnisse im Bereich der mikrobiellen Brennstoffzelle auf entsprechende mikrobielle Elektrosynthesen übertragen.

Enzymatische Elektrosynthesen

Zu Beginn der 1980er Jahre wurde erstmalig die elektrochemische Regeneration von Kofaktoren zur Herstellung von Feinchemikalien eingesetzt [7, 8]. In der Enzymkatalyse werden elektrochemische Verfahren seither zur Erzeugung von Kosubstraten, z.B. H_2O_2 , sowie zur Regeneration oder Substitution von Kofaktoren genutzt (Abbildung 2). In enzymatischen Synthesen

Elektrobiotechnologie fasst alle Konzepte, Vorgänge und potenziellen Verfahren zusammen, bei welchen mikrobielle und elektrochemische Stoffumwandlungen kombiniert werden. Anwendungsfelder erstrecken sich von der Reinigung von Abwasser über die Bodensanierung und Meerwasserentsalzung bis zur Synthese von Chemikalien und Energieträgern.

Bioelektrochemie widmet sich der Untersuchung, Beschreibung und Anwendung von Ladungsprozessen an und in biologischen Systemen, welche Enzyme, Organellen oder ganze Zellen umfassen.

Bioelektrosynthese ist als die gezielte Wertschöpfung durch eine Kombination von biologischen und elektrochemischen Reaktionen zur Umwandlung von Edukten in ein oder mehrere Produkte definiert.

Enzymatische Elektrosynthese ist Bioelektrosynthese unter Verwendung von Enzymen.

Mikrobielle Elektrosynthese nutzt Mikroorganismen für die Bioelektrosynthese.

Reaktoren für die Bioelektrosynthese werden auch als bioelektrochemische Systeme oder bioelektrochemische Zellen bezeichnet. Dabei findet an der Kathode stets die Reduktionsreaktion und an der Anode die Oxidationsreaktion statt.

ist die Regeneration von Kofaktoren oft ein wesentlicher Flaschenhals für die Prozessentwicklung und -ökonomie. Einen möglichen Ausweg bieten Wasserstoffperoxid-abhängige Enzymprozesse, bei denen in den letzten Jahren sehr große Fortschritte erzielt wurden [9]. Sie benötigen einerseits Wasserstoffperoxid für die gewünschte Synthese, werden aber andererseits von erhöhten Konzentrationen dieses Kosubstrates inaktiviert. Indem Wasserstoffperoxid bedarfsgerecht elektrochemisch erzeugt wird, konnten für verschiedene Peroxygenasen und Peroxidasen jeweils Höchstwerte in Bezug auf die Stabilitäten der Enzyme in Kombination mit sehr hohen Produktivitäten berichtet werden [10, 11]. Neue Arbeiten zeigen, dass auch elektroenzymatische Kaskadenreaktionen möglich sind. In diesen Kaskadenreaktionen können beispielsweise jeweils an der Anode und der Kathode gekoppelte wertschöpfende Reaktionen oder in einer Reaktionssequenz an der Kathode die elektroenzymatische Reduktion von CO_2 zu Methanol realisiert werden [12, 13].

Im Bereich der **enzymatischen Elektrosynthesen** besteht u.a. auf den folgenden Gebieten Forschungsbedarf:

Aufklärung und Optimierung des direkten Elektronentransfers zwischen Elektroden und Enzymen – Zwar konnte für ver-

schiedene Enzyme ein direkter Übergang von Elektronen gezeigt werden, die aber zugrunde liegenden Mechanismen sind noch nicht aufgeklärt und können folglich nicht gezielt optimiert werden. Der Verzicht auf Mediatoren stellt dabei einen wesentlichen technischen Vorteil dar, da hier keine Chemikalien zugesetzt und zu Prozessende entfernt werden müssen.

Re-Design der Enzyme für elektroenzymatische Anwendungen – Enzyme sind an „natürliche“ Reaktionsbedingungen adaptiert. Durch eine zielgerichtete Optimierung biotechnologisch relevanter Enzyme an „artifizielle“ elektrochemische Bedingungen können Stabilitäten und Umsatzraten verbessert werden.

