

# BIOLOGISCHE BRENNSTOFFZELLEN FÜR DEN CHEMIEUNTERRICHT



DIDAKTIK  
DER  
CHEMIE

R. Grandrath, Wuppertal/DE, C. Bohrman-Linde, Wuppertal/DE  
Didaktik der Chemie, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20,  
42119 Wuppertal



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

# Struktur des Vortrags

---

1. Legitimation
2. Grundlagen biologischer Brennstoffzellen
- 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen**
4. Konzepte und Materialien
5. Fazit

# 1. Legitimation

I. „**Brennstoffzellen**“ sind bundesweit in den Lehrplänen der Sekundarstufe II an Gymnasien und Gesamtschulen verankert

II. Agenda 2030: **Sustainable Development Goals (SDG)**

- Ziel 4: „Hochwertige Bildung“ (BNE!)
- Ziel 7: „Bezahlbare und saubere Energie“
- Ziel 13: „Maßnahmen zum Klimaschutz“



Nachhaltigkeitsziele [1]

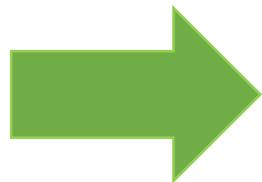
z.B. Kultusministerkonferenz (2020): Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020. Bonn, Berlin.  
UN General Assembly (21.10.2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1.

# 1. Legitimation

---

## III. Eigene NRW-weite Umfrage aus dem Jahr 2018:

- Vielfalt an Brennstoffzellensystemen ist unterrepräsentiert
- Bedarf an (didaktischen) Materialien und lowcost Experimenten zu verschiedenen Brennstoffzelltypen,
- Bedarf an Fortbildungen und Schüler:innen-Labortagen



