

**Abschlussbericht** bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)  
zum Projekt

## **Aufbau und Charakterisierung einer Mikrobiellen Brennstoffzelle (MBZ) im Technikumsmaßstab**

### Antragsteller:

**TU Braunschweig, Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie (IÖNC), Hagenring 30, 38106  
Braunschweig**

**Harnisch, Falk, Dr. rer. nat.** (Projektleitung\*<sup>1</sup> 01.05.2012-31.10.2012)

Aktuelle Adresse: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH-UFZ, Permoserstrasse 15, 04318  
Leipzig, Tel: +341 235 1337, e-mail: [falk.harnisch@ufz.de](mailto:falk.harnisch@ufz.de)

**Schröder, Uwe, Prof. Dr. rer. nat. habil.** (Projektleitung\*<sup>1</sup> 1.11.2012-31.12.2013)

Tel: +531 391 8425; Fax: +531 391 8424; e-mail: [uwe.schroeder@tu-braunschweig.de](mailto:uwe.schroeder@tu-braunschweig.de)

<sup>1</sup>Übergabe der Projektleitung aufgrund des Wechsels von F. Harnisch zum 31. 10. 2012 von der TU Braunschweig an das UFZ, dieser war jedoch bis Projektende permanent involviert.

**TU Braunschweig, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW), Pockelsstrasse 2a, 38106 Braun-  
schweig**

**Dockhorn, Thomas, apl. Prof. Dr.-Ing. habil.**

Tel: +531 391 7937; Fax: +531 391 7947; e-mail: [t.dockhorn@tu-braunschweig.de](mailto:t.dockhorn@tu-braunschweig.de)

**Dichtl, Norbert, Prof. Dr.-Ing.**

Tel: +531 391 7935; Fax: +531 391 7947; e-mail: [n.dichtl@tu-braunschweig.de](mailto:n.dichtl@tu-braunschweig.de)

**Projektlaufzeit:** 01.05.2012 – 31.12.2013 (Laufzeit: 19 Monate)

**Aktenzeichen:** 30194-31

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>30194-31</b>	Referat	<b>Umweltchemie</b>	Fördersumme	<b>116.907,00€</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Aufbau und Charakterisierung einer Mikrobiellen Brennstoffzelle (MBZ) im Technikumsmaßstab</b>				
<b>Stichworte</b>	Energie, Wasser, chemisches Verfahren, Green Chemistry				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>20 Monate</b>	<b>01.05.2012</b>	<b>31.12.2013</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	16.04.2013				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Technische Universität Braunschweig Institut für Ökologische & Nachhaltige Chemie, Prof. Dr. Uwe Schröder Hagenring 30  38106 Braunschweig			Tel	0531 391 8428
				Fax	0531 391 8425
				Projektleitung Dr. Falk Harnisch/ Prof. Dr. Uwe Schröder	
				Bearbeiter Sebastian Wirth/ Robert Keith Brown, u.a.	
<b>Kooperationspartner</b>	Technische Universität Braunschweig Institut für Siedlungswasserwirtschaft Prof. Dr.-Ing. Thomas Dockhorn Pockelsstrasse 2a 38106 Braunschweig				

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Mikrobielle Brennstoffzellen sind eine vielversprechende Technologie zur Erzeugung elektrischen Stroms aus Abwasser, bei gleichzeitiger Abwasserreinigung. Somit kann diese Technologie potentiell Nutzenergie (elektrischen Strom) erzeugen und gleichzeitig signifikant Energie (zur Abwasserreinigung) einsparen. Allerdings existieren mikrobielle Brennstoffzellen derzeit fast ausschließlich im Labormaßstab, d.h. <1L Anodenkammervolumen.

Ziel des beantragten Projektes ist daher der Aufbau und die Charakterisierung einer mikrobiellen Brennstoffzelle im Technikumsmaßstab. Darauf aufbauend sollen Erkenntnisse und Strategien für eine signifikante Weiterentwicklung dieser bioelektrochemischen Systeme erarbeitet werden.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Ziel des Projekts ist der Aufbau und die Charakterisierung eines verbesserten Prototyps Mikrobieller Brennstoffzellen zu Forschungs- und Entwicklungszwecken. Basierend auf Erfahrungen der Vorarbeiten beinhaltet dies:

- Konstruktion und Aufbau eines verbesserten modularen Forschungsreaktors Prototyp II im Technikumsmaßstab, welcher die Evaluation verschiedener grundlegender Komponenten und Operationsparameter erlaubt.
- Betrieb und Charakterisierung des Prototyp II unter variierenden Betriebsbedingungen, wobei ein Übergang von Laborbedingungen hin zu realen Bedingungen auf Kläranlagen erfolgen soll.

Die so gewonnenen Erkenntnisse sollen die Identifikation limitierender Parameter erlauben. Basierend darauf sollen Lösungsvorschläge zur Behebung dieser Limitationen sowie Konzepte für Nachfolgestudien erarbeitet werden. Weiterhin ist die aktive Akquise geeigneter KMU-Partner im Rahmen dieser Vorstudie, u.a. mit einem geplanten Workshop (s.u.), für diese Folgeprojekte geplant. Einhergehend mit den Arbeiten im Projekt sollen sich zwei Masterarbeiten projektbegleitenden Forschungsthemen widmen.