Neue Mediatoren für sauerstoffabhängige Enzyme – Die Gruppe der industriell relevanten Monoxygenasen lässt sich bisher nicht mit akzeptablen Umsatzraten in elektroenzymatischen Reaktionen einsetzen. Ursache ist ein Mangel an Mediatoren, die eine höhere Affinität zum Enzym als zu Sauerstoff haben. Die Synthese und Charakterisierung neuer Mediatoren sollte deshalb auf der Forschungsagenda stehen. Weiterhin sollen auch Mediatoren für weitere enzymatische Elektrosynthesen identifiziert werden, die nicht mit den weiteren Reaktionskomponenten (Substrate, Enzyme) interagieren.

Mikrobielle Elektrosynthesen

Im Bereich der mikrobiellen Elektrosynthesen ging es zunächst darum, die Ausbeuten zu erhöhen, indem der Kohlenstoff des Substrates in klassischen Fermentationen optimal genutzt wird. Hongo und Iwahara [14] berichteten 1979, dass sich die L-Glutaminsäure-Produktion aus Glukose in Fermentation von *Brevibacterium flavum* durch Anlegen eines elektrischen Stroms um 10 % erhöhen ließ. Diese Arbeiten bildeten die Grundlage für die Erforschung der mikrobiellen Elektrosynthese (MES). Während in einer Biobrennstoffzelle chemisch gespeicherte Energie in elektrische Nutzenergie umgewandelt wird, wird bei der MES elektrische Energie mit Hilfe der Stoffwechselleistung der elektroaktiven Organismen zur Herstellung von Chemika-

lien genutzt. Im Jahr 2010 veröffentlichten zwei Gruppen wegweisende Arbeiten zur Umwandlung von CO₂ und elektrischer Energie in Methan und Acetat [15, 16]. Die zu Grunde liegenden Elektronentransfermechanismen werden derzeit noch heftig debattiert. Einerseits nimmt man an, dass die elektroaktiven Mikroorganismen leitfähige Pilli und/oder Cytochrom-haltige Proteinstrukturen der Zellmembran nutzen, um Elektronen von einer Elektrode in den Metabolismus zu schleusen (Abbildung 3). Andererseits werden auch Mechanismen auf Basis von Wasserstoff als Elektronenüberträger diskutiert [17]. Ohne dass diese detaillierten Mechanismen des extrazellulären Elektronentransfers aufgeklärt werden, ist eine weitere Optimierung nicht möglich; es ist aber festzuhalten, dass die Elektroneneffizienz dieser MES

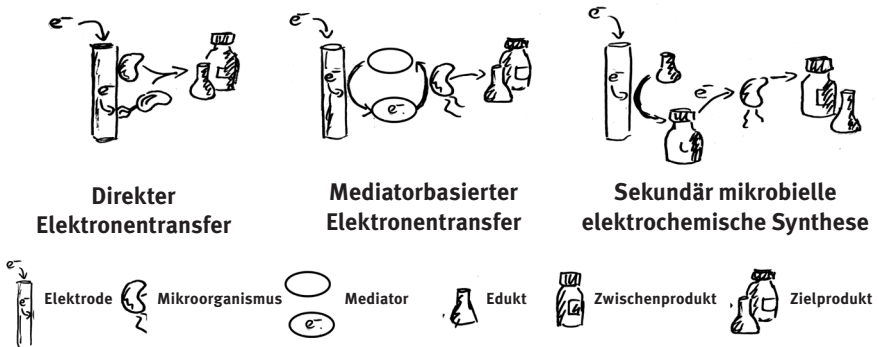


Abbildung 3: Extrazellulärer Elektronentransfer in mikrobiellen Elektrosynthesen

bereits jetzt bis zu 90% erreicht. Gerade in Kombination mit der Verwendung von CO₂ als Substrat erfüllt diese Technologie die Anforderungen einer zukünftigen Bioökonomie in idealer Weise.

