



# Der Strom, der aus dem E-Feld kam

-

**Neuartige (Schul-)Versuche zur bipolaren Elektrochemie**



Dr. Dominik Quarthal

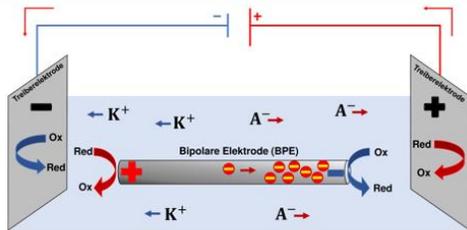
Prof. Dr. Marco Oetken



# Der Strom, der aus dem E-Feld kam



## Wissenschaftlicher Hintergrund



- „Eine **bipolare Elektrode (BPE)** ist ein elektrisch leitfähiges Objekt, an dessen äußeren **Enden elektrochemische Reaktionen** ablaufen, **ohne** dass ein **direkter Ohm'scher Kontakt** vorhanden sein muss.
- Es reicht, an eine Elektrolytlösung mit eingetauchter BPE eine Spannung anzulegen, und **ab einer bestimmten Potentialdifferenz** zwischen BPE und Lösung **laufen Oxidations- und Reduktionsreaktionen** ab.
- Somit können **neue Materialien** für **vielfältige Anwendungen** **kabellos** elektrolytisch **hergestellt** und auf ihre Eigenschaften hin überprüft werden.“

Fosdick, S. E., Knust, K. N., Scida, K., Crooks, R. M. (2013). Bipolare Elektrochemie. *Angew. Chem.* 125/40, 10632–10651

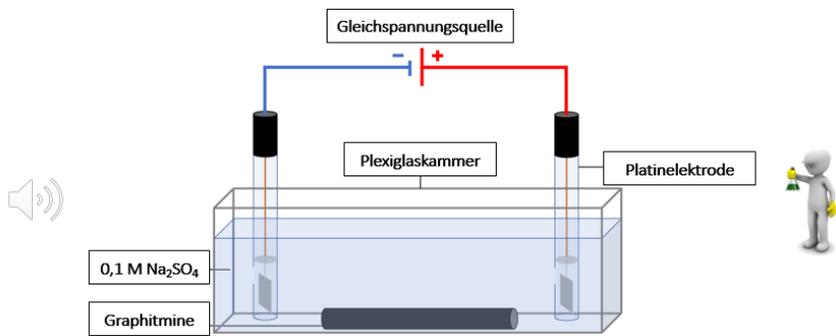


## Anwendungsgebiete

Bei der **Aktualität** und **vielfältigen Einsatzmöglichkeit** der **bipolaren Elektrochemie** stellt sich die Frage:

Wie kann man dieses **brandaktuelle Themenfeld** in die **Curricula** der **Schule** und **Hochschule** **experimentell** und **konzeptionell** mit möglichst einfachen Mitteln **implementieren**?

## Schulischer Einsatz / Experimenteller Teil

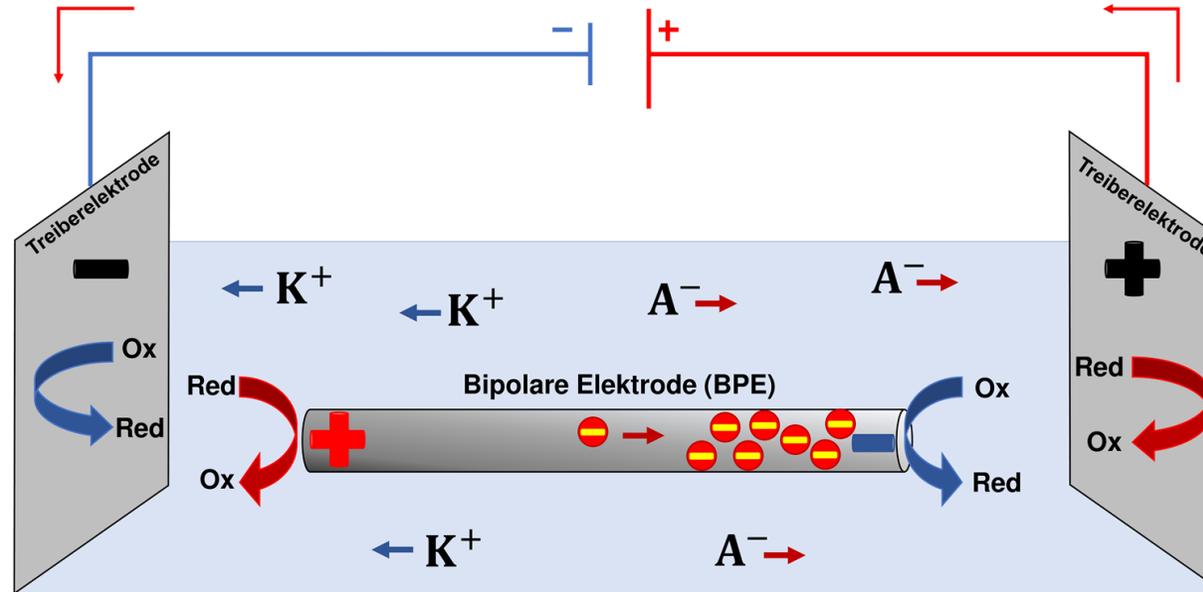


**Bipolare Wasserelektrolyse** im **microscale Maßstab**  
unter Verwendung einer **bipolaren Elektrode** auf **Kohlenstoffbasis**.

## Ausblick



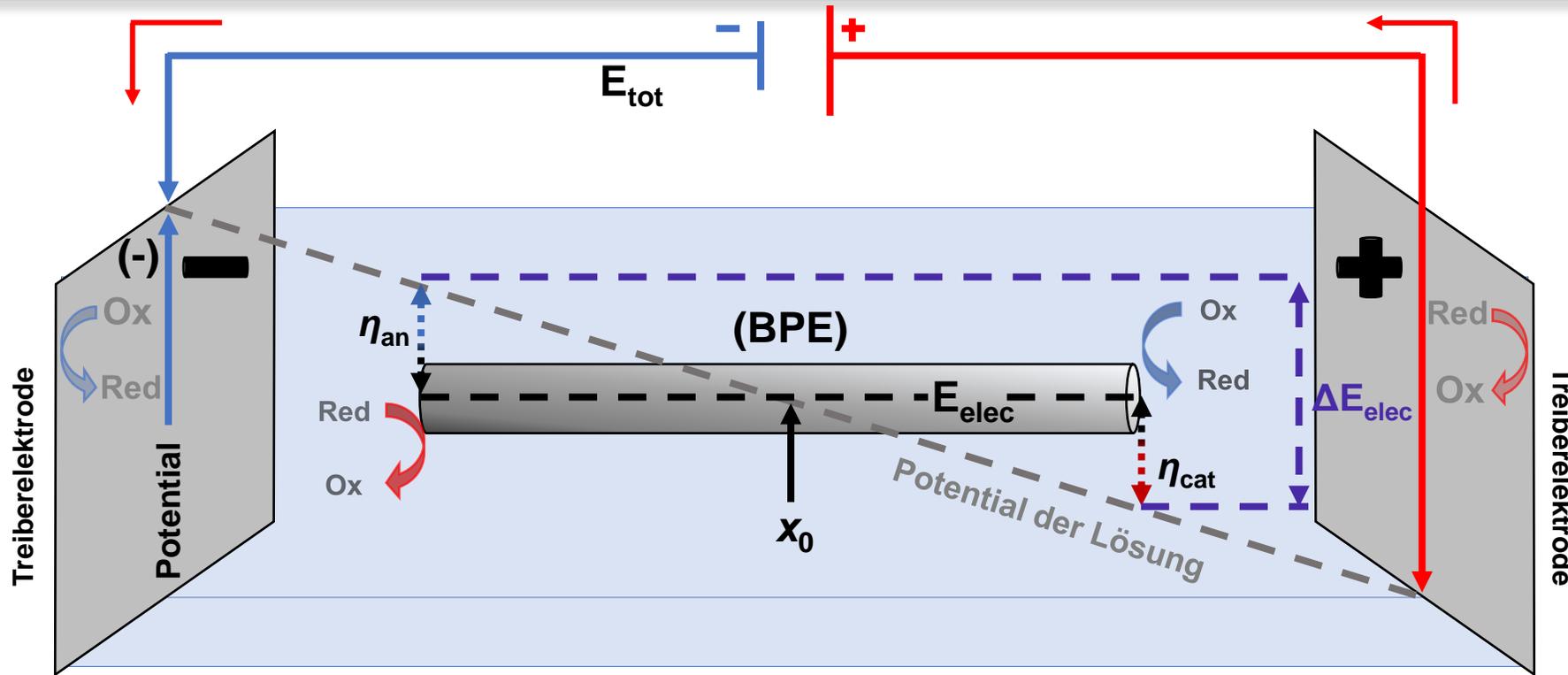
# Was ist eine **bipolare Elektrode (BPE)**?