Die durchgeführten Arbeiten lassen sich in folgende Arbeitspakete unterteilen:

- Charakterisierung des bestehenden „Prototyp I“ und Optimierung der Elektrodenmaterialien“ und Operationsbedingungen
- Konstruktion und Bau von Folgereaktor „Prototyp II“
- Betrieb und Charakterisierung von „Prototyp II“
- Planung und Veranstaltung eines Workshops
- Projektbegleitende Forschung im Rahmen von Masterarbeiten

## **Ergebnisse und Diskussion**

Im Rahmen des Projektes wurde der Aufbau und die Charakterisierung einer mikrobiellen Brennstoffzelle im Technikumsmaßstab („Prototyp“) mit einem Volumen von 100 L durchgeführt, wobei die Versuchsreihen zunächst im Closed-loop Batchmodus und anschließend im Durchlaufbetrieb durchgeführt wurden. Hierbei wurde sowohl künstliches als auch reales Abwasser einer kommunalen Kläranlage getestet. Die Leistungsfähigkeit des Prototyps konnte im Verlauf der Untersuchungen insgesamt deutlich gesteigert werden, was sich u.a. in einer Reduzierung der erforderlichen hydraulischen Aufenthaltszeit des realen Abwassers von anfangs bis zu 24 Tagen auf minimal nur noch 1,2 Tage ausdrückte. Der im Mittel erreichte CSB-Abbau betrug hierbei bis zu 67% für reales Abwasser bzw. bis zu 90% bei Verwendung von Acetat als Substrat.

Als weiterer abwassertechnisch höchst relevanter Effekt fand in dem untersuchten System eine Abreicherung von Ammonium-Stickstoff aus dem Abwasser durch Migration durch die Anoden- und Kathodenkammer trennende Membran und die Aufkonzentrierung in der Kathodenkammer statt. Hierbei konnten bis zu 40% des NH<sub>4</sub>-N aus dem Abwasser in die Kathodenkammer überführt werden, wo sie grundsätzlich für eine weitere Stickstoffrückgewinnung genutzt werden können.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse wurden bzw. sollen wie folgt veröffentlicht werden:

### 1. Fachpublikationen

„A systematic approach to evaluating the effects of scaling up on the performance of bioelectrochemical systems using a technical scale microbial electrolysis cell“

Robert Keith Brown, Falk Harnisch, Sebastian Wirth, Helge Wahlandt, Thomas Dockhorn, Norbert Dichtl, Uwe Schröder; eingereicht bei Bioresource Technology

„Entwicklung und Optimierung einer mikrobiellen Brennstoffzelle im Technikumsmaßstab für die Reinigung von kommunalem Abwasser“

Robert Keith Brown, Falk Harnisch, Sebastian Wirth, Helge Wahlandt, Thomas Dockhorn, Norbert Dichtl, Uwe Schröder; in Planung für Korrespondenz Abwasser

### 2. Vorträge

„On the Scaling Up of and Performance Assessment of Bioelectrochemical Systems based on a Technical Scale Microbial Electrolysis Cell“ Brown et al., eingereicht zur Electrochemistry 2014 in Mainz

### 3. Abschlussarbeiten

Robert Keith Brown, M.Sc. (Water Science) „Microbial Fuel Cells: Development to Prototype status“, Universität Duisburg-Essen, 2012

Andre Baudler, M.Sc. (Chemie) „Elektrochemisch aktive Biofilme auf Basis mikrobieller Konsortien: Grundlagenuntersuchung zur Verwendung von Mono - und Mischsubstraten“, TU Braunschweig, 2012

### 4. Messeteilnahmen & Öffentlichkeitsarbeit

Das Institut für Siedlungswasserwirtschaft hatte bereits auf der IFAT München im Jahre 2012 den im Rahmen der Untersuchungen verwendeten BES-Prototypen auf dem institutseigenen Stand dem interessierten Fachpublikum vorgestellt. Auch auf der diesjährigen IFAT vom 5.-9. Mai 2014 in München wird der Prototyp zusammen mit den aktuellen Forschungsergebnissen auf dem institutseigenen Stand des ISWW wieder als Exponat aufgestellt werden.

## **Fazit**

Die im Projekt beantragten Arbeiten wurden erfolgreich durchgeführt und es konnten in erheblichem Umfang neue Erkenntnisse gewonnen werden. Weiterhin wurden über die geplanten Arbeitsschritte hinaus wissenschaftlich interessante und potentiell technisch relevante Erkenntnisse gewonnen. Auch wenn die maximal erzielte Coulomb Effizienz bei der Behandlung von kommunalem Abwasser von im Mittel 23% ein deutlicher Hinweis auf noch parallel ablaufende sekundäre Stoffwechselprozesse ist, die letztlich zu Lasten der erreichbaren Energieausbeute gehen, stellt die BES-Technologie (selbst wenn sie nur zur Elimination von CSB und Stickstoff eingesetzt würde, ohne signifikante Strommengen zu produzieren) somit eine vielversprechende Verfahrensoption zur energieeffizienten Abwasserreinigung dar.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Problemstellung und Stand von Wissenschaft und Technik .....	8
2.	Ergebnisse .....	10
2.1.	Erreichte Projektziele & Abweichungen vom Arbeitsplan .....	10
2.2.	Hauptergebnisse: Eine systematische Untersuchung zum Einfluss verschiedener Parameter auf die Leistungsfähigkeit mikrobieller elektrochemischer Systeme bei deren Skalierung in den Technikumsmaßstab .....	11
2.3.	Begleitforschung: Elektrochemisch aktive Biofilme auf Basis mikrobieller Konsortien: Grundlagenuntersuchung zur Verwendung von Mono - und Mischsubstraten .....	12
3.	Ausblick & Weiterführung.....	13
3.2.	Integration von BES in die Abwasserbehandlungsinfrastruktur .....	13
3.3.	Geplante Folgeaktivitäten.....	15
4.	Referenzen .....	17

## **Zusammenfassung**

Mikrobielle Brennstoffzellen sind eine vielversprechende Technologie zur Erzeugung elektrischen Stroms aus Abwasser, bei gleichzeitiger Abwasserreinigung. Somit kann diese Technologie potentiell Nutzenergie (elektrischen Strom) erzeugen und gleichzeitig signifikant Energie (zur Abwasserreinigung) einsparen. Allerdings existieren mikrobielle Brennstoffzellen derzeit fast ausschließlich im Labormaßstab, d.h. <1L Anodenkammervolumen.

Im Rahmen des Projektes wurde deshalb der Aufbau und die Charakterisierung einer mikrobiellen Brennstoffzelle im Technikumsmaßstab („Prototyp“) mit einem Volumen von 100 L durchgeführt, wobei die Versuchsreihen zunächst im Closed-loop Batchmodus und anschließend im Durchlaufbetrieb durchgeführt wurden. Hierbei wurde sowohl künstliches als auch reales Abwasser einer kommunalen Kläranlage getestet.