Näher an der Anwendung sind dagegen sekundäre MES. Bei ihnen findet kein unmittelbarer Transfer von Elektronen zwischen Elektroden und Mikroorganismen statt. Stattdessen werden elektrochemische und mikrobielle Stoffumwandlungen so miteinander kombiniert, dass dies zu neuen Produkten, besseren Produktionswegen und höheren Ausbeuten führt. Dies schließt sowohl Verfahren ein, die elektrochemische Reaktionen zur „Veredelung“ von mikrobiellen Produkten nutzen, als auch Verfahren, bei denen durch elektrochemische Reaktionen mikrobielle Substrate zur Verfügung gestellt werden. Zum ersten Typ zählen beispielsweise die Herstellung von *trans*-3-Hexendisäure, einem wichtigen Monomer für die Produktion von Nylon-6,6, aus Glukose mittels Hefe und anschließender elektrochemischer Hydrierung [18], oder die Gewinnung von Alkanen aus komplexer Biomasse [19]. Für die zweite Art der Verknüpfung zeigte ein Industrie-Konsortium (Rheticus-Projekt) kürzlich beispielhaft, wie CO₂ elektrochemisch zu Gemischen von CO/ H₂ reduziert werden kann, um anschließend durch Clostridien zu C₄-Alkoholen fermentiert zu

werden – und das mit nahezu 100% Elektroneneffizienz und zu marktnahen Preisen [20]. Auch Arbeiten zur CO₂-Reduktion zu Formiat unter Bedingungen, welche eine integrierte Biosynthese erlauben [21] lassen sich hier einordnen, ebenso wie die mikrobielle CO₂-Reduktion durch elektrochemisch *in situ* erzeugten Wasserstoff für die Terpen-Synthese [22]. Ein weiteres Verfahrenskonzept ist die Elektrofermentation. Dabei werden durch Anlegen eines Potentials in klassischen Fermentationen die Kohlenstoffausbeuten erheblich gesteigert, da der Kohlenstoff verstärkt zur Synthese der Stoffwechselprodukte genutzt werden kann, während der elektrische Strom in den Energiestoffwechsel fließt. Dies wurde beispielsweise in der Produktion von Butanol mit Clostridien gezeigt [23].

Im Bereich der **mikrobiellen Elektrosynthesen** besteht u.a. auf den folgenden Gebieten Forschungsbedarf

Verständnis und molekularbiologisches Design – Sowohl durch Anpassung der Stoffwechselwege/ Physiologie von elektroaktiven Mikroorganismen als auch durch die Implementierung von extrazellulären Elektronentransferwegen in biotechnologischen „Chassis“ wie *E. coli* können neuartige Produktionswege etabliert werden. Die Elektronentransfermechanismen

können dabei sowohl den direkten als auch den indirekten Elektronentransfer umfassen.

Rationales Design von Materialien und Komponenten – Membranen, Elektroden sowie weitere Komponenten müssen für ihren Einsatz in der mikrobiellen Elektrobiotechnologie angepasst werden. Dies kann neuartige bzw. adaptierte Materialien, angepasste Geometrien, aber auch Betriebsweisen umfassen.

Optimierung der Elektrofermentationen – Hier sind die Prinzipien der Elektronenaufnahme ebenso noch nicht verstanden. Gelingt es durch biochemische und molekularbiologische Arbeiten, ein besseres Verständnis für die Elektronentransfermechanismen zu entwickeln, ist in etablierten Fermentationen eine erhebliche Steigerung der Kohlenstoffausbeute zu erwarten.

Entwicklung und Validierung sekundärer MES – Durch Verknüpfung mikrobieller Synthesen und elektroorganischer Reaktionen können potenziell vollkommen neue Verfahren etabliert werden. Diese müssen zunächst identifiziert und die biologischen und elektrochemischen Reaktionen dahingehend gestaltet werden, das kombinierte Verfahren (und nicht die jeweilige Einzelreaktion) zu optimieren.

Monitoring und Steuerung – Wie alle Power-to-X-Konzepte müssen sich auch mikrobielle elektrobiotechnologische Verfahren auf schwankende Lasten (u.a. aufgrund der Verfügbarkeit und des Preises elektrischer Energie) dynamisch adaptieren lassen. Dafür müssen die notwendigen Monitoringtechnologien und Steuerkonzepte von der (zeitaufgelösten mikrobiellen) Analyse bis zur Steuerung entwickelt werden.

Reaktorentwicklung – Viele der Verfahren sind zwar im Labormaßstab einsetzbar und für technische Anwendungen gibt es bereits erste Ansätze für die ingenieurtechnische Auslegung von skalierbaren Reaktoren (*scaling up* und *numbering-up*), diese sind jedoch verstärkt wissenschaftlich zu untersuchen. Außerdem muss an beispielhaften Verfahren der Transfer in die Praxis demonstriert werden.