Niedertemperatur-Brennstoffzellensysteme

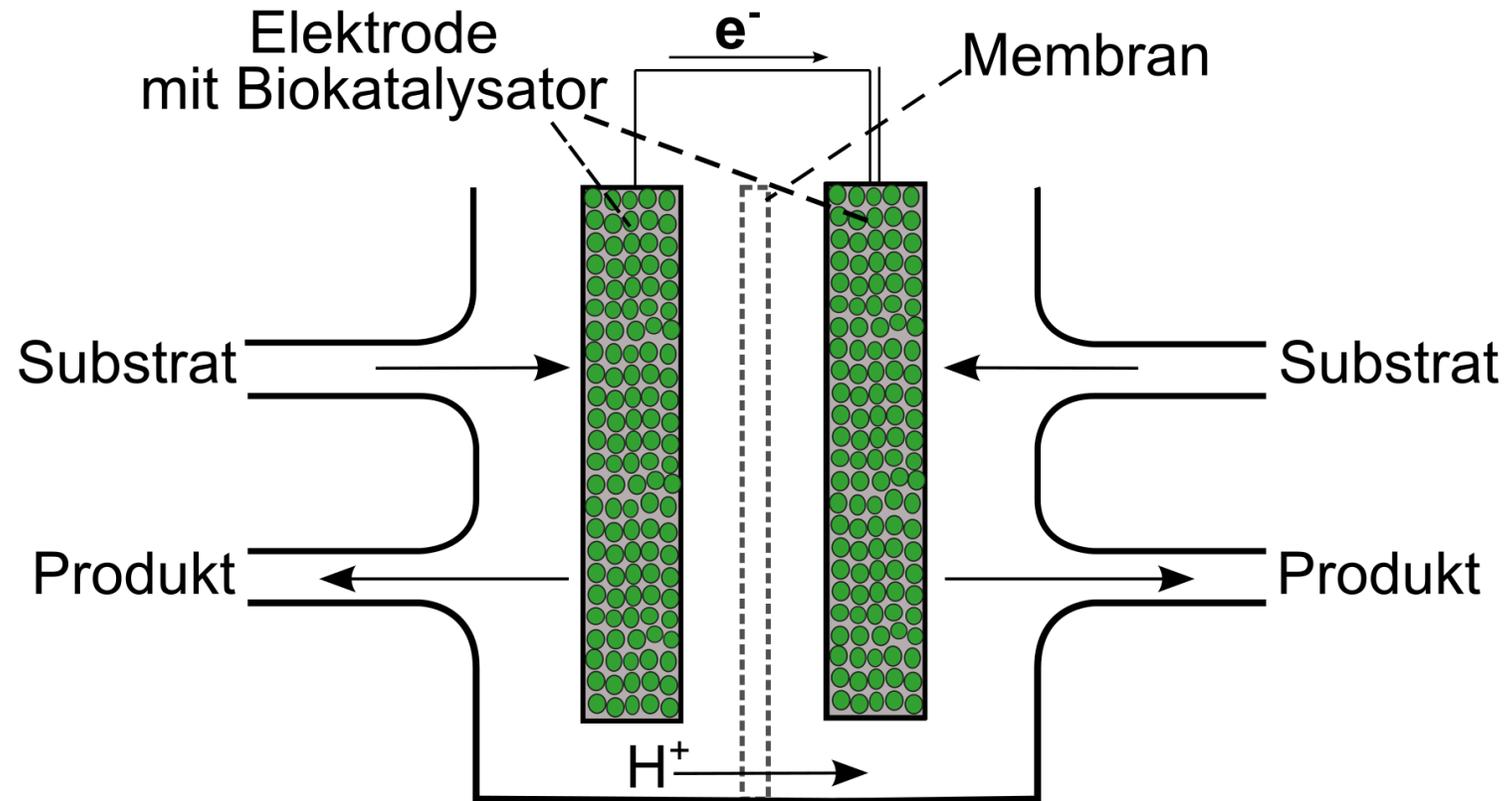
MINT-geeignete Systeme



Fokus: „Biologische Brennstoffzellen“

# 2. Grundlagen biologischer Brennstoffzellen

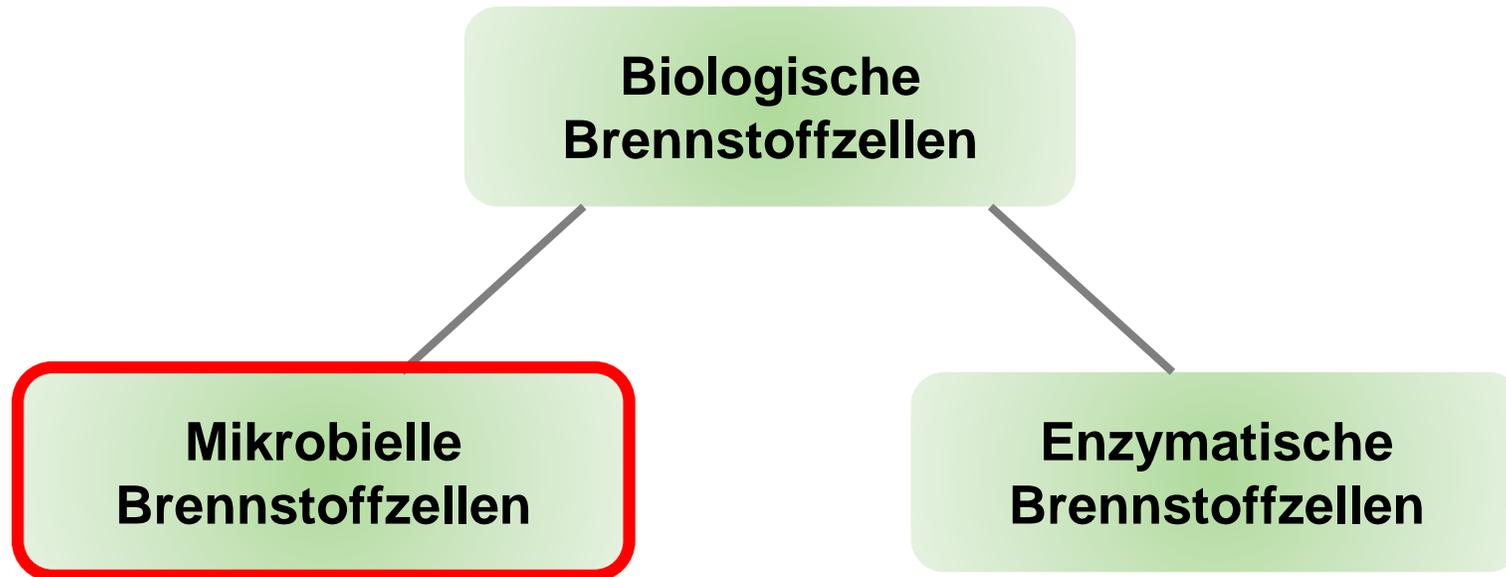
## ➤ Aufbau & Funktionsweise



Davis, Frank; Higson, Séamus P. J. (2007): Biofuel cells - recent advances and applications. In: Biosensors & bioelectronics 22 (7), S. 1224–1235.

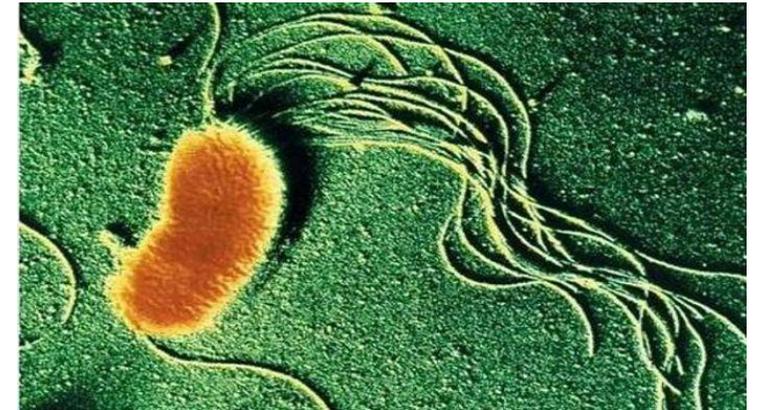
# 2. Grundlagen biologischer Brennstoffzellen

## ➤ Unterteilung



## 2. Grundlagen biologischer Brennstoffzellen

- **Einsatzgebiete • Mikroorganismen**
  - unter milden Bedingungen, Umsetzen komplexer Substrate
  - Haupteinsatzgebiet: Abwasseraufreinigung bei gleichzeitigem Generieren elektrischer Energie
  - meist stationäre Anwendung
  
- häufig Mikroorganismen der Gattungen *Geobacter* und *Shewanella*
- meist (un-)definierte Mischkulturen („Biofilme“)
  - Hydrolysierende Mikroorganismen
  - Elektroaktive Mikroorganismen
  - Mikroorganismen, die Nanowires ausbilden



*Geobacter metallireducens* [2]

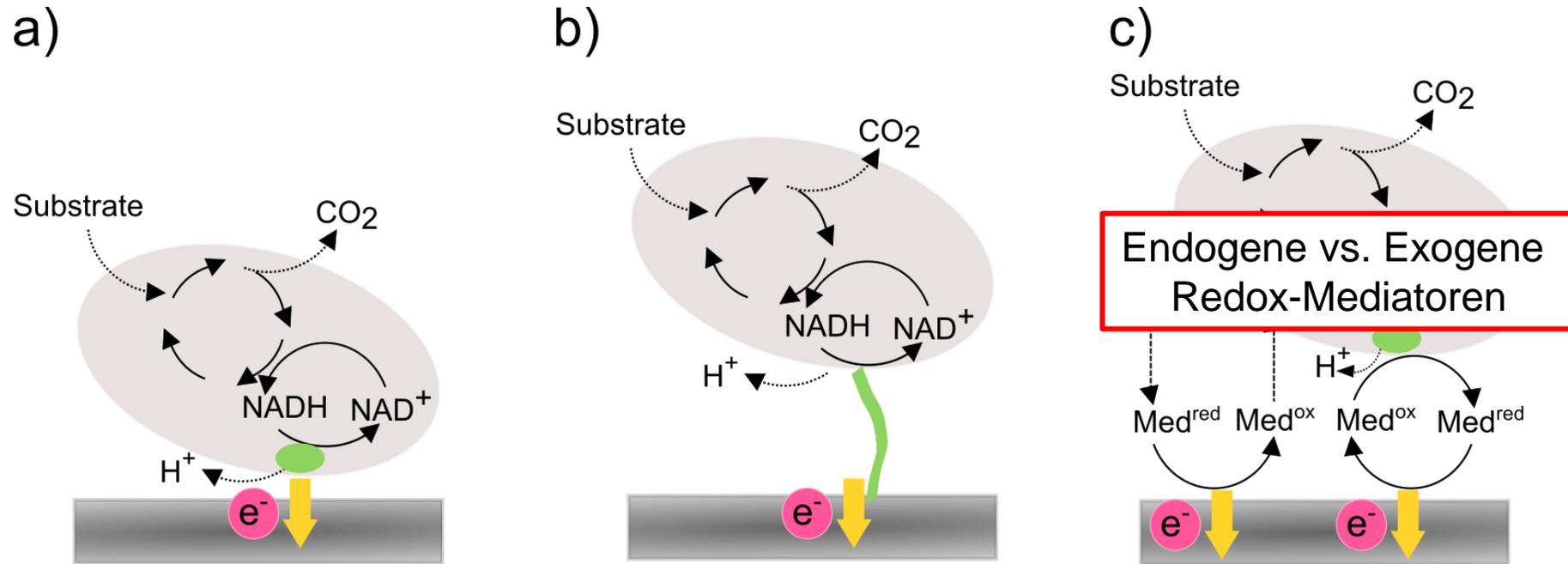
Kaiser, Patrick; Reich, Steffen; Leykam, Daniel; Willert-Porada, Monika; Greiner, Andreas; Freitag, Ruth (2017): Electrogenic single-species biocomposites as anodes for microbial fuel cells. In: Macromolecular Bioscience (17), S. 1–10.