Die Leistungsfähigkeit des Prototyps konnte im Verlauf der Untersuchungen insgesamt deutlich gesteigert werden, was sich u.a. in einer Reduzierung der erforderlichen hydraulischen Aufenthaltszeit des Abwassers von anfangs bis zu 24 Tagen auf minimal nur noch 0,6 Tage ausdrückte. Der im Mittel erreichte CSB-Abbau betrug hierbei bis zu 67 % für reales Abwasser bzw. bis zu 90 % bei Verwendung von Acetat als Substrat im kontinuierlichen Betrieb.

Als weiterer abwassertechnisch höchst relevanter Effekt fand in dem untersuchten System ein Transfer von Ammonium-Stickstoff durch die Anoden- und Kathodenkammer trennende Membran und dessen Aufkonzentrierung in der Kathodenkammer statt. Hierbei konnten bis zu 40% des  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus dem Abwasser in die Kathodenkammer überführt werden, wo sie grundsätzlich für eine weitere Stickstoffrückgewinnung genutzt werden können.

Auch wenn die maximal erzielte Coulomb Effizienz bei der Behandlung von kommunalem Abwasser von im Mittel 23% ein deutlicher Hinweis auf noch parallel ablaufende sekundäre Stoffwechselprozesse ist, die letztlich zu Lasten der erreichbaren Energieausbeute gehen, stellt die BES-Technologie (selbst wenn sie nur zur Elimination von CSB und Stickstoff eingesetzt würde, ohne signifikante Strommengen zu produzieren) somit eine vielversprechende Verfahrensoption zur energieeffizienten Abwasserreinigung dar. Die im Labormaßstab durchgeführten Versuche zu dreidimensionalen Anodenmaterialien für eine Verbesserung des Elektrodenflächen-zu-Volumen-Verhältnisses zeigten ebenfalls ein großes Potential für die Verbesserung der BES-Technologie.

## **Veröffentlichungen**

Die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse wurden bzw. sollen wie folgt veröffentlicht werden:

### 1. Fachpublikationen

*“A systematic approach to evaluating the effects of scaling up on the performance of bioelectrochemical systems using a technical scale microbial electrolysis cell”*

Robert Keith Brown, Falk Harnisch, Sebastian Wirth, Helge Wahlandt, Thomas Dockhorn, Norbert Dichtl, Uwe Schröder; eingereicht bei *Bioresource Technology* (s. Anhang 1)

*„Entwicklung und Optimierung einer mikrobiellen Brennstoffzelle im Technikumsmaßstab für die Reinigung von kommunalem Abwasser“*

Robert Keith Brown, Falk Harnisch, Sebastian Wirth, Helge Wahlandt, Thomas Dockhorn, Norbert Dichtl, Uwe Schröder; in Planung für *Korrespondenz Abwasser*

### 2. Vorträge

*“On the the Scaling Up of and Performance Assessment of Bioelectrochemical Systems based on a Technical Scale Microbial Electrolysis Cell”* Brown *et al.*, eingereicht zur Electrochemistry 2014 in Mainz

### 3. Abschlussarbeiten

Robert Keith Brown, M.Sc. (Water Science) *“Microbial Fuel Cells: Development to Prototype status”*, Universität Duisburg-Essen, 2012 (s. Anhang 2)

Andre Baudler, M.Sc. (Chemie) *“Elektrochemisch aktive Biofilme auf Basis mikrobieller Konsortien: Grundlagenuntersuchung zur Verwendung von Mono - und Mischsubstraten”*, TU Braunschweig, 2012 (s. Anhang 3)

### 4. Messeteilnahmen & Öffentlichkeitsarbeit

Das Institut für Siedlungswasserwirtschaft hatte bereits auf der IFAT München im Jahre 2012 den im Rahmen der Untersuchungen verwendeten BES-Prototypen auf dem institutseigenen Stand dem interessierten Fachpublikum vorgestellt. Auch auf der diesjährigen IFAT vom 5.-9. Mai 2014 in München wird der Prototyp zusammen mit den aktuellen Forschungsergebnissen auf dem institutseigenen Stand des ISWW wieder als Exponat aufgestellt werden.

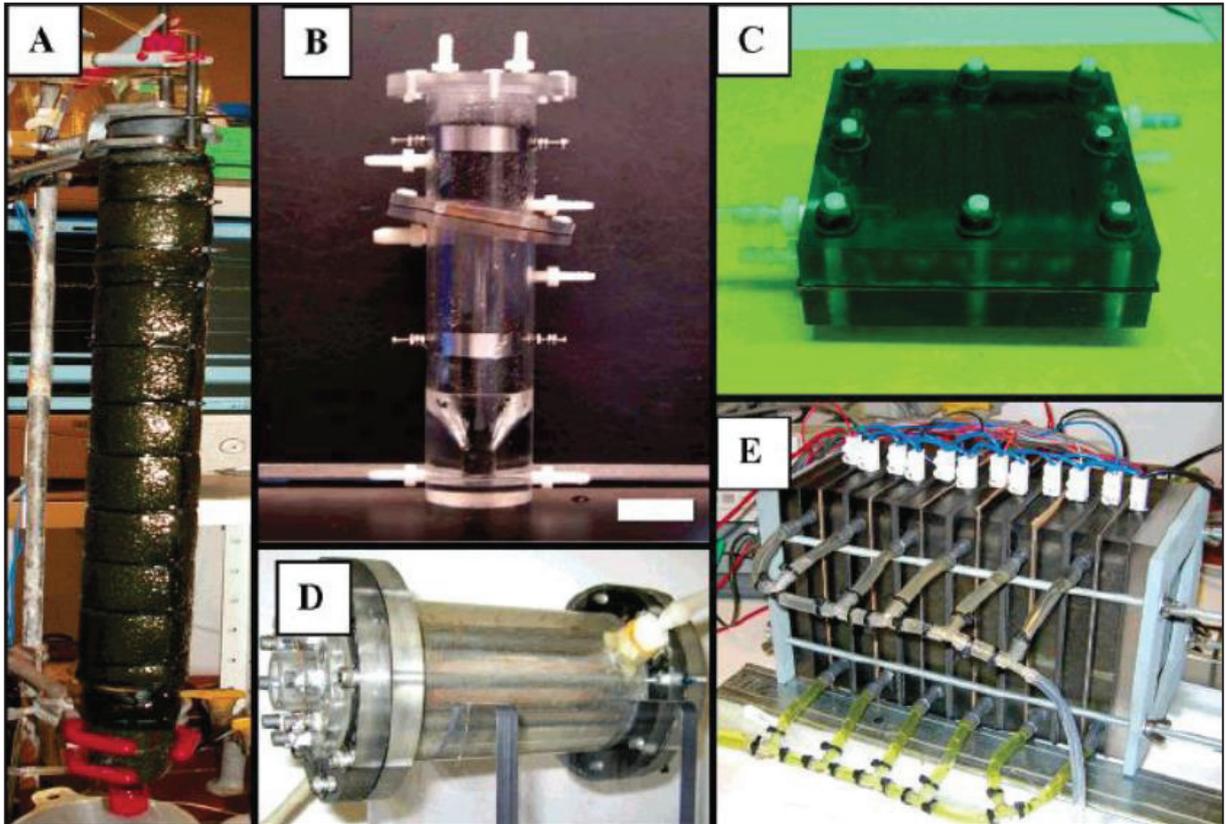
## 1. Problemstellung und Stand von Wissenschaft und Technik