Aktuelle Herausforderungen und übergreifende Handlungsfelder

Eine besondere Stärke der Forschungslandschaft in Deutschland ist eine breite naturwissenschaftliche und ingenieurwissenschaftliche Forschungsgemeinschaft. Bioelektrosynthesen sind ohne Zusammenführung dieser Disziplinen nicht realisierbar. Nur wenn es gelingt, parallel die biologischen, elektrochemischen und verfahrenstechnischen Aspekte der Bioelektrosynthesen zu optimieren, können diese Verfahren einen Baustein für die Bioökonomie darstellen. Viele der Forschungsimpulse gingen ursprünglich von den USA aus; in der Zwischenzeit hat sich in Deutschland aber eine starke Forschungscommunity herausgebildet, die diesen Vorsprung aufgeholt hat und in einzelnen Teilgebieten weltweit mit führend ist. Dazu haben schon bisher einzelne Fördermaßnahmen wie insbesondere die BMBF-Initiative „Nächste Generation biotechnologischer Verfahren – Biotechnologie 2020“, die DBU-Initiative „Mikrobielle Bioelektrotechnologie: Eine Plattforminitiative für Deutschland“ und der DECHMA-Arbeitskreis „Elektrobiotechnologie“ beigetragen. Damit sind die Grundlagen gelegt, die Bioelektrosynthesen durch eine substanzielle und nachhaltige Förderung weiter zu stärken und bis in die Anwendung zu bringen. Aktuell besteht die besondere Herausforderung in der Überführung der positiven Laborergebnisse in der Praxis. Eine Bewertung

der technischen Reife der verschiedenen Verfahren [24] zeigt, dass viele potenzielle Verfahren sehr niedrige Technologie-Reifegrade (Technology Readiness Level (TRL) im Bereich von maximal 3-4 erreichen. Generell gilt TRL 6 als „Startschuss“ für den Übergang von der Forschung in die Praxis. Diese Diskrepanz zwischen einer vielversprechenden Zukunft und dem derzeitigen Stand der Technik birgt ein erhebliches Risiko: Es besteht die Gefahr, dass die Bioelektrosynthese, wie andere Technologien in der Vergangenheit, in einem „Valley of death“ endet. „Valley of death“ bedeutet, dass exzellente Forschungs- und Entwicklungsergebnisse mit wahrscheinlich hohen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen nicht in einsatzbereite Technologien und innovative kommerzielle Produkte umgesetzt werden. Dieses „Valley of death“ kann nur durch gemeinsame Anstrengungen von akademischen und industriellen Forschern verschiedener Disziplinen überbrückt werden, unterstützt durch öffentliche Mittel und Risikokapital. Die nachhaltige Förderung muss sowohl eine rein akademische Forschung als auch Kooperationen akademischer und industrieller Partner umfassen. So lässt sich sicherstellen, dass die wissenschaftlichen Grundlagen für gezielte Optimierungen und Transformation geschaffen und gleichzeitig anwendungsnahe Themen in-

dustrienah untersucht werden. Damit die nächste Generation von Produktionsverfahren auf Basis der Bioelektrosynthesen die Praxistauglichkeit beweisen können, bedarf es zudem – öffentlich geförderter – Pilot- und Demonstrationsanlagen. Das entspricht den Forderungen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ [2] und würde den Forschungs- und Industriestandort Deutschland nachhaltig stärken. Wichtig ist auch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von z. B. Elektrochemie, Bioverfahrenstechnik, Molekularbiologie, Materialwissenschaften, Ökologie und Ökonomie. Nur so können die Herausforderungen effektiv überwunden werden. Die zukünftigen Förderprogramme sollten neben der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Forschung um begleitende Maßnahmen erweitert werden, dieses umfasst zum Beispiel:

- » Lebenszyklusanalysen;
- » Konzepte zur Nachhaltigkeits-Orientierung (Umwelt-, Klima-, Naturschutz, soziale Standards);
- » Fachübergreifende Ausbildung der Studierenden und Promovierenden.