Kumar, Ravinder; Singh, Lakhveer; Zularisam, A. W.; Hai, Faisal I. (2018): Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology. A review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances. In: Int J Energy Res 42 (2), S. 369–394.

Agler-Rosenbaum, Miriam; Schröder, Uwe; Harnisch, Falk (2013): Mikroben unter Strom. Von der Abwassertechnologie zur Bioelektrotechnologie. In: Biologie in unserer Zeit 43 (2), S. 96–103.

# 2. Grundlagen biologischer Brennstoffzellen

## ➤ Elektronentransfers auf die Elektrode • Redox-Mediatoren



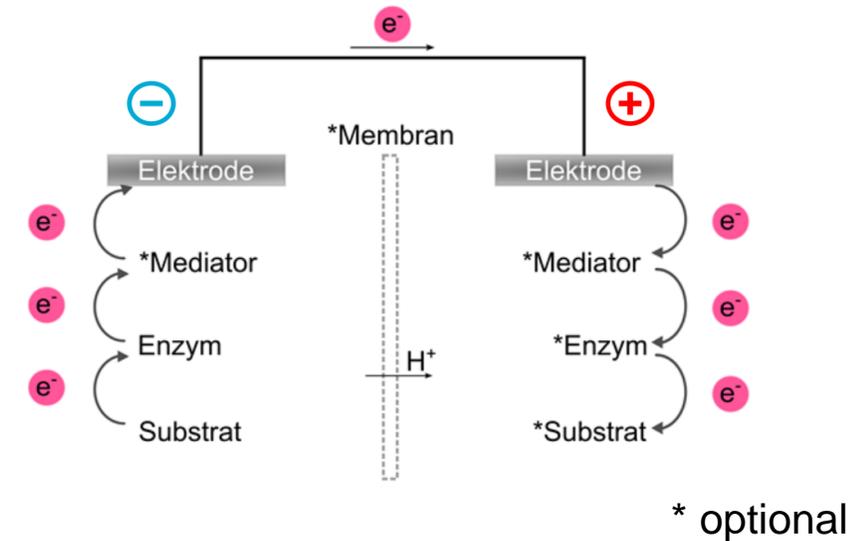
Schröder, Uwe (2007): Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. In: Physical Chemistry Chemical Physics (9), S. 2619–2629.

Agler-Rosenbaum, Miriam; Schröder, Uwe; Harnisch, Falk (2013): Mikroben unter Strom. Von der Abwassertechnologie zur Bioelektrotechnologie. In: Biologie in unserer Zeit 43 (2), S. 96–103.

# 2. Grundlagen biologischer Brennstoffzellen

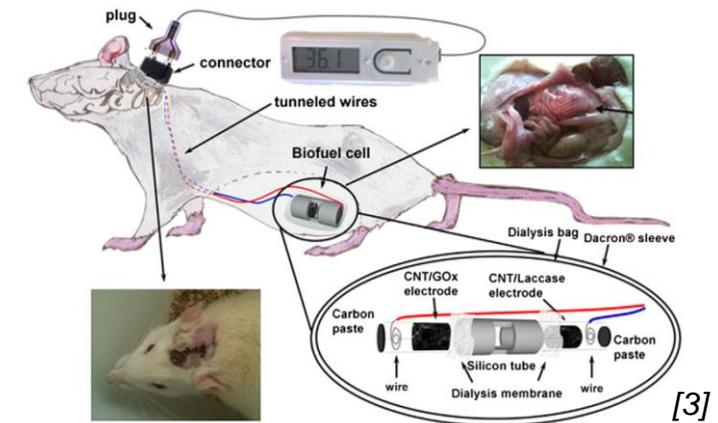
## ➤ Einsatzgebiete • Enzyme

- unter milden (physiologischen) Bedingungen, Umsatz **spezifischer** Substrate
- geplante Haupteinsatzgebiete: Biosensorik und inkorporierte Energieversorgung
- meist mobile Anwendung



## ➤ Inkorporierte Anwendungen noch im Tierversuchsstadium

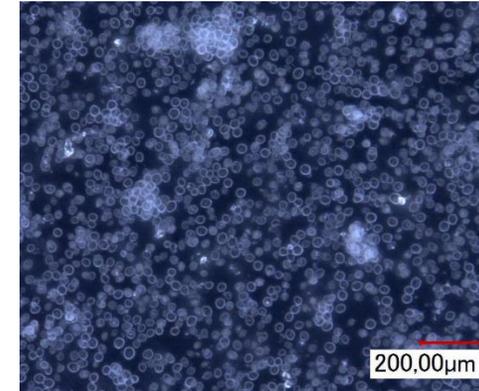
- häufig System aus  $\beta$ -Glucoseoxidase und Laccase



Rasmussen, Michelle; Abdellaoui, Sofiene; Minter, Shelley D. (2016): Enzymatic biofuel cells: 30 years of critical advancements. In: Biosensors & bioelectronics 76, S. 91–102.  
 Cosnier, Serge; Le Goff, Alan; Holzinger, Michael (2014): Towards glucose biofuel cells implanted in human body for powering artificial organs: Review. In: Electrochemistry communications 38, S. 19–23.