- „Eine **bipolare Elektrode (BPE)** ist ein elektrisch leitfähiges Objekt, an dessen äußeren **Enden elektrochemische Reaktionen** ablaufen, **ohne** dass ein **direkter Ohm'scher Kontakt** vorhanden sein muss.
- Es reicht, an eine Elektrolytlösung mit eingetauchter BPE eine Spannung anzulegen, und **ab einer bestimmten Potentialdifferenz** zwischen BPE und Lösung **laufen Oxidations-** und **Reduktionsreaktionen** ab.
- Somit können **neue Materialien** für **vielfältige Anwendungen kabellos** elektrolytisch **hergestellt** und auf ihre Eigenschaften hin überprüft werden.“



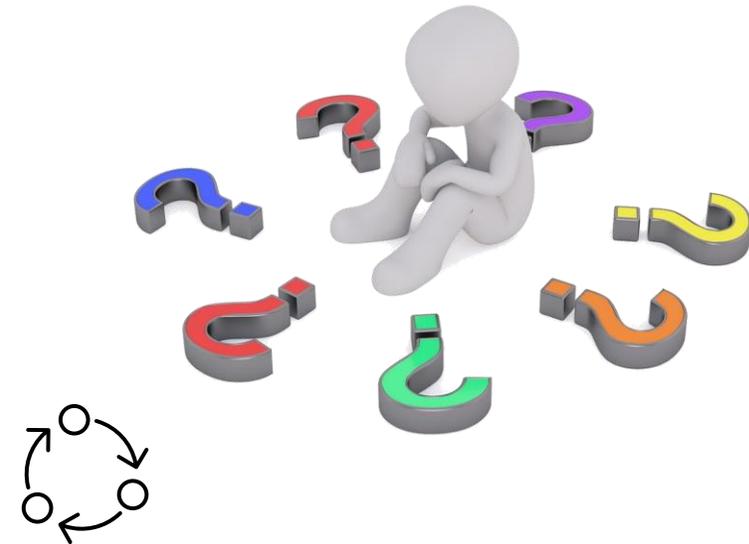
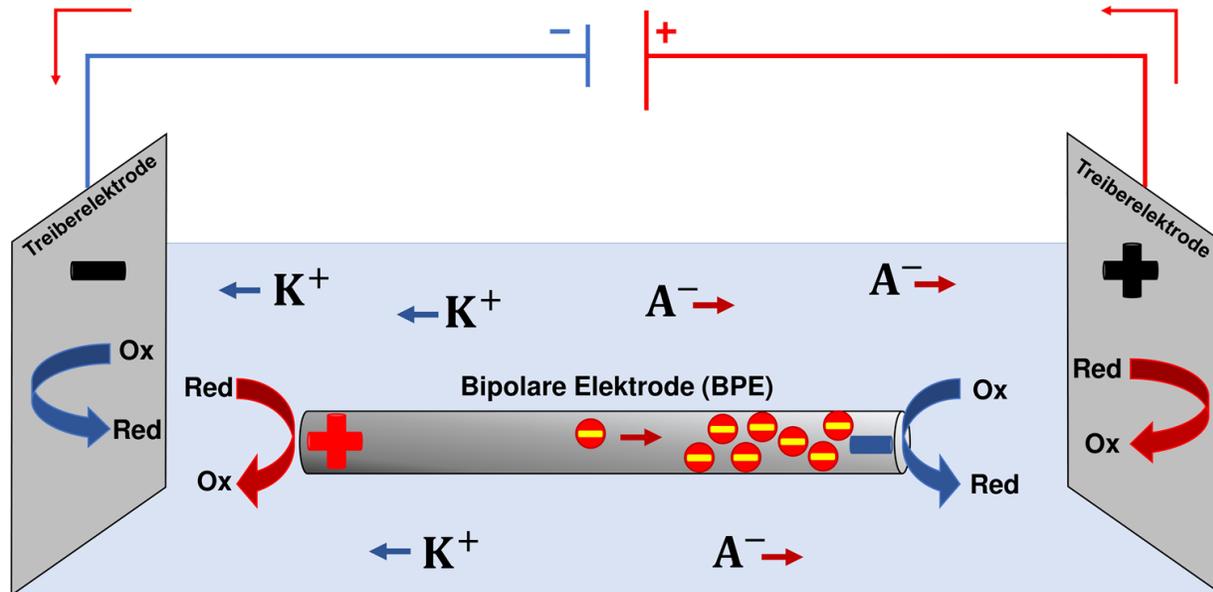
# Funktionsweise einer offenen bipolaren Elektrode



- Die Höhe des Überpotentials ( $\eta_{an}, \eta_{cat}$ ) ist nicht nur von der BPE-Fläche ( $A_{BPE}$ ) und dem Strom ( $I_{tot}$ ) abhängig, sondern auch von der Elektrolytenkonzentration ( $C$ ), der Diffusionskoeffizienten ( $D$ ) und der Elektrodenabstände ( $L$ ).
- Die Elektrolytenkonzentration ( $C$ ) und die Diffusionskoeffizienten ( $D$ ) sind in der Regel konstant, während die Elektrodenabstände ( $L$ ) sich BPE-richtig von der Elektrolytenkonzentration ( $C$ ) und der Diffusionskoeffizienten ( $D$ ) unabhängig sind.
- Die Elektrolytenkonzentration ( $C$ ) und die Diffusionskoeffizienten ( $D$ ) sind in der Regel konstant, während die Elektrodenabstände ( $L$ ) sich BPE-richtig von der Elektrolytenkonzentration ( $C$ ) und der Diffusionskoeffizienten ( $D$ ) unabhängig sind.
- Das nunmehr an den Polen der BPE resultierende anliegende sogenannte **Überpotential** ( $\eta_{an}, \eta_{cat}$ ) ist die **Ursache** für mögliche dort ablaufende **elektrochemische Prozesse** (Oxidation, Reduktion).



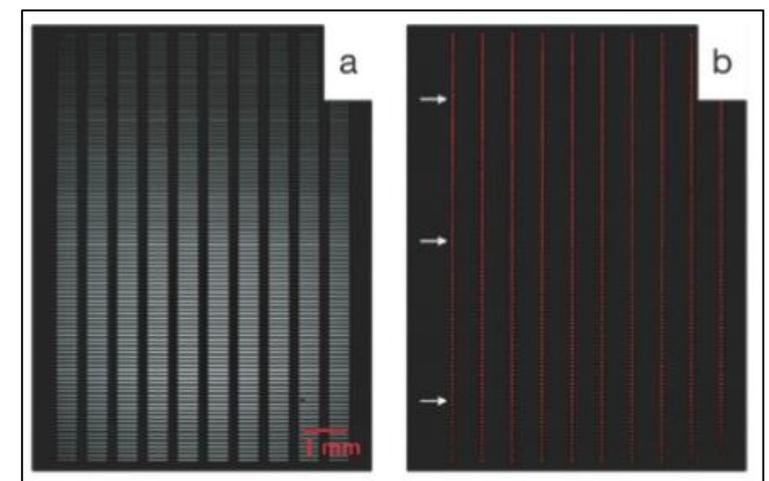
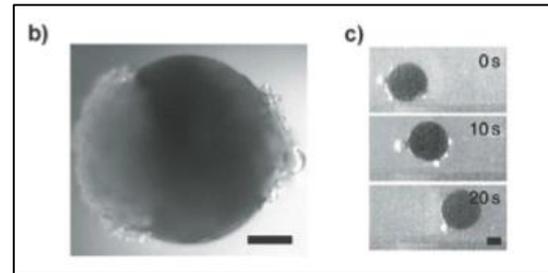
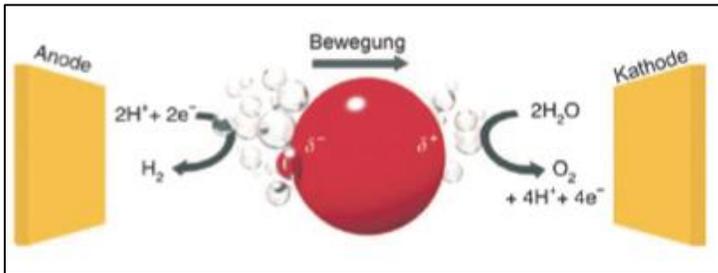
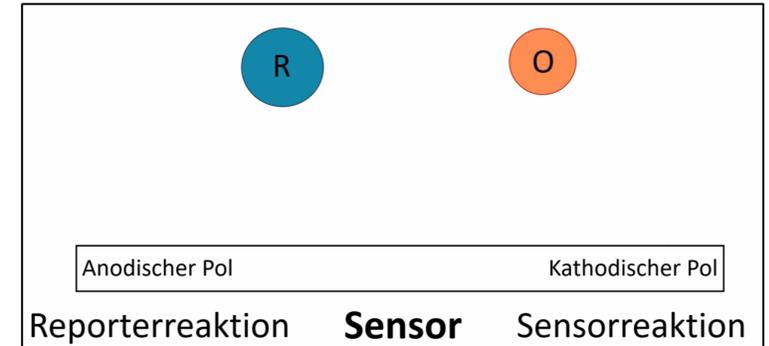
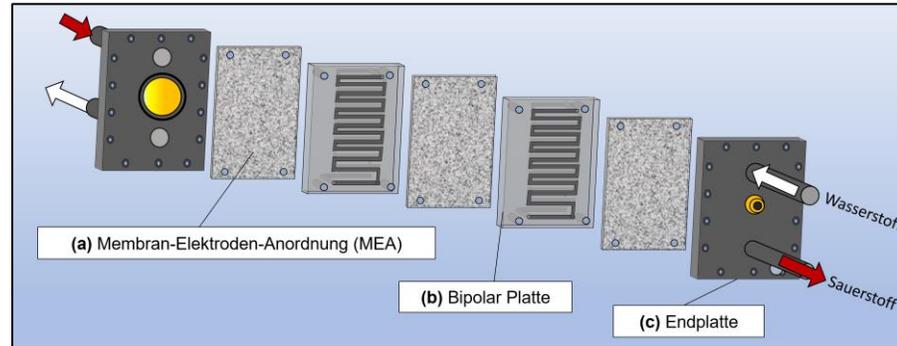
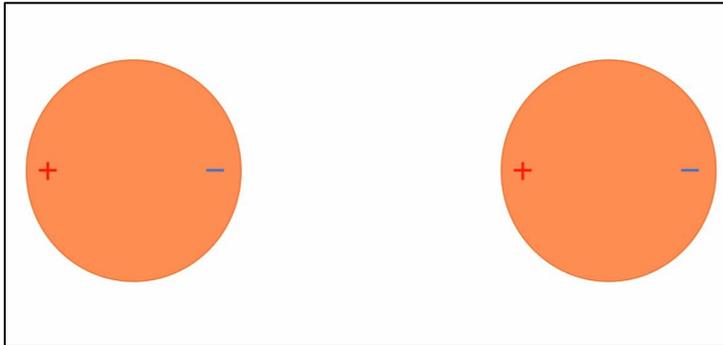
# Spannende **Anwendungsfelder** der bipolaren Elektrochemie