Elektrobioraffinerien – ein Zukunftsszenario

Mit diesen Maßnahmen kann es gelingen, Deutschland als Technologieführer an der Schnittstelle von Elektrochemie, Biologie etc. zu positionieren. Das wäre die Voraussetzung für einen weiteren Schritt: Bioelektrosynthesen als Power-to-X-Verfahren können durch die Verknüpfung mit mechanischen, chemischen, thermischen und biologischen Verfahrensschritten zu einer neuen Art von Bioraffinerien führen – den Elektrobioraffinerien [25]. Elektrobio-

raffinerien ermöglichen eine gekoppelte Produktion, Speicherung und Nutzung von Elektrizität sowie biobasierten Chemikalien. Die Verbindung von mikrobiellen und elektrochemischen Stoffumwandlungen eröffnet Synergien, die sich auf die gesamte Prozesskette auswirken können, beispielsweise durch eine Erweiterung des Produktportfolios, Steigerung der Produktivität oder die Erschließung neuer Ausgangsstoffe (s. Abb. 4).

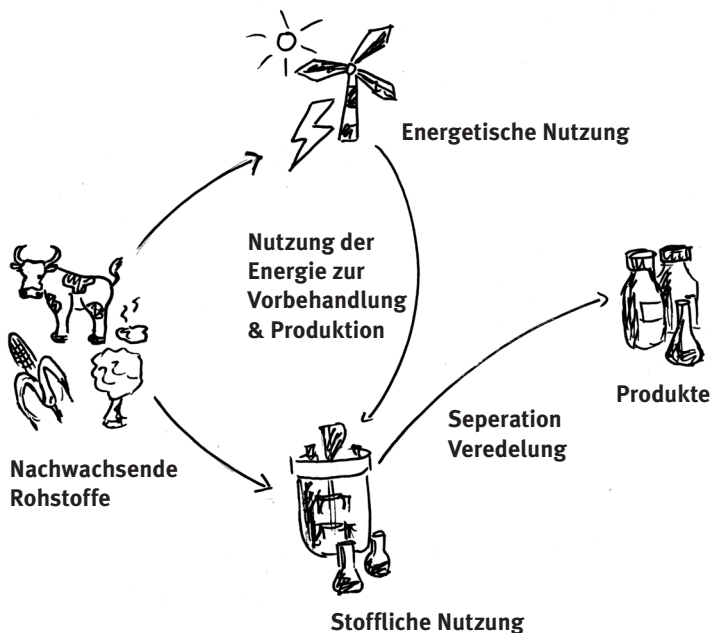


Abbildung 4: Vereinfachte Prinzipskizze des Konzepts der Elektrobioraffinerie: Synergien können durch Verknüpfung von mikrobieller und elektrochemischer Stoffumwandlung in verschiedenen Stufen erzeugt werden (Details in [25]).