Die Erschließung neuer Ressourcen für die Erzeugung elektrischer Energie stellt eine der zentralen Herausforderung der nächsten Dekaden dar. Dabei ist die Umwandlung heutiger Nutzenergie verbrauchender Prozesse in Nutzenergie bereitstellende Prozesse von herausragender Bedeutung (*from sink to source*). So stellt beispielsweise die herkömmliche Reinigung von Abwasser einen Prozess dar, der unter hohem Einsatz natürlicher und finanzieller Ressourcen die im Abwasser enthaltenen potentiellen Ressourcen (v.a. organische Inhaltsstoffe als Energieträger, N und P als Pflanzennährstoffe) eliminiert, ohne hierbei einen über die Reinigung des Abwassers hinausgehenden Mehrwert zu generieren.

Allein der Stromverbrauch der Abwasserbehandlung liegt bei rund 32 kWh/EW·a (entsprechend ca. 91 kWh/EW·a an Primärenergie). Andererseits stellen die im Abwasser enthaltenen organischen Verbindungen ein energetisches Potenzial dar, welches ca. 170 kWh/EW·a an Primärenergie entspricht (Haber Kern et al., 2007). Insofern kann die energetische Nutzung von Abwasser- und Abfallströmen in Zukunft eine zentrale Rolle spielen. Hier bieten mikrobielle bioelektrochemische Systeme (BES) (Schröder et al., 2010) eine faszinierende neuartige Möglichkeit, mit Hilfe von elektrochemisch aktiven Mikroorganismen die im Abwasser vorhandene Energie nutzbar zu machen, siehe u.a. (Schröder et al., 2010). In den letzten Jahren konnte eine weltweite sehr stark steigende Forschungsaktivität an diesen Systemen und den zu Grunde liegenden Mechanismen verzeichnet werden. Dies resultierte sowohl in faszinierenden Einblicken in die bioelektrochemischen und mikrobiellen Grundlagen als auch in vielfältige und vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten.

Allerdings wurden mikrobielle bioelektrochemische Systeme bisher fast ausschließlich im Labormaßstab, d.h. <1L Anodenkammervolumen, betrieben. Es existieren zwar einige theoretische Arbeiten zu den Herausforderungen der Skalierung dieser Systeme sowie diverse Reaktordesigns im Labormaßstab (s. Abbildung 1), aber bei Projektbeginn nur zwei (bekannte) Projekte welche über den Labormaßstab hinausgehen. Das erste Pilotprojekt einer mikrobiellen Brennstoffzelle war an der Fosters-Brauerei in Yatala (Australien) angesiedelt, allerdings wurden aufgrund der (vorwiegend durch Konstruktionsmängel hervorgerufenen) nur sehr geringen Leistungsfähigkeit keine Daten publiziert. Beim zweiten Projekt handelt es sich um einen im Nappa-Valley (USA) angesiedelten mikrobiellen Elektrolyseur (MEC - *microbial electrolysis cell*) zur Wasserstoffherzeugung, welcher sehr wenig aussagekräftige Daten lieferte (Cusick et al., 2011). Darüber hinaus wurde im Laufe des Projektes eine weite-

re MEC-anlage in Großbritannien bekannt (Heidrich et al., 2013). Daher bestehen weltweit nur sehr wenige und in Europa bislang lediglich eine (bekannte) Pilotanlage; darüber hinaus existieren weltweit noch keine systematischen Untersuchungen an BES-Systemen und deren anwendungsorientierter Optimierung im Technikumsmaßstab.



**Abb. 1:** Ausgewählte Laborreaktoren (Bild von (Rabaey and Rozendal, 2010, 2010)) A) tubulärer Up-flow-Reaktor mit außen liegender Kathode, B) tubulärer Up-flow-Reaktor, C) Flachzelle, D) Einzelreaktor mit innenliegender Kathode, E) Flachzellreaktor-Stack.

Deshalb wurde im Rahmen dieses Kooperationsprojekts der Aufbau und die Charakterisierung eines Mikrobiellen Bioelektrochemischen Systems im Technikumsmaßstab, fortan als „Prototyp“ bezeichnet, durchgeführt, um eben diese Lücke zu schließen. Basierend auf ersten vielversprechenden Vorarbeiten am Standort Braunschweig wurde eine systematische Entwicklung vorangetrieben.