„ ...Somit können **neue Materialien** für **vielfältige Anwendungen** kabellos elektrolytisch **hergestellt** und auf ihre Eigenschaften hin überprüft werden.“



# Bipolare Elektrochemie für den Schulunterricht



Bei der **Aktualität** und **vielfältigen Einsatzmöglichkeit** der **bipolaren Elektrochemie** stellt sich die Frage:

Wie kann man dieses **brandaktuelle Themenfeld** in die **Curricula** der **Schule** und **Hochschule** **experimentell** und **konzeptionell** mit möglichst einfachen Mitteln **implementieren**?





# Bipolare Elektrochemie für den Schulunterricht



Die **einzig**e uns bekannte **Arbeit** zu diesem Themenfeld für den Schulunterricht ist bislang von **Prof. Dr. Klemens Koch**.

“Koch, K. (2020). Ions and electric current in bipolar water electrolysis. **CHEMKON 27/2**, 92–95.”



Wir wollen **auf diesem Beitrag aufbauen** und **weitere spannende Phänomene** aus dem Bereich der **bipolaren Elektrochemie aufzeigen** und **beginnen mit dem Grundversuch.**

## DAS EXPERIMENT

DOI: 10.1002/clon.201900003



### Ionen und elektrischer Strom bei einer Bipol-Wasserelektrolyse

Klemens Koch<sup>1,4</sup>

**Zusammenfassung:** Ionen sind schwierig zu verstehen. Wie verhalten sie sich in Wasser? Wie fließt elektrischer Strom durch eine Salzlösung und was passiert an den Elektroden? Eine einfache, überraschende und ästhetische Version der Wasserelektrolyse wird vorgestellt. Darin zeigt ein Universalindikator die Reaktionen an den Elektroden und ihre Stöchiometrie. Eine Bipolelektrode und zwei Elektrolysen in Serie führen zu neuen Einsichten.

**Schlüsselwörter:** Bipolelektrolyse · Wasserelektrolyse mit Säure/Base-Nebenprodukten · Kupferaffination an einem Bipoldraht · LED-Anschluss über Elektrolytlösung

#### Ions and electric current in bipolar water electrolysis

**Abstract:** Ions are difficult to understand. How do they behave in water? How is electric current passing a salt solution and what happens at the electrodes? A simple, surprising and aesthetic version of water electrolysis is presented, visualizing the reactions at the electrodes and their stoichiometry with a universal indicator. With a bipolar electrode and two electrolyses in series, this leads to new insights.

**Keywords:** bipolar electrolysis · acid/base-reactions in water electrolysis · copper refining on a bipolar wire · LED connected through an electrolyte

Die Elektrolyse von Wasser mit ihrer grossen konzeptionellen, didaktischen und praktischen Bedeutung ist in jedem Chemielerngang vertreten: Sie zeigt, dass Wasser eine Verbindung ist und entgegen der häufigen, alltäglichen Zuordnung kein Element, sie gibt einen Hinweis auf die Verhältnisformel und zeigt, dass Wasserstoff etwas anderes ist als Wasserdampf beim Sieden von Wasser. So gibt es neben der klassischen Variante in der Hofmann-Zersetzungsvorrichtung viele Varianten, welche den einen oder anderen Aspekt besser sichtbar machen oder die Elektrolyse im Schülervermoch ermöglichen. Die hier vorgestellte, auf die Schulsituation und einen Schülerversuch übertragene Variante der wissenschaftlich-technischen Versuche von K. Knust [2], [3] stellt nicht Wasserstoff und Sauerstoff ins Zentrum, sondern einerseits die Säure/Base-**«Nebenprodukte»** Wasserstoffatomen und Hydroxidationen mit der Stöchiometrie dazu (Ladungs- & Massenerhaltung) und andererseits die elektrische Leitung in Elektroden und Elektrolyten mit der Spannungsverteilung. In zwei Folgeversuchen werden die daraus abgeleiteten Erkenntnisse durch den Betrieb einer LED **«in Lösung»** und durch die elektrolytische Raffination von Kupfer vertieft.

### 2. Versuche zur einfachen Wasserelektrolyse und Bipol-Wasserelektrolyse

#### 2.1 Geräte und Chemikalien

Petrischalen (Polystyrol, Durchmesser 9 cm), Universalindikator Merck, Natriumsulfat, Kupfersulfat-Pentahydrat, Carbon(faser-)stäbe (zum Drachenbau, z.B. von Conrad Electronic, Durchmesser z. B. 1,5 mm), Heißklein, Kupferdrahtstücke (Durchmesser ca. 1 mm), LED, Netzgerät (bis 18 V) oder zwei 9 V-Batterien in Serie. Bei Experiment 1 genügen auch geringere Spannungen von 4–9 V.  
Elektrolyse A für die Experimente 1–3: Natriumsulfatlösung (c(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)=0,1 mol/L), mit Universalindikator. Die Lösung wird mit (kalkhaltigem) Leitungswasser (oder stark verdünnter Natriumhydrogencarbonat-Lösung) neutral eingestellt, bis sie grün ist.  
Elektrolyse B mit Kupfersulfat für das Experiment 4: Natriumsulfat/Kupfersulfat-Lösung c(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)=0,1 mol/L, c(CuSO<sub>4</sub>)=0,2 mol/L.  
Elektrolyse C für das Experiment 5: Natriumsulfatlösung-Lösung c(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)=0,01 mol/L.  
Bei allen Lösungen kann Natriumsulfat als Elektrolyt durch Kaliumnitrat oder andere, bei der Elektrolyse inaktive Salze ersetzt werden. Als Universalindikator kann auch Blaukohlsäure verwendet werden. Er zeigt wunderschöne Farben und führt mit den darin vorhandenen Tensiden zu etwas Schaumbildung an den Elektroden. Das zeigt, wo Wasserstoffgas und Sauerstoffgas entstehen.