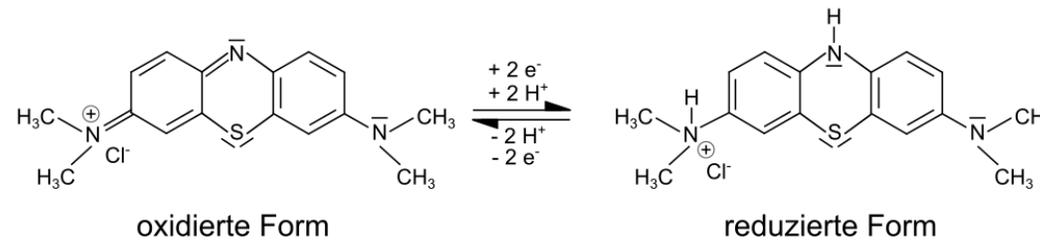
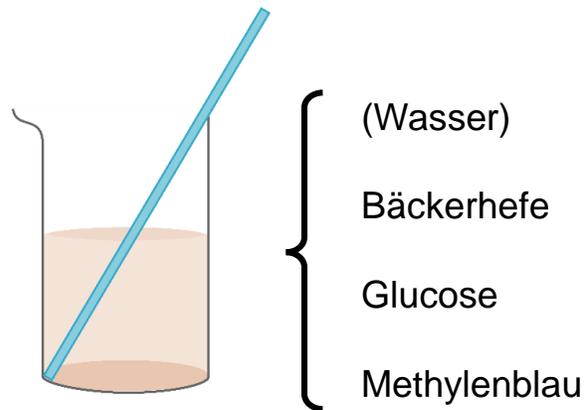
# 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen

- Mikrobielle Brennstoffzelle mit Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*



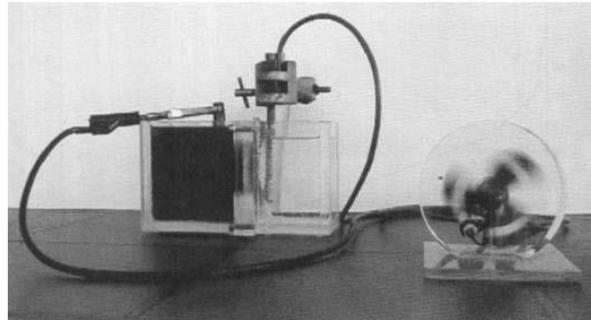
# 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen

➤ Brückenversuch: Redox-Aktivität von Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*



# 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen

## In der Fachdidaktik publizierte Versuche



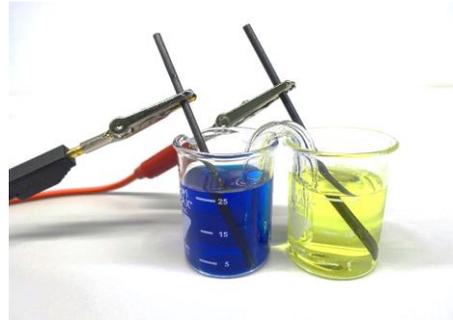
**Fassung:** Eigenbau-Plexiglas-Gehäuse

**Anode:** Graphitstab in Graphitgranulat, 2-Hydroxy-1,4-naphthochinon in Phosphatpuffer, Bäckerhefe und Glucose

**Kathode:** platinisiertes Titanstrecknetz, Salzsäure, Wasserstoffperoxid

**Membran:** Nafion® - Membran

Orth, Jean Marc; Wenck, Helmut (2001): Biochemische Brennstoffzellen im schulchemischen Experiment. In: CHEMKON 8 (3), S. 138–142.



Bechergläser

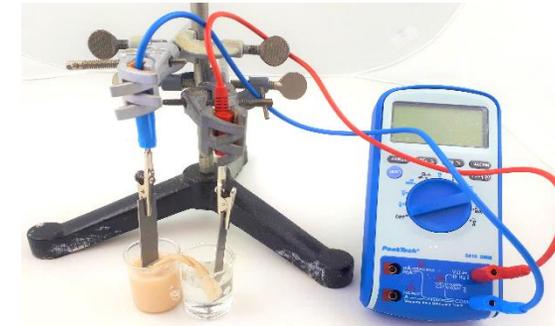
Graphitstab, Methylenblau, Phosphatpuffer mit Natriumchlorid, Bäckerhefe und Glucose

Graphitstab, Kaliumhexacyanoferrat in Phosphatpuffer mit Natriumchlorid

Keine, mit Kaliumchlorid in Agar gefüllte Elektrolytbrücke

Silveira, Gustavo; Ikegaki, Masaharu; Schneedorf, José Mauricio (2017): A low-cost yeast-based biofuel cell. An educational green approach. In: Green Chemistry Letters and Reviews 10 (1), S. 32–41.

## Weiterentwickelter **Schulversuch**



Bechergläser

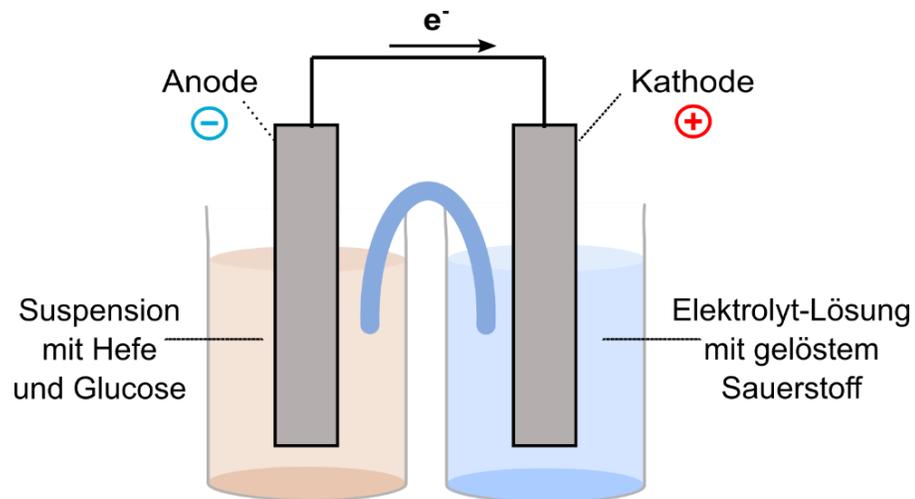
Eisenblech oder Eisennagel, Bäckerhefe und Glucose in dest. Wasser