## 2. Ergebnisse

Die im Rahmen dieses Projektes erzielten Ergebnisse werden nach einer Analyse des Projektverlaufs auszugsweise dargestellt. Details können den jeweiligen vollständigen wissenschaftlichen Arbeiten entnommen werden. Dabei stellen die direkten Untersuchungen am Prototypen den Hauptanteil dar (**Anhang 1** und **Anhang 2**).

### 2.1. Erreichte Projektziele & Abweichungen vom Arbeitsplan

Die im Projekt beantragten Arbeiten wurden erfolgreich durchgeführt und es konnten in erheblichem Umfang neue Erkenntnisse gewonnen werden. Weiterhin wurden über die geplanten Arbeitsschritte hinaus wissenschaftlich interessante und potentiell technisch relevante Erkenntnisse gewonnen. Die im Antrag formulierten Projektziele wurden erreicht, allerdings wurde dazu kein vollständig neuer Reaktor gebaut. Stattdessen waren durch die Flexibilität des bereits bestehenden Reaktors substantielle Veränderungen (Optimierungen) am Reaktor möglich. Diese verbesserte Konstruktion führte bereits zu deutlichen Leistungssteigerungen. Weiterhin erlaubte die adaptive Verbesserung von Einzelkomponenten während des laufenden Betriebes eine wesentlich bessere statistische Absicherung der gewonnenen Erkenntnisse. Im Folgenden sind die Ergebnisse bzw. Variationen zum Arbeitsplan kurz zusammengefasst:

Arbeitspaket 1:     *Charakterisierung des Prototyp I und Optimierung der Elektrodenmaterialien*

Es wurden alle geplanten Arbeiten durchgeführt und in Zusammenwirken mit den AP 2 und AP3 noch weitere Modifikationen, u.a. neues Kathodenmaterial, eingeführt.

Arbeitspaket 2:     *Konstruktion und Bau von Folgereaktor Prototyp II, sowie*

Arbeitspaket 3:     *Betrieb und Charakterisierung des Prototyp II*

Wie dargelegt wurde kein vollständig neuer Reaktor gebaut, sondern es wurden adaptive Verbesserungen am bestehenden System durchgeführt.

Arbeitspaket 4:     *Planung und Veranstaltung eines Workshops*

Die Außenwirkung wurde und wird durch Messebesuche sowie die Publikationen (s.o.) intensiviert. Der ursprünglich geplante Workshop mit potentiellen Anwendern erwies sich als wenig praktikabel. Deshalb wurde – in Absprache mit der DBU – auf bilaterale Gesprächsformen ausgewichen (s. 3.2.). Weiterhin wurde seitens der Projektleitung mittlerweile eine Workshopreihe (*Mikrobielle Bioelektrotechnologie: Eine Plattforminitiative für Deutschland*) initiiert, welche den Kontakt zwischen Forschung und Industrie befördern soll.

**Arbeitspaket 5:** *Begleitforschung an Laborsystemen*

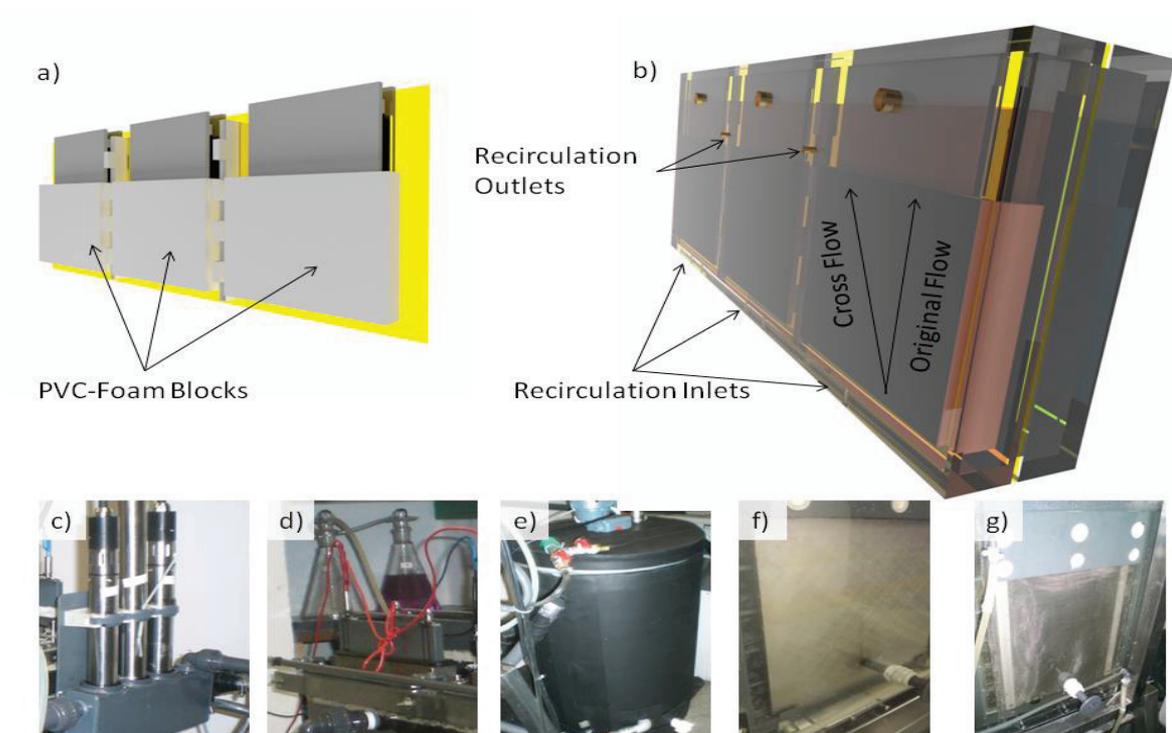
Diese Arbeiten wurden vollständig durchgeführt und sind in Kapitel 2.3. & **Anhang 3** zusammengefasst.

**Arbeitspaket 6:** *Begleitforschung zur technischen Umsetzung*

Diese Arbeiten wurden vollständig durchgeführt (Kapitel 2.2. sowie in **Anhang 2**).