#### 2.2 Apparatur

Die einfache Apparatur (Abb. 1) kann selbst hergestellt oder beim Shop des Vereins Schweizerischer Naturwissenschaftslehrerinnen und -lehrer (VSN) [4] bezogen werden: Aus

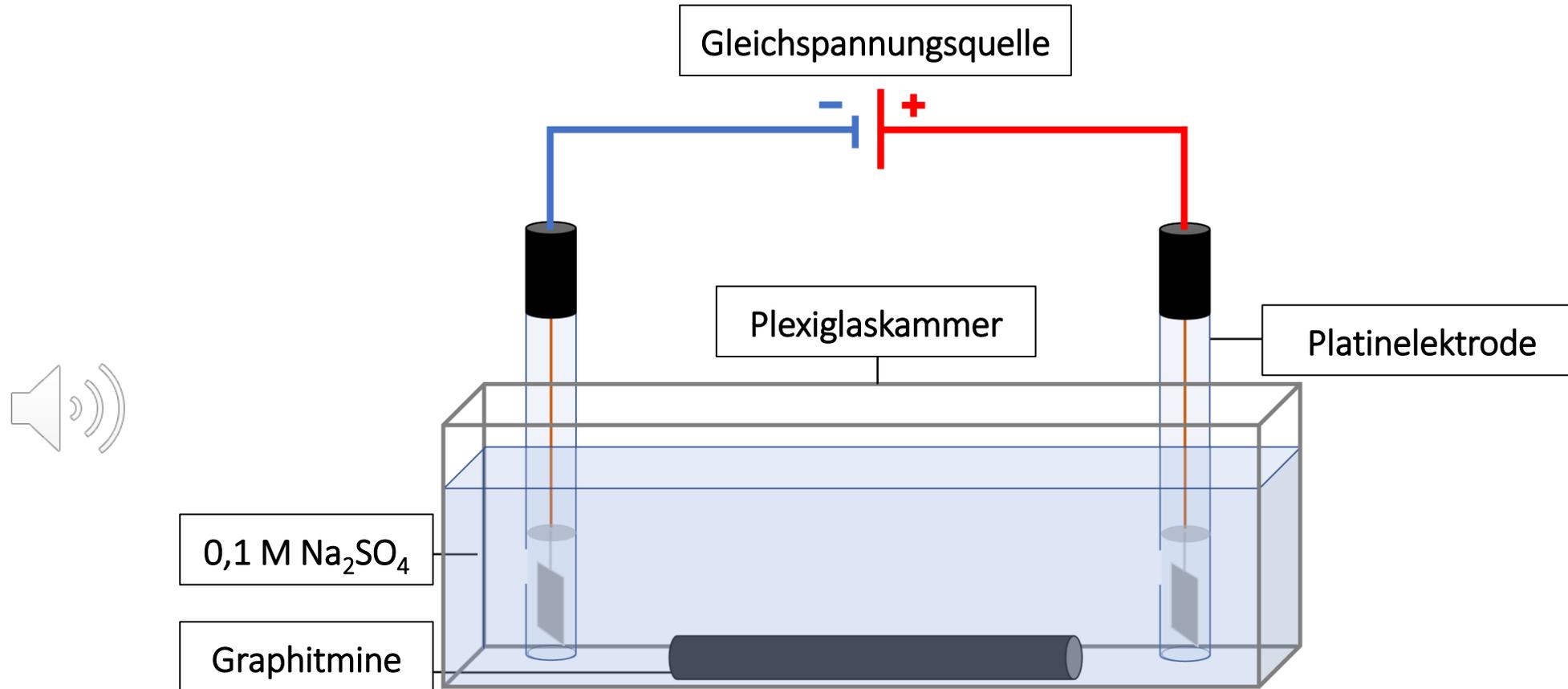
#### 1. Einleitung

Ionen gehören mit ihren Bindungs- und Migrationserscheinungen zu den schwierigeren Konzepten im Chemieunterricht. Faraday hat den Begriff **«Ion»** (und auch die Begriffe **«Anode»**, **«Kathode»**, **«Anion»** und **«Kation»**), beraten durch seinen Freund W. Whewell, geprägt: Er bedeutet **«wandernd»**. In der Ausgabe 7/2018 von CHEMKON wurde dieses **«Wandern»** anschaulich mit Permanganationen [1] gezeigt. Das Experiment kann auch in der unten beschriebenen Elektrolyseapparatur in einer Petrischale und zwei mit Heissklein angeklebten Carbonstäben sehr einfach durchgeführt werden. Die umgekehrte Wanderung von Kupfer(II)kationen bzw. ihrem Aqualokomplex kann nach Auflösen eines Kupfersulfatpentahydrat-Kristalls gezeigt werden (Experiment 5): Die nur schwach färbenden Kupfer(II)spezies sind zueinander kaum mehr sichtbar, erscheinen aber am Schluss als Kupferhydroxid-Suspension wieder deutlich an der Kathode. Dazu müssen die an der Kathode bei der Wasserelektrolyse entstehenden Hydroxidationen mitberücksichtigt werden. Wie oft in der Wissenschaft ruft ein überraschendes Resultat nach einer vertieften Betrachtung, was im Folgenden passieren soll.

<sup>4</sup> Prof. Dr. K. Koch, Pädagogische Hochschule Bern, Institut Sekundarstufe II, Fabrikstrasse 8, CH-3012 Bern, Schweiz, \* E-Mail: klemens.koch@phbern.ch



# Eine **bipolare** Wasserelektrolyse im **Schulversuch**



**Bipolare Wasserelektrolyse** im **microscale** Maßstab

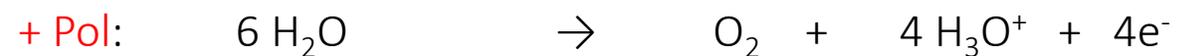
unter Verwendung einer **bipolaren Elektrode** auf **Kohlenstoffbasis**.



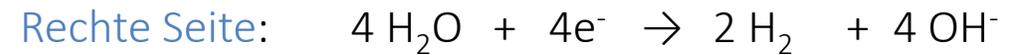
# Eine **bipolare** Wasserelektrolyse im **Schulversuch**



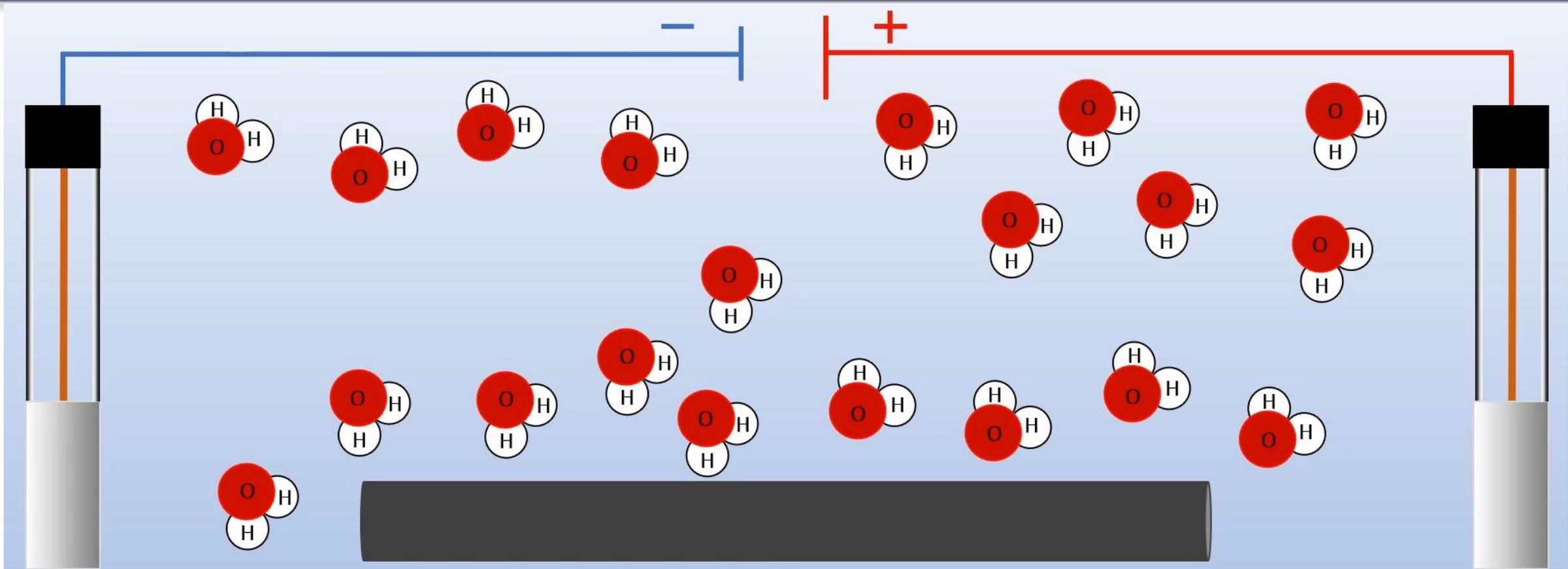
## Treiberelektroden (Platin):