Eisenblech oder Eisennagel, Glucose-Lösung

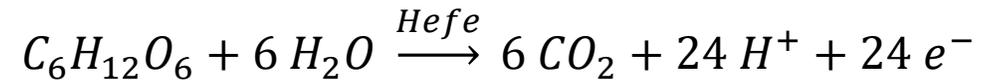
Toilettenpapier als Elektrolytbrücke

# 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen

- Mikrobielle Brennstoffzelle mit Bäckerhefe im **Zwei-Topf-Aufbau**
- Ablaufende Reaktionen (stark vereinfacht)



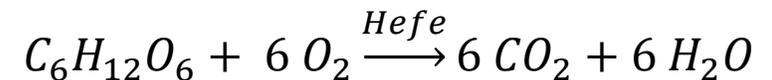
**Anode**



**Kathode**

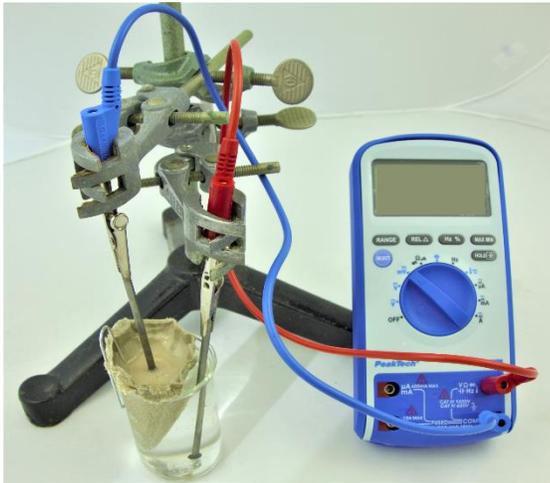


**Gesamt**



# 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen

- Mikrobielle Brennstoffzelle mit Bäckerhefe im *Ein-Topf-Aufbau*

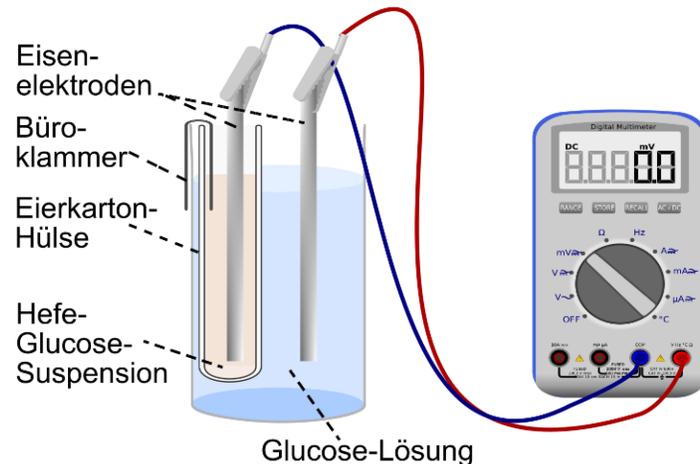


**Fassung:** Becherglas ( + Eierkarton-Hülse)

**Anode:** Eisenblech oder Eisennagel, Bäckerhefe und Glucose in dest. Wasser

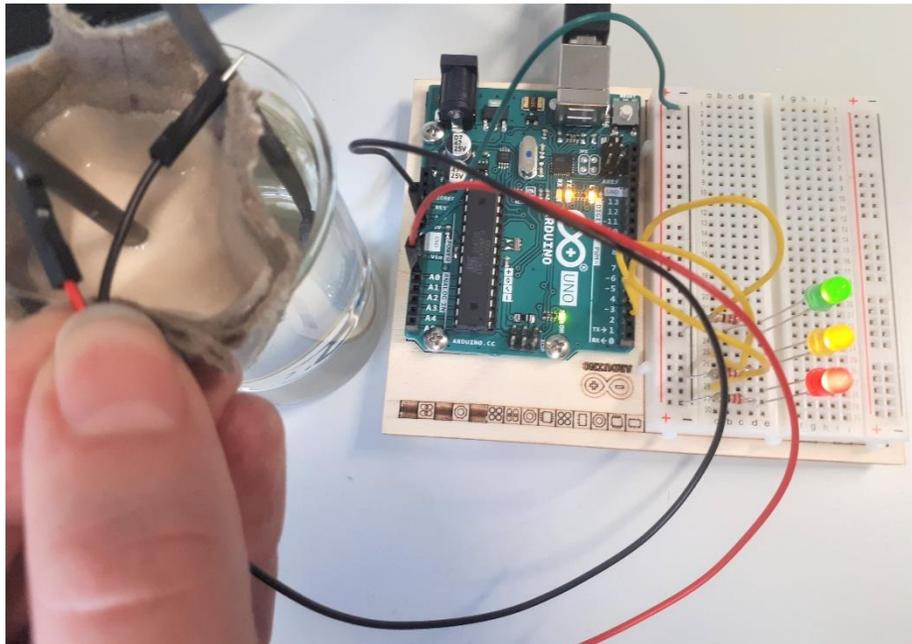
**Kathode:** Eisenblech oder Eisennagel, Glucose-Lösung