**2.2. Hauptergebnisse: Eine systematische Untersuchung zum Einfluss verschiedener Parameter auf die Leistungsfähigkeit mikrobieller elektrochemischer Systeme bei deren Skalierung in den Technikumsmaßstab**

Im Rahmen der Arbeiten wurde eine mikrobielle Elektrolysezelle im Technikumsmaßstab, welche anodisch Realabwasser der Kläranlage "Steinhof" in Braunschweig behandelte untersucht und hinsichtlich der Effizienz der Abwasserbehandlung, der Coulomb'schen Effizienz (CE) und der Stromproduktion mit laborbasierten Systemen sowie der lokalen Kläranlage verglichen. Abbildung 1 zeigt den Reaktor in seiner finalen Konfiguration.



**Abb. 2:** Modifikationen des Reaktors in seiner finalen Ausbaustufe a) PVC Platten zur Verringerung des anodischen Totraums; b) Zusätzliche Rezirkulationspumpen zur Verbesserung des Flussregimes im Anodenraum; c) Online Sensoren, von links nach rechts, für O<sub>2</sub> (aq), pH, Temperatur und Leitfähigkeit; d) Kathodische Ammoniumfalle (1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Thymolblau); e) Kühlweste des Vorratsgefäßes; Ersatz der kathodischen Edelstahlplatten (f) durch Edeltstahlgitter (g).

Im Durchflussregime bei einer hydraulischen Retentionszeit von 1,23 Tagen und einer durchschnittlichen CSB-Belastung von  $0.5 \text{ g}_{\text{O}_2} \text{ d}^{-1} \text{ L}_{\text{Reaktor}}^{-1}$  wurde ein CSB-Abbau von 67 % bei einer Effluentkonzentration von  $\varnothing 210 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$  und einer durchschnittlichen Stromdichte  $\varnothing 72 \mu\text{A cm}^{-2}$  and  $\varnothing$  CE von 11 % erreicht. Weiterhin wurde eine effektive Stickstoffeliminierung aus dem Vollstrom bei  $17.8 \pm 3.9 \text{ mg N d}^{-1} \text{ LReactor-1}$  bei einer Abreicherungseffizienz von  $40 \pm 7 \%$  demonstriert. Weiterhin wurde eine Methode zur Evaluation verschiedener BES-Systeme eingeführt und kritisch diskutiert. Für eine ausführliche Darstellung der im Projekt erzielten Hauptergebnisse sei auf **Anhang 1** und **Anhang 2** verwiesen.

### **2.3. Begleitforschung: Elektrochemisch aktive Biofilme auf Basis mikrobieller Konsortien: Grundlagenuntersuchung zur Verwendung von Mono - und Mischsubstraten**

Im Rahmen dieser Arbeiten wurden systematisch Monosubstrate, sowie definierte Mischungen dieser und Realabwässer für ihre Eignung in mikrobiellen bioelektrochemischen Systemen untersucht. Neben einer prozessorientierten Charakterisierung (Stromdichte und Coulomb'sche Effizienz) erfolgte die molekularbiologische Analyse der elektroaktiven Biofilme. Es konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Monosubstrate Acetat, Mannitol, Glycerin und Zitronensäure ihrerseits eine gute Verwendbarkeit als Substrate in mikrobiellen Brennstoffzellen zeigen. Dabei wurden mit Mannitol und Acetat die höchsten Maximalstromdichten von  $783.72 \mu\text{Acm}^{-2}$  bzw.  $751.22 \mu\text{Acm}^{-2}$  erreicht. Hierbei zeigte Acetat die höchste Coulombsche Effizienz ( $83.93 \pm 0.83 \%$ ), während die anderen Substrate Werte um 40-60 % lieferten. Für eine ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse sei auf **Anhang 3** verwiesen.

### 3. Ausblick & Weiterführung

#### 3.2. Integration von BES in die Abwasserbehandlungsinfrastruktur

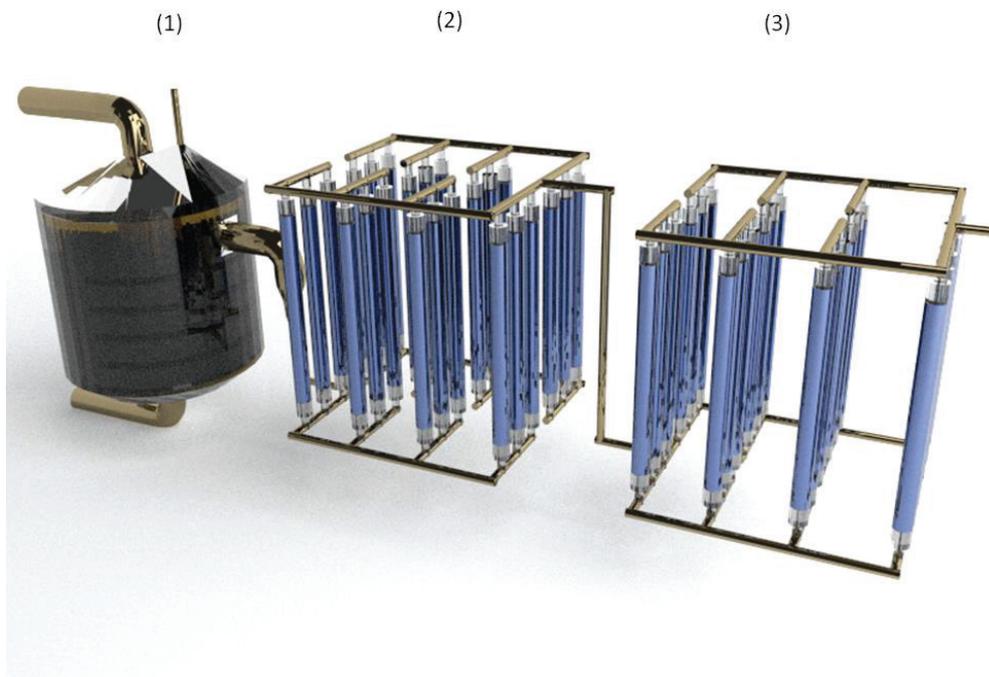
Die Ergebnisse des Projektes indizieren, dass mikrobielle bioelektrochemische Systeme im Rahmen der Abwasserbehandlung zu einer robust einsetzbaren Technologie entwickelt werden können und dabei mit wechselnden Frachten, variablen Substratzusammensetzungen und einem breiten Spektrum sowie Schwankungen von Umweltparametern wie pH, Temperatur, etc. zurecht kommen können. Erste Hinweise auf eine entsprechende Robustheit lassen sich an folgendem Beispiel illustrieren: Am Ende der Closed Loop Batchversuche und nach der Umstellung zu kontinuierlichem Betrieb gab es einige problematische Ereignisse. Diese Ereignisse, wie sie in gleicher oder ähnlicher Form auch im Regelbetrieb auftreten könnten, sind in Tab. aufgelistet. Alle aufgetretenen Betriebsstörungen ließen sich jedoch mit minimalem Aufwand und ohne einen Neustart des Reaktors beheben, was die Robustheit des Systems eindeutig unterstreicht. Für weiter reichende Aussagen sind jedoch ausführliche Langzeittests notwendig, welche über den Rahmen des Projektes hinausreichen.