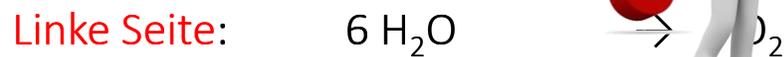
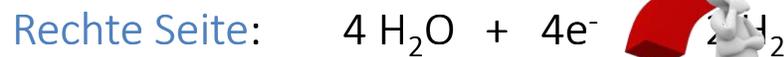
## Bipolare Elektrode (Graphit):



# Funktionsweise einer offenen bipolaren Elektrode auf der Teilchenebene



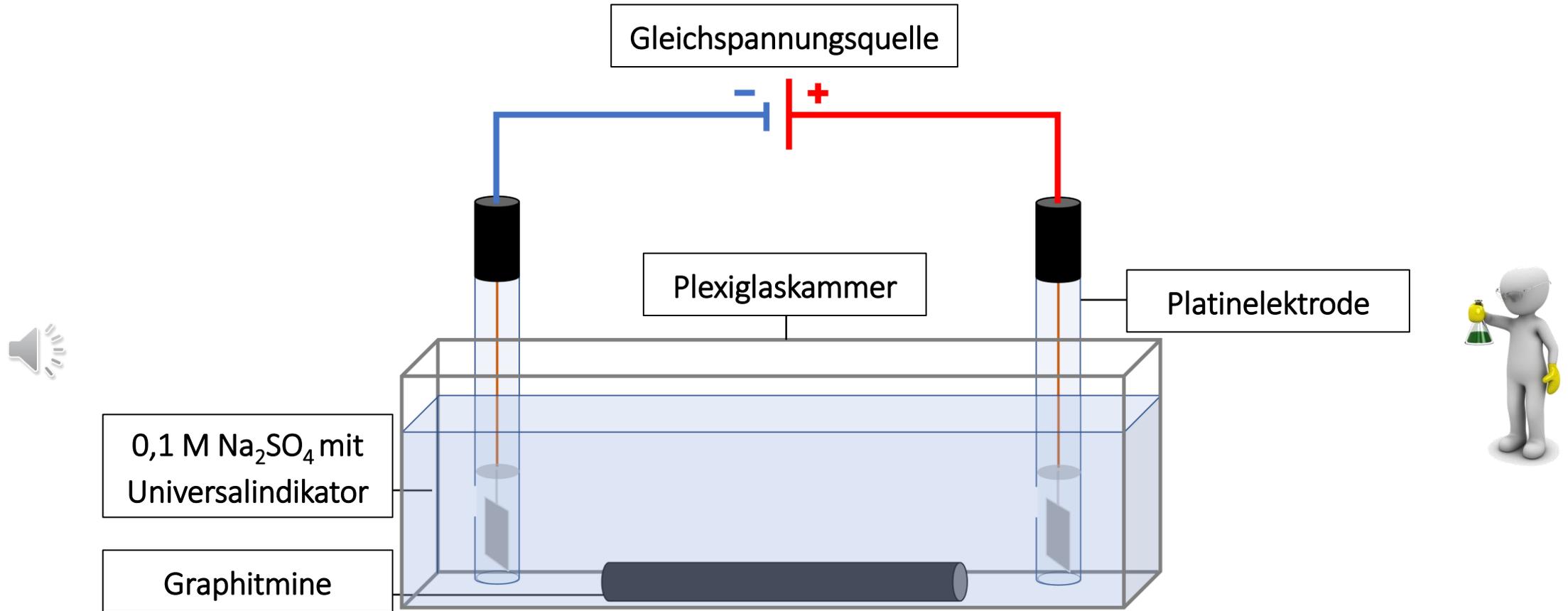
## Bipolare Elektrode (Graphit):



A 3D white figure stands next to a large red question mark. A blue magnifying glass is positioned over the chemical species  $4 \text{OH}^-$  and  $4 \text{H}_3\text{O}^+$ , with  $4\text{e}^-$  also visible nearby.



# Indirekter Nachweis der Gase per Universalindikator

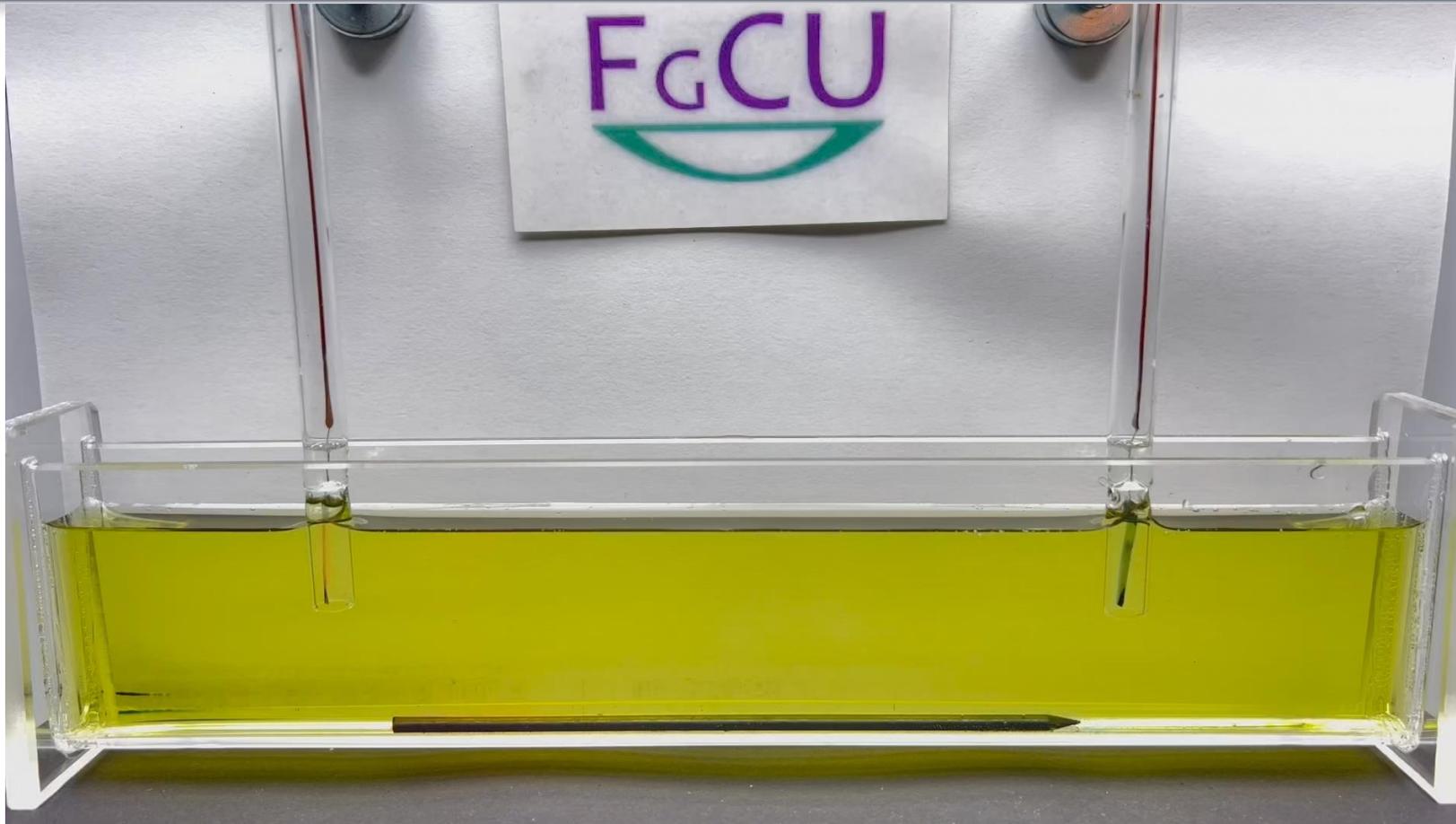


**Bipolare Wasserelektrolyse** im **microscale** Maßstab

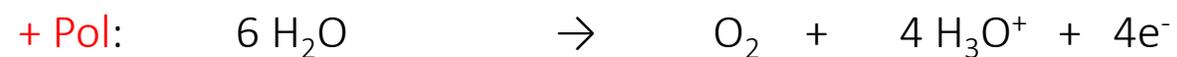
unter Verwendung einer **bipolaren Elektrode** auf **Kohlenstoffbasis**.