**Membran:** Eierkarton-Hülse



# 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen

- Mikrobielle Brennstoffzelle mit Bäckerhefe im **Ein-Topf-Aufbau**
  - gegenüber Zwei-Topf-Aufbau höhere Leistung
  - aber zu niedrig zum Betrieb eines „Verbrauchers“



```
const int PIN_TEST = A0;
const float baselineVolt = 290;

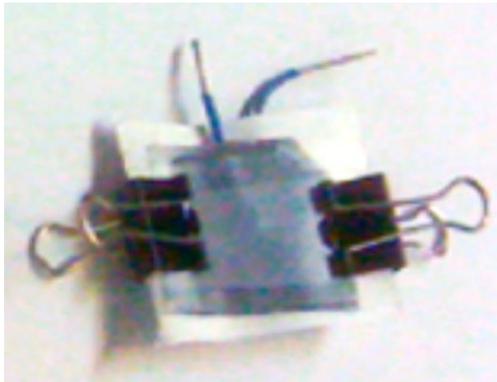
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  for (int pinNumber = 2; pinNumber < 5; pinNumber++) {
    pinMode(pinNumber, OUTPUT);
    digitalWrite(pinNumber, LOW);
  }
}

void loop() {
  int sensorVal = analogRead((PIN_TEST));
  Serial.print(", Sensormesswert");
  Serial.print(sensorVal);
  float voltage = (sensorVal );
  Serial.print(", Spannung in mV");
  Serial.print(voltage);

  if (voltage < baselineVolt) {
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(4, LOW);
  } else if (voltage >= baselineVolt + 10 && voltage < baselineVolt + 110) {
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(4, LOW);
  } else if (voltage >= baselineVolt + 110 && voltage < baselineVolt + 210) {
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, HIGH);
    digitalWrite(4, LOW);
  } else if (voltage >= baselineVolt + 210) {
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, HIGH);
    digitalWrite(4, HIGH);
  }
  delay(1);
}
```

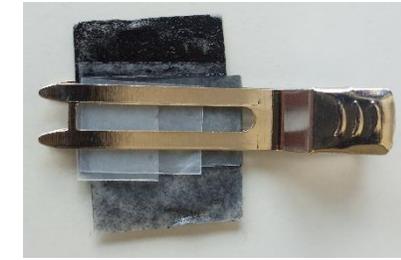
# 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen

*In der Fachdidaktik bereits publizierter Versuch*



- Fassung:** Parafilm
- Anode:** mit **carbon nano tubes**, **Glucoseoxidase** und Natriumdodecylbenzylsulfonat beschichtetes Filterpapier
- Kathode:** mit carbon nano tubes, **Laccase** und Natriumdodecylbenzylsulfonat beschichtetes Filterpapier
- Membran:** mit Glucose-Lösung getränktes Filterpapier

*Neu entwickelter **Schulversuch***



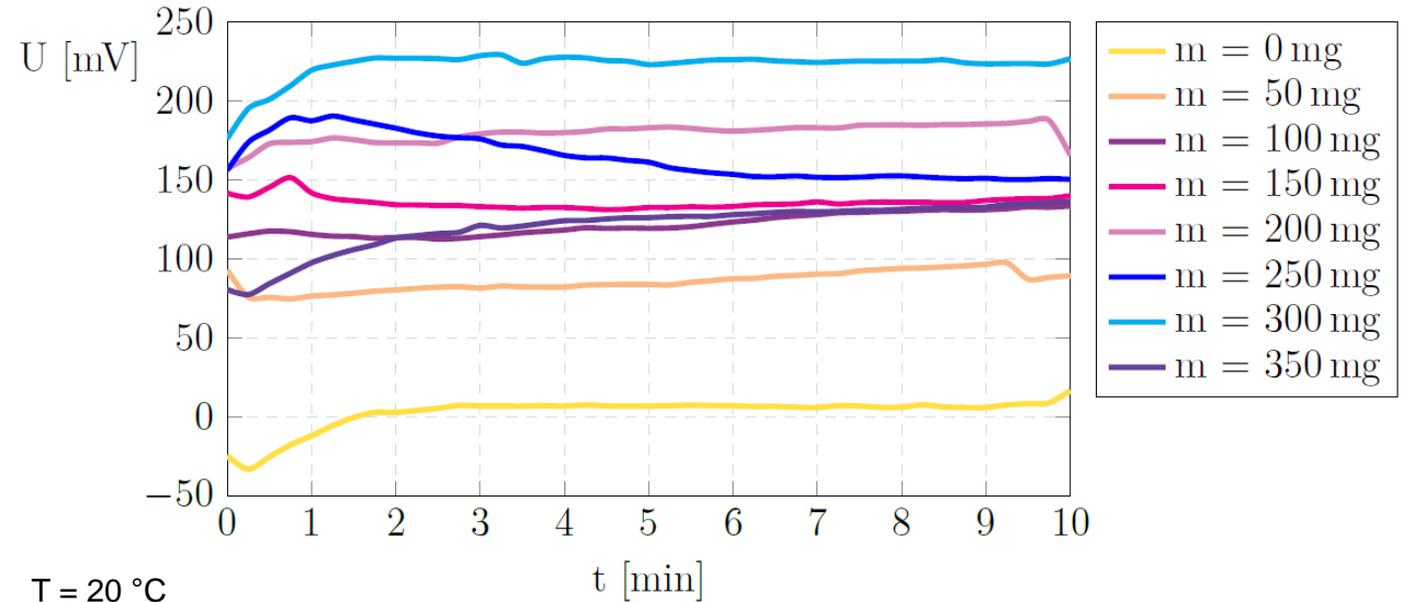
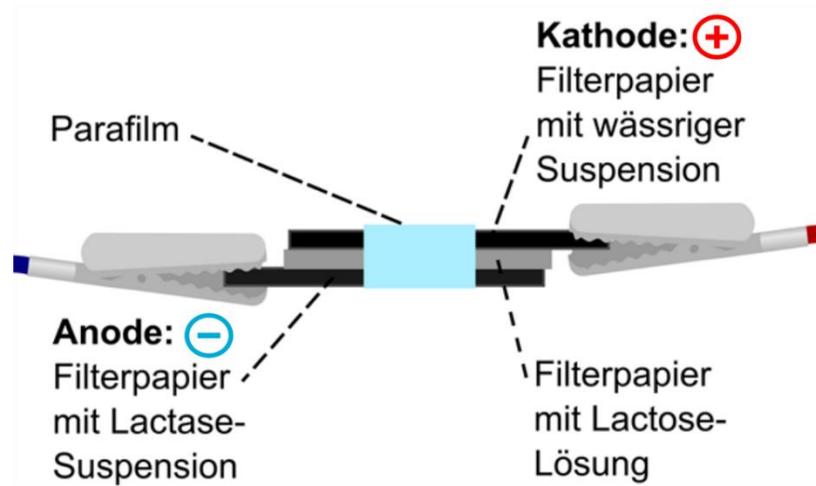
Parafilm

mit **Aktivkohle**, **Lactase** und **Natriumlaurylsulfat** beschichtetes Filterpapier

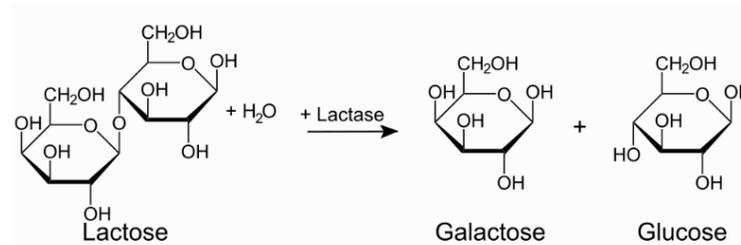
mit Aktivkohle und Natriumlaurylsulfat beschichtetes Filterpapier

mit **Lactose**-Lösung getränktes Filterpapier

# 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen



➤ Ablaufende Reaktionen?