Literatur

- [1] DECHEMA, Diskussionspapier Elektrifizierung chemischer Prozesse. 2015.
- [2] BMBF, Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 - Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft. 2010.
- [3] Harnisch, F., Holtmann, D. (Eds.), *Bioelectrosynthesis*, Springer Nature 2019.
- [4] Harnisch, F., Holtmann, D., Electrification of Biotechnology: Status quo, in: Harnisch F., H. D. (Ed.), *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, Springer Berlin, Heidelberg 2017.
- [5] Potter, M. C., Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character* 1911, 84, 260-276.
- [6] Schröder, U., Discover the possibilities: microbial bioelectrochemical systems and the revival of a 100-year-old discovery. *Journal of Solid State Electrochemistry* 2011, 15, 1481-1486.
- [7] Wienkamp, R., Steckhan, E., Indirect Electrochemical Regeneration of NADH by a Bipyridinerhodium (I) Complex as Electron-Transfer Agent. *Angewandte Chemie International Edition* 1982, 21, 782-783.
- [8] Simon, H., Günther, H., Bader, J., Tischer, W., Elektro-enzymatische und elektro-mikrobielle stereospezifische Reduktionen. *Angewandte Chemie* 1981, 93, 897-898.
- [9] Burek, B. O., Bormann, S., Hollmann, F., Bloh, J. Z., Holtmann, D., Hydrogen peroxide driven biocatalysis. *Green Chemistry* 2019, 21, 3232-3249.
- [10] Horst, A. E. W., Bormann, S., Meyer, J., Steinhagen, M., et al., Electro-enzymatic hydroxylation of ethylbenzene by the evolved unspecific peroxygenase of *Agroclybe aegerita*. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 2016, 133, S137-S142.
- [11] Holtmann, D., Krieg, T., Getrey, L., Schrader, J., Electroenzymatic process to overcome enzyme instabilities. *Catalysis Communications* 2014, 51, 82-85.
- [12] Varničić, M., Vidaković-Koch, T., Sundmacher, K., Gluconic Acid Synthesis in an Electroenzymatic Reactor. *Electrochimica Acta* 2015, 174, 480-487.
- [13] K. Addo, P., L. Arechederra, R., Waheed, A., Shoemaker, J., et al., *Methanol Production via Bioelectrocatalytic Reduction of Carbon Dioxide: Role of Carbonic Anhydrase in Improving Electrode Performance*, 2011.
- [14] Hongo, M., Iwahara, M., Application of Electro-energizing Method to L-Glutamic Acid Fermentation. *Agricultural and Biological Chemistry* 1979, 43, 2075-2081.
- [15] Villano, M., Aulenta, F., Ciucci, C., Ferri, T., et al., Bioelectrochemical reduction of CO₂ to CH₄ via direct and indirect extracellular electron transfer by a hydrogenophilic methanogenic culture. *Bioresour Technol* 2010, 101, 3085-3090.
- [16] Nevin, K. P., Woodard, T. L., Franks, A. E., Summers, Z. M., Lovley, D. R., Microbial electrosynthesis: feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds. *MBio* 2010, 1, e00103-00110.
- [17] Deutzmann, J. S., Sahin, M., Spormann, A. M., Extracellular enzymes facilitate electron uptake in biocorrosion and bioelectrosynthesis. *MBio* 2015, 6, e00496-00415.

- [18] Suastegui, M., Matthiesen, J. E., Carraher, J. M., Hernandez, N., *et al.*, Combining Metabolic Engineering and Electrocatalysis: Application to the Production of Polyamides from Sugar. *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 2016, 55, 2368-2373.
- [19] Urban, C., Xu, J., Sträuber, H., dos Santos Dantas, T. R., *et al.*, Production of drop-in fuels from biomass at high selectivity by combined microbial and electrochemical conversion. *Energy & Environmental Science* 2017, 10, 2231-2244.
- [20] Haas, T., Krause, R., Weber, R., Demler, M., Schmid, G., Technical photosynthesis involving CO₂ electrolysis and fermentation. *Nature Catalysis* 2018, 1, 32-39.
- [21] Li, H., Opgenorth, P. H., Wernick, D. G., Rogers, S., *et al.*, Integrated Electromicrobial Conversion of CO₂ to Higher Alcohols. *Science* 2012, 335, 1596-1596.
- [22] Krieg, T., Sydow, A., Faust, S., Huth, I., Holtmann, D., CO₂ to Terpenes: Autotrophic and Electroautotrophic α -Humulene Production with *Cupriavidus necator*. *Angewandte Chemie International Edition* 2018, 57, 1879-1882.
- [23] Engel, M., Holtmann, D., Ulber, R., Tippkötter, N., Increased Biobutanol Production by Mediator-Less Electro-Fermentation. *Biotechnology Journal* 2018, 0, 1800514.
- [24] Holtmann, D., Harnisch, F., Electrification of Biotechnology: Quo Vadis?, in: Holtmann, D., F., H. (Eds.), *Bioelectrosynthesis*, Springer, Berlin, Heidelberg 2018.
- [25] Harnisch, F., Urban, C., Electrobiorefineries: Unlocking the Synergy of Electrochemical and Microbial Conversions. *Angewandte Chemie International Edition* 2018, 57, 10016-10023.

Herausgeber

DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Tel: +49 69 7564-0

Fax: +49 69 7564-201

E-Mail: info@dechema.de

Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.

Dr. Kathrin Rübberdt

Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Gestaltung/Satz

PM-GrafikDesign

Peter Mück, Wächtersbach

Erschienen im September 2019

Bildnachweise

Alle Abbildungen: Franziska Enzmann

DECHEMA
Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

www.dechema.de