# Indirekter Nachweis der Gase per Universalindikator



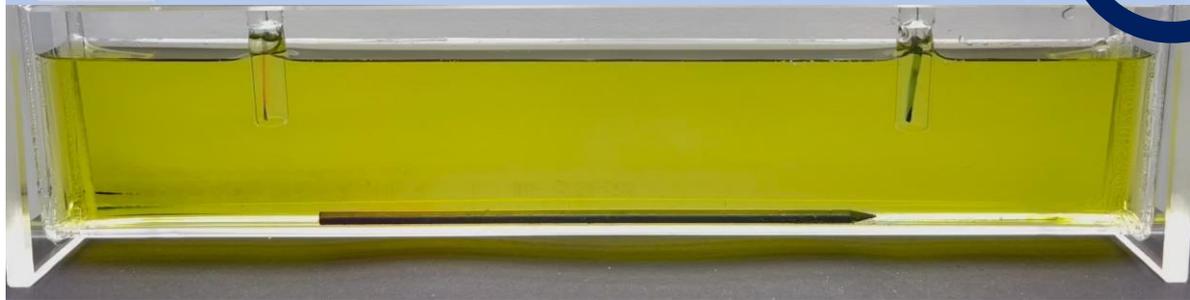
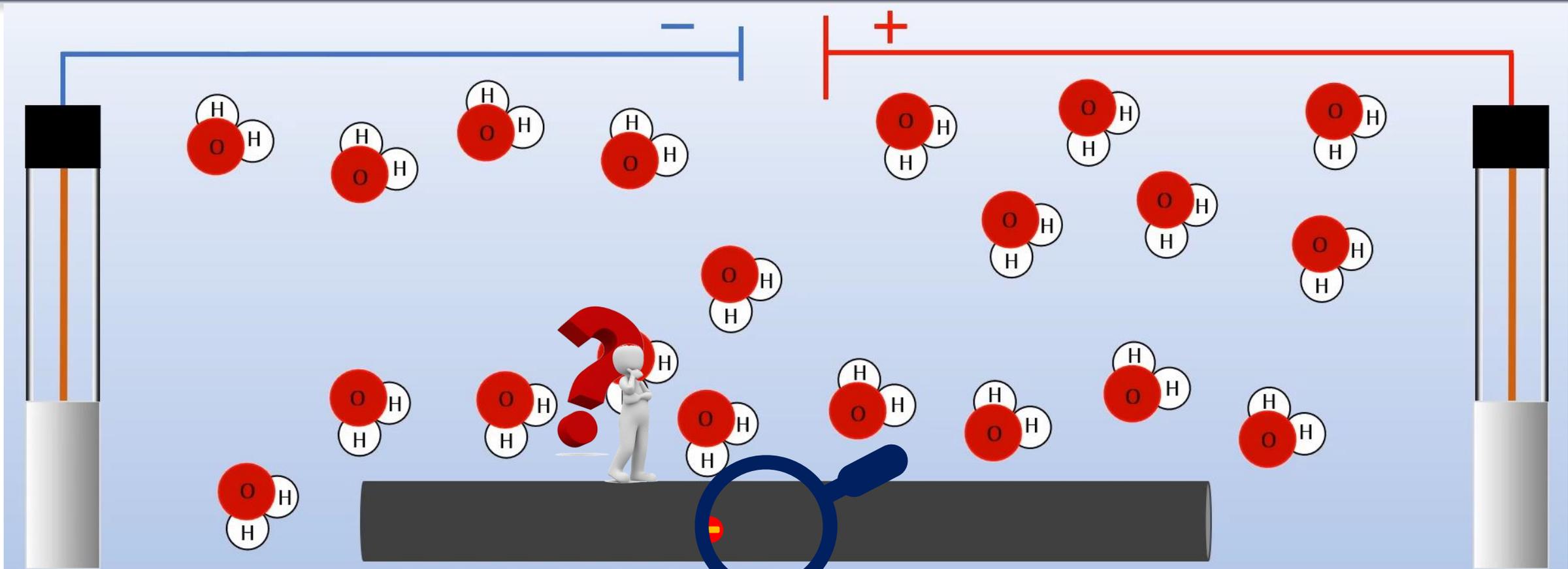
## Treiberelektroden (Platin):



## Bipolare Elektrode (Graphit):



# Funktionsweise einer offenen bipolaren Elektrode auf der Teilchenebene

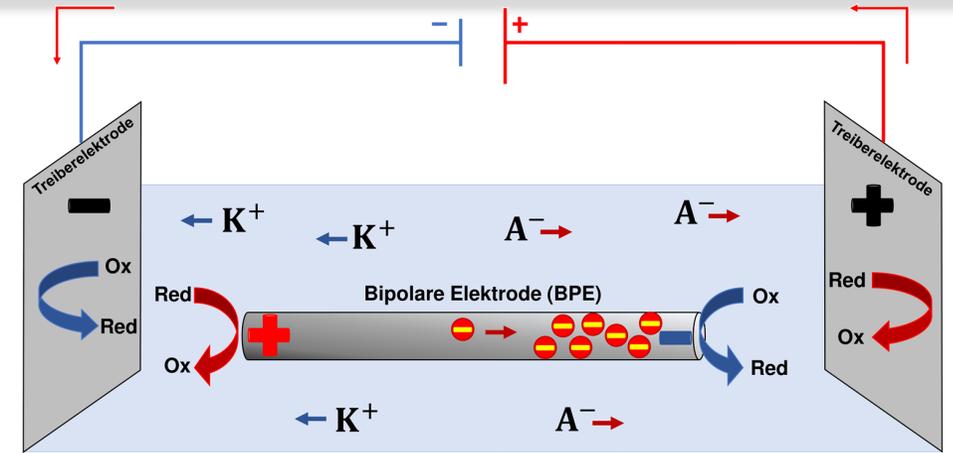
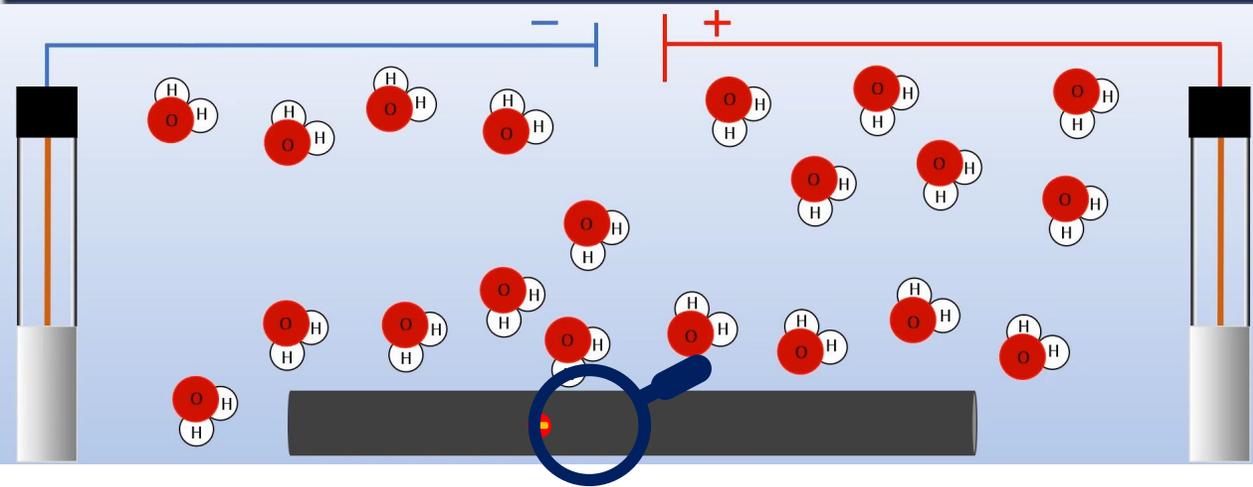


## Bipolare Elektrode (Graphit):





# Bipolare Elektrochemie für den Schulunterricht



Wie lässt sich die **Elektronenverschiebung** für Schülerinnen und Schüler **erklären**?