# 3. Schulversuche zu biologischen Brennstoffzellen

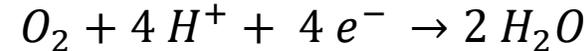
- Freisetzung von Protonen und Elektronen im Anodenraum
- im Kathodenraum wird Sauerstoff verbraucht

**Anode**

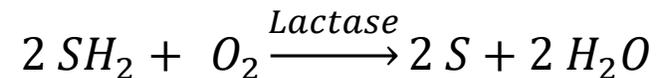


S fur Substrat

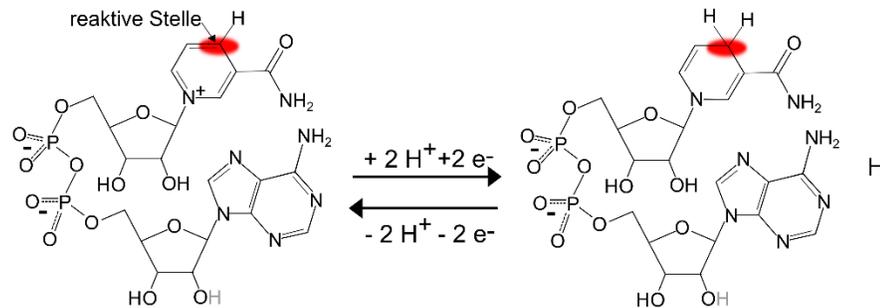
**Kathode**



**Gesamt**



**EET:**



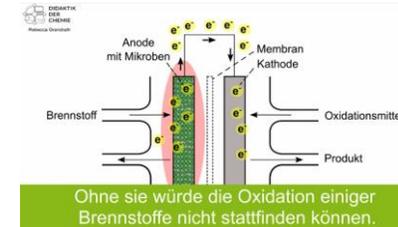
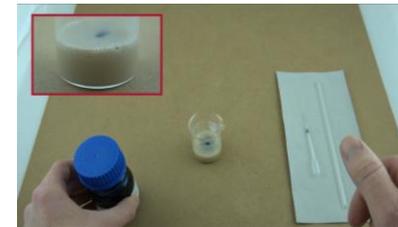
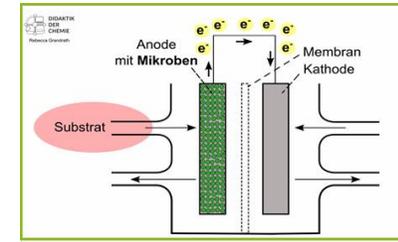
Belitz, Hans-Dieter; Grosch, Werner; Schieberle, Peter (2008): Lehrbuch der Lebensmittelchemie. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Kulbe, Klaus-Dieter (1988): Enzymtechnologie und nachwachsende Rohstoffe. Biotechnik. In: Nachr. Chem. Tech. Lab. 36 (6), S. 612–624.

Grandrath, Rebecca (2021): Brennstoffzell-Systeme mit Fokus auf biologischen Brennstoffzellen: Entwicklung und Optimierung von schulgeeigneten Experimenten, Konzepten und Medien. Dissertation. Bergische Universitat Wuppertal, Wuppertal.

# 4. Konzepte und Materialien

- **Entwicklung von experimentbasierten Konzepten**
  - Zielgruppen: (Primarstufe,) Sekundarstufe I und II, Lehrkräfte
  - schulische und außerschulische Settings
  
- **Erstellung von analogen und digitalen Materialien**
  - 13 Videos
  - sieben Skripte
  - zehn interaktive E-Books
  - sonstige Materialien
  
- **Erprobung und iterative Optimierung**



**Redox-Aktivität von Bäckerhefe**

**Materialien:**

- 25mL Bocherglas
- Glasstab
- Uhrglas
- Filterpapier
- Spatel
- Holzplatte
- Thermometer

**Chemikalien:**

- Trockenhefe
- dest. Wasser
- Saccharose (Haushaltszucker)
- Methylenblau-Lösung

**Durchführung:**

- a) Erstellen Sie unter kontinuierlichem Rühren eine Mischung aus 15 mL dest. Wasser und 1 g Saccharose.
- b) Geben Sie unter kontinuierlichem Rühren 2 g Saccharose zu der Mischung.
- c) Versetzen Sie die Mischung mit 2-3 Tropfen der Methylenblau-Lösung und fotografieren Sie die Farbgebung der Mischung.