**Tab.1:** Ereignisbasierte Stress-Analyse des Betriebszustands

Ereignis	Folge(n)	Reaktion	Resultat
<b>Rührer im Vorratsbehälter ausgefallen</b>	Substrate gelangten nicht mehr in den Reaktor	Rührer ersetzt	Normaler Betrieb konnte stets wieder aufgenommen werden.
<b>Leck in der Zulaufleitung</b>	Anodenkammer über Nacht leer gelaufen und mit O <sub>2</sub> „kontaminiert“	Mit Abwasser wieder gefüllt	
<b>Referenzelektroden defekt</b>	bis zu 10 V Zellspannung	Referenzelektrode. ausgetauscht, EAB mit Acetat wiederbelebt	
<b>Betriebspause &gt; 1 Monat</b>	Möglicher Rückgang des EAB	Betrieb ohne Sondermaßnahmen wieder aufgenommen	

Neben den Aspekten der Energieeinsparung- und Rückgewinnung besitzen BES weitere potentielle Vorteile, wie unter anderem eine Nährstoffrückgewinnung oder eine vergleichsweise geringe potentielle Überschussschlammproduktion. Nach fast einem halben Jahr Betrieb wurde eine Überschussschlammproduktion von nur circa 1 % in dem Reaktor festgestellt. Dieser Einzelbefund bedarf selbstverständlich noch ausführlicherer Validierung, stimmt je-

doch mit Daten aus der Literatur (Pham et al., 2009; Pant et al., 2011) überein und wird derzeit zuzüglich in einer Laborversuchsreihe validiert. Ein weiterer interessanter Aspekt, welcher parallel zu den hier beschriebenen Arbeiten untersucht wird, ist der mögliche Abbau von persistenten Schadstoffen/ Micropollutants oder Antibiotika (Harnisch et al., 2013), welche mit herkömmlichen Technologien nicht oder nur durch sehr verbrauchsmittel- bzw. energieintensive Prozesse aus Abwässern entfernt werden können. Weiterhin vielversprechend ist die parallele Herstellung von Chemikalien (Harnisch and Schröder, 2010) wie beispielsweise Wasserstoff oder alkalischer Bleichlösung zum Einsatz vor Ort. Wie zum Beispiel in einem Konzept-Design für eine kombinierte dreistufige anaerobe Abwasserreinigung dargestellt. Dabei können in allen drei Stufen bioelektrochemische System zu Einsatz kommen. Hier dargestellt ist in Abb. 3 (1) die bioelektrochemisch stimulierte Hydrolysen, in (2) die bioelektrochemische unterstützte Ammoniumrückgewinnung sowie in (3) die Abwasserreinigung und Energiegewinnung in einer mikrobiellen Brennstoffzelle.



**Abb. 3:** Konzeptskizze eines dreistufigen anaeroben bioelektrochemischen Abwasserreinigungssystems bestehend aus: 1) Anaerober Versäuerungstank (ggf. mit integriertem BES) zur verbesserter Biogasproduktion; 2) BES-Stacks für die Ammonium-Elimination und Produktgewinnung, z.B. Ammoniumsulfat, Wasserstoffgas, Bleichlösung, etc.; 3) MBZ-Stacks für die Haupt Abwasserreinigung und Stromerzeugung.

### 3.3. Geplante Folgeaktivitäten

Die im Projekt erzielten Ergebnisse sollen zunächst im Hinblick auf die Fortführung der weiterhin erforderlichen Optimierungsarbeiten an mikrobiellen bioelektrochemischen Systemen insbesondere gegenüber potentiellen Anwendern und Technologiepartnern bekannt gemacht werden. Dies ist unter anderem im Rahmen der geplanten Ausstellung des Prototypen auf der IFAT sowie durch entsprechende Fachpublikationen vorgesehen.

Die entsprechend dem derzeitigen Wissensstand wichtigsten noch offenen Fragestellungen bzw. weiter und vordringlich zu optimierenden Systemkomponenten sind im Folgenden kurz umrissen.

**Temperatureinfluss und –abhängigkeit:** die bisherigen Untersuchungen am Prototypen wurden in einem Temperaturbereich von etwa 25-35°C durchgeführt. Da für einen großtechnischen Anwendungsfall jedoch in jedem Fall die jeweils vorherrschenden Abwassertemperaturen maßgeblich sind und die Geschwindigkeit mikrobieller Prozesse grundsätzlich temperaturabhängig sind, müssen hier weitere Untersuchungen zur Prozessperformance und –stabilität bei wechselnden Temperaturen durchgeführt werden.