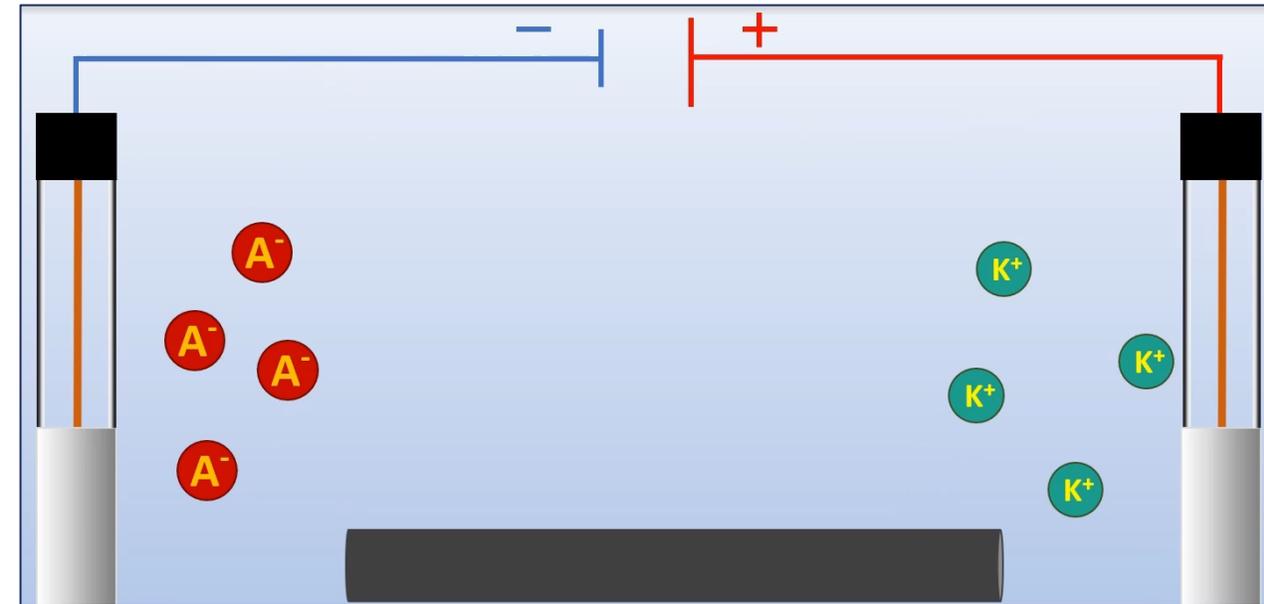
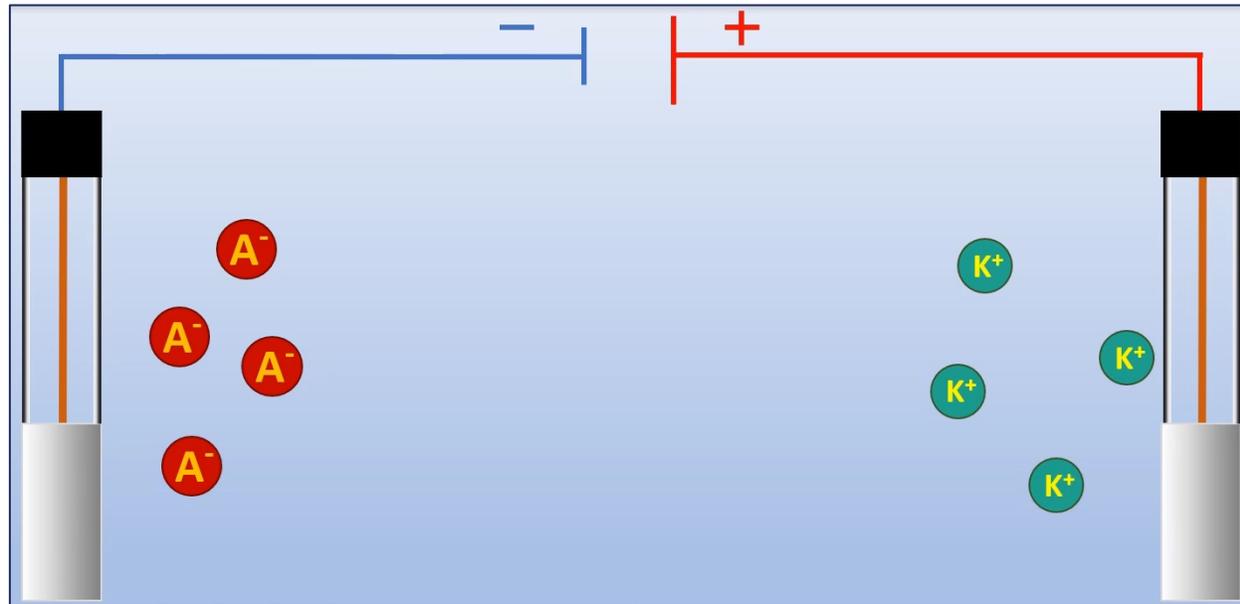


Es wird daher ein völlig neuer, einfacher **Erklärungsansatz** benötigt, der am Wissensstand der Schülerinnen und Schüler anknüpft und **eine Implementierung** dieses spannenden Themenfeldes **ermöglicht**.





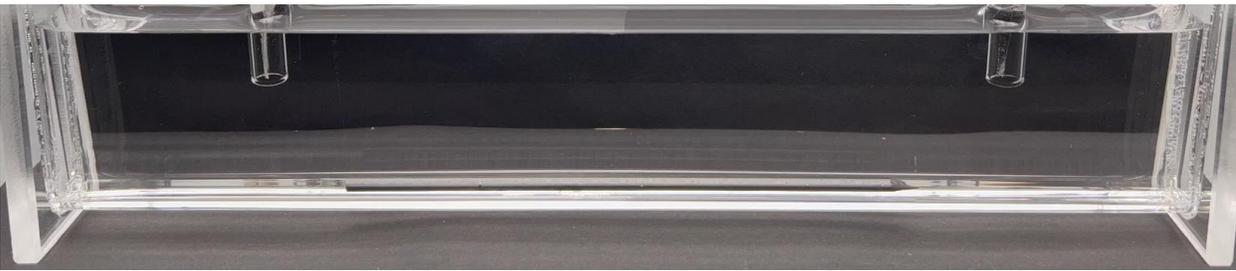
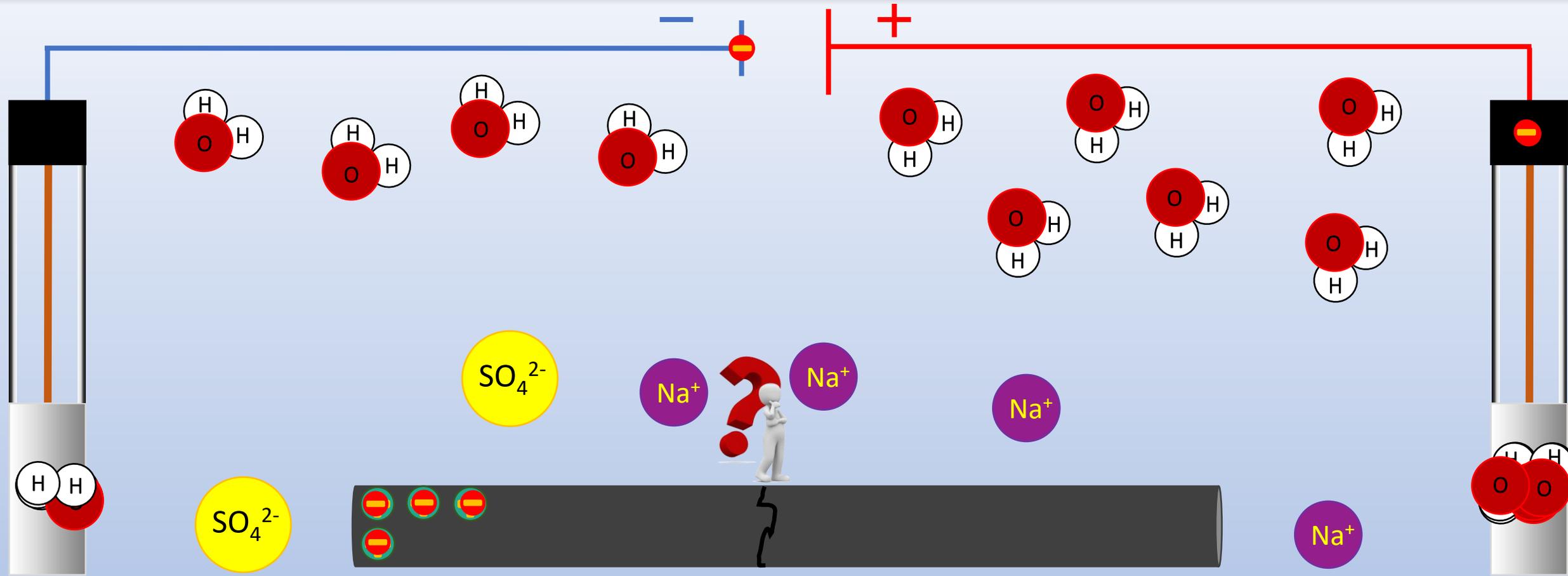
# Die zentrale **Idee**:



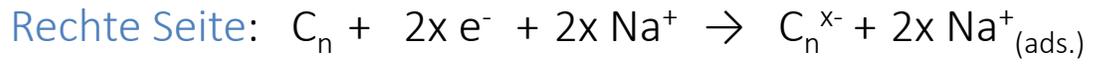
- Negative Ladungen werden vom **- Pol** abgestoßen und vom **+ Pol** angezogen.
- Auf dieser Grundlage soll die **Erklärung** der Oxidation- bzw. Reduktion an der BPE **vereinfacht werden**.



# Funktionsweise einer offenen bipolaren Elektrode auf der Teilchenebene

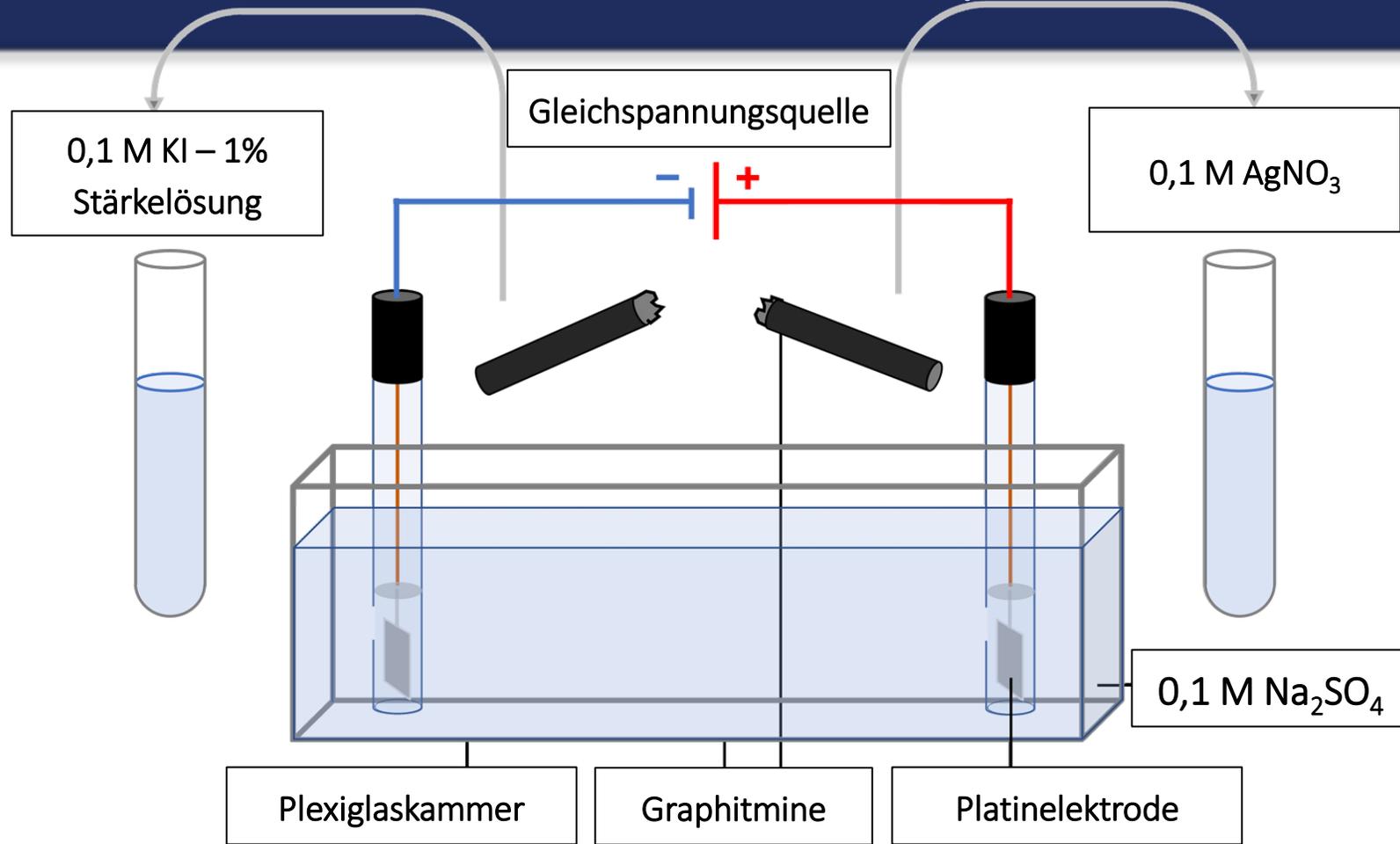


## Bipolare Elektrode (Graphit):





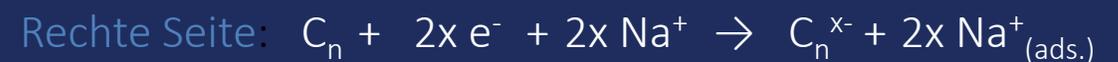
# Nachweis der Polarisierung der bipolaren Elektrode



## Treiberelektroden (Platin):

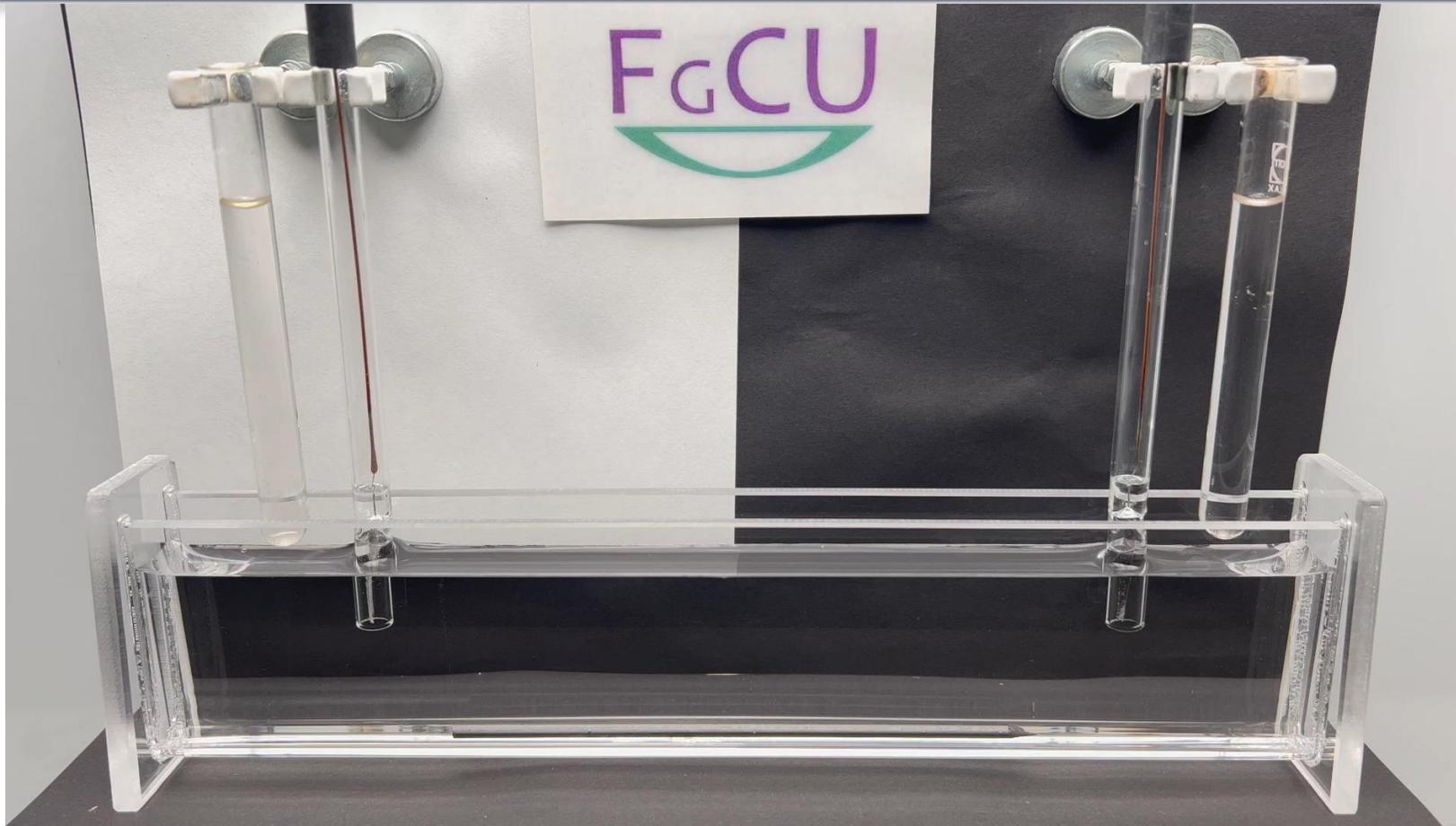


## Bipolare Elektrode (Graphit):

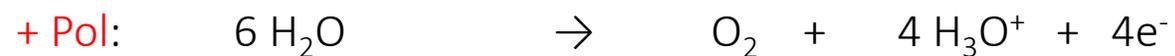




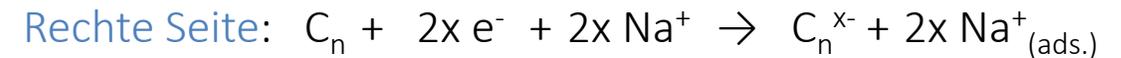
# Nachweis der Polarisation der bipolaren Elektrode



## Treiberelektroden (Platin):