**Beobachtung:**  
Notieren Sie die Temperatur. Tragen Sie ein, wie viele Minuten es zur Entfärbung gedauert hat.

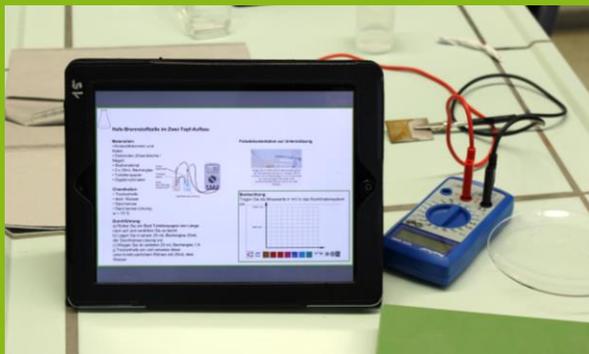
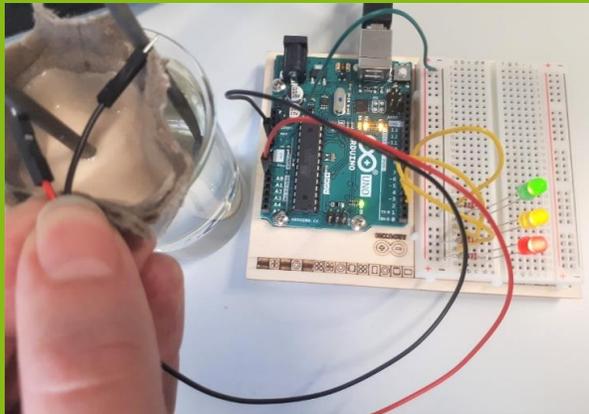
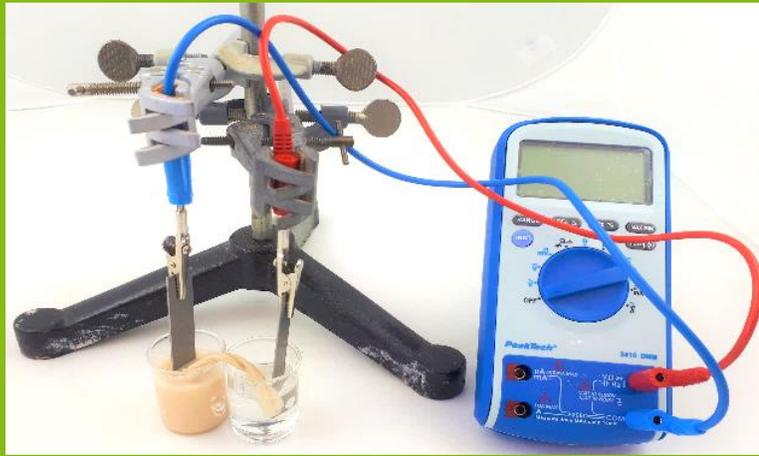
**Fotodokumentation zur Unterstützung**

Farbe: Sie sehen Suspension aus 1 g Bäckerhefe und 15 mL Wasser.

# 5. Fazit

---

- ✓ gesellschaftlich und schulisch relevantes Thema
- ✓ Vielzahl verschiedener Brennstoffzellensysteme
- ✓ Biologische Brennstoffzellen sind ein hochrelevantes Thema
- ✓ Lowcost Schulversuche
- ✓ adaptierbare Materialien sind frei verfügbar



VIELEN DANK FÜR  
IHRE  
AUFMERKSAMKEIT!

Dr. Rebecca Grandrath  
grandrath@uni-wuppertal.de

# Verwendete Literatur

- Kultusministerkonferenz (2020): Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020. Bonn, Berlin.
- UN General Assembly (21.10.2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1.
- Grandrath, Rebecca; Bohrmann-Linde, Claudia (2020): Fuel cells in the chemistry classroom – a brief survey among German chemistry teachers. In: ARiSE 1 (3), S. 13–16.
- Davis, Frank; Higson, Séamus P. J. (2007): Biofuel cells - recent advances and applications. In: Biosensors & bioelectronics 22 (7), S. 1224–1235.
- Kaiser, Patrick; Reich, Steffen; Leykam, Daniel; Willert-Porada, Monika; Greiner, Andreas; Freitag, Ruth (2017): Electrogenic single-species biocomposites as anodes for microbial fuel cells. In: Macromolecular Bioscience (17), S. 1–10.
- Kumar, Ravinder; Singh, Lakhveer; Zularisam, A. W.; Hai, Faisal I. (2018): Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology. A review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances. In: Int J Energy Res 42 (2), S. 369–394.
- Agler-Rosenbaum, Miriam; Schröder, Uwe; Harnisch, Falk (2013): Mikroben unter Strom. Von der Abwassertechnologie zur Bioelektrotechnologie. In: Biologie in unserer Zeit 43 (2), S. 96–103.
- Schröder, Uwe (2007): Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. In: Physical Chemistry Chemical Physics (9), S. 2619–2629.
- Rasmussen, Michelle; Abdellaoui, Sofiene; Minter, Shelley D. (2016): Enzymatic biofuel cells: 30 years of critical advancements. In: Biosensors & bioelectronics 76, S. 91–102.
- Cosnier, Serge; Le Goff, Alan; Holzinger, Michael (2014): Towards glucose biofuel cells implanted in human body for powering artificial organs: Review. In: Electrochemistry communications 38, S. 19–23.
- Grandrath, Rebecca; Bohrmann-Linde, Claudia (2022): Strom aus Bäckerhefe. In: Nachrichten aus der Chemie 70 (Juli | August), S. 18–21.
- Grandrath, Rebecca; Bohrmann-Linde, Claudia (2019): Die biologische Brennstoffzelle im Chemieunterricht - Einfache Experimente mit kostengünstigen Materialien. In: CHEMKON 26 (5), S. 196–202.
- Ge, Jun; Schirhagl, Romana; Zare, Richard N. (2011): Glucose-Driven Fuel Cell Constructed from Enzymes and Filter Paper. In: J. Chem. Educ. 88 (9), S. 1283–1286.
- Grandrath, Rebecca; Bohrmann-Linde, Claudia (2022): Entwicklung eines lowcost Experiments für den Chemieunterricht am Beispiel der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase. In: CHEMKON 29 (S1), S. 233–238.
- Grandrath, Rebecca; Bohrmann-Linde, Claudia (2023): Mit Lactase zum elektrischen Strom – enzymatische Brennstoffzelle auf Filterpapierbasis für den Chemieunterricht. In: CHEMKON 30 (1), S. 37–41.
- Grandrath, Rebecca (2021): Brennstoffzell-Systeme mit Fokus auf biologischen Brennstoffzellen: Entwicklung und Optimierung von schulgeeigneten Experimenten, Konzepten und Medien. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.

# Bildquellen

---

Sofern nicht anders angegeben, wurden im Vortrag eigene Abbildungen verwendet.

- [1] Visualisierung der Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen. <https://17ziele.de/downloads.html> (letzter Aufruf am 29.03.2023)
- [2] Geobacter metallireducens. <https://www.labroots.com/trending/microbiology/5830/microbe-geobacter> (letzter Aufruf am 29.03.2023)
- [3] Implanted biofuel cell in a Wistar rat. Cosnier, Serge; Le Goff, Alan; Holzinger, Michael (2014): Towards glucose biofuel cells implanted in human body for powering artificial organs: Review. In: Electrochemistry communications 38, S. 22.