**Einfluss schwankender Abwasserzusammensetzungen:** obgleich im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen reales Abwasser eingesetzt wurde, wurde in der Vorlage jeweils mit Abwasserchargen gearbeitet, die für mehrere Tage vorgehalten wurden und somit eine über diesen Zeitraum relativ konstante Abwasserzusammensetzung garantierten. Im regulären Praxisbetrieb schwanken hingegen die Abwasserzusammensetzung sowie die Konzentrationen der relevanten Inhaltsstoffe im Tages- bzw. Wochengang oftmals signifikant, weshalb die Adaption eines BES-Systems an stark wechselnde Bedingungen Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein muss.

**Elektrodenmaterial und Reaktorarchitektur:** im Rahmen der Untersuchungen konnte u.a. gezeigt werden, dass sowohl das Elektrodenmaterial als auch die Reaktorarchitektur (speziell die Innenarchitektur des Anodenraumes) eine ausschlaggebende Rolle hinsichtlich der Systemperformance spielen. Insofern müssen auch diesbezüglich weitere Optimierungsansätze verfolgt werden, um einerseits den erforderlichen Materialaufwand für den Bau von BES-Systemen zu reduzieren, als auch die erreichbaren Raum-/ Zeit-Ausbeuten zu erhöhen. Im Labormaßstab wurden dreidimensionale Anodenmaterialien für eine Verbesserung des Elektrodenflächen-zu-Volumen-Verhältnisses untersucht. Mit einer CSB-Abbau-Effizienz von

über 90% bei einer Coulomb-Effizienz von über 70% zeigten diese Materialien ein großes Potential für eine zukünftige Verbesserung der Anodenleistung.

**Stickstoff-Recycling:** die Untersuchungen am Prototypen haben ergeben, dass im Laufe des Anlagenbetriebs ein kontinuierlicher transmembraner Flux von  $\text{NH}_4\text{-N}$  in Richtung der Kathodenkammer und dessen dortige Aufkonzentrierung (bei gleichzeitiger pH-Werterhöhung) stattfindet. Es wurden auch bereits Untersuchungen zur  $\text{NH}_3$ -Strippung mit dem Ziel einer Stickstoffrückgewinnung durchgeführt, die eine grundlegende Eignung für diese Zwecke belegt haben. Diesen Ansatz gilt es in weiterführenden Arbeiten in Richtung einer Gesamtsystemlösung weiter zu entwickeln. Insbesondere auf Grund der hohen spezifischen Reinigungskosten, die der Parameter Stickstoff auf Kläranlagen verursacht, liegt in diesem Bereich mutmaßlich das größte ökonomische Potenzial von BES, wenn sie für die Stickstoffausschleusung im Vollstrom eingesetzt werden können.

**Bilanzierung des Gesamtsystems:** die bisher durchgeführten Arbeiten waren eher auf die Betrachtung der Systemperformance denn auf die Erstellung geschlossener Stoffstrombilanzen ausgelegt. Gerade die ersten Untersuchungen zur Abschätzung der Überschusschlammproduktion haben wichtige Hinweise darauf gegeben, dass diese bei dem untersuchten BES-System offenkundig äußerst gering war. Da die Behandlung und Entsorgung von Klärschlämmen jedoch ein signifikanter Kostenfaktor im Betrieb konventioneller Kläranlagen darstellt, ist es evident, diesbezüglich zu belastbareren Aussagen und konsistenten Systemzusammenhängen zu gelangen, die nur durch das Erstellen geschlossener Bilanzen belastbar ermittelt werden können.

**Fortführung der Projektarbeiten:** Es ist das erklärte Ziel der Projektpartner die hier gewonnenen Ergebnisse weiter zu verfolgen und die Entwicklung voran zu treiben. Dazu laufen derzeit Sondierungsgespräche mit Multiplikatoren (Verbänden) sowie konkreten potentiellen Partnern, dazu zählen unter anderem KMUs.

#### 4. Referenzen

- Cusick, R.D., Bryan, B., Parker, D.S., Merrill, M.D., Mehanna, M., Kiely, P.D., Liu, G., Logan, B.E., 2011. Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater. *Appl Microbiol Biotechnol* 89 (6), 2053–2063. 10.1007/s00253-011-3130-9.
- Haberkern, B., Maier, W., Schneider, U., 2007. Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen.
- Harnisch, F., Gimkiewicz, C., Bogunovic, B., Kreuzig, R., Schröder, U., 2013. On the removal of sulfonamides using microbial bioelectrochemical systems. *Electrochemistry Communications* 26, 77–80. 10.1016/j.elecom.2012.10.015.
- Harnisch, F., Schröder, U., 2010. From MFC to MXC: chemical and biological cathodes and their potential for microbial bioelectrochemical systems. *Chem. Soc. Rev.* 39 (11), 4433. 10.1039/c003068f.
- Heidrich, E.S., Dolfig, J., Scott, K., Edwards, S.R., Jones, C., Curtis, T.P., 2013. Production of hydrogen from domestic wastewater in a pilot-scale microbial electrolysis cell. *Appl Microbiol Biotechnol* 97 (15), 6979–6989. 10.1007/s00253-012-4456-7.
- Pant, D., Singh, A., van Bogaert, G., Gallego, Y.A., Diels, L., Vanbroekhoven, K., 2011. An introduction to the life cycle assessment (LCA) of bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy and product generation: Relevance and key aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2), 1305–1313. 10.1016/j.rser.2010.10.005.
- Pham, T.H., Aelterman, P., Verstraete, W., 2009. Bioanode performance in bioelectrochemical systems: recent improvements and prospects. *Trends in Biotechnology* 27 (3), 168–178. 10.1016/j.tibtech.2008.11.005.
- Rabaey, K., Rozendal, R.A., 2010. Microbial electrosynthesis - revisiting the electrical route for microbial production. *Nat. Rev. Microbiol.* 8 (10), 706–716. 10.1038/nrmicro2422.
- Schröder, U., Harnisch, F., Rabaey, K., Angenent, L., Keller, J. (Eds.), 2010. *Bioelectrochemical Systems: From Extracellular Electron Transfer to Biotechnological Application*. IWA Publishing, London, New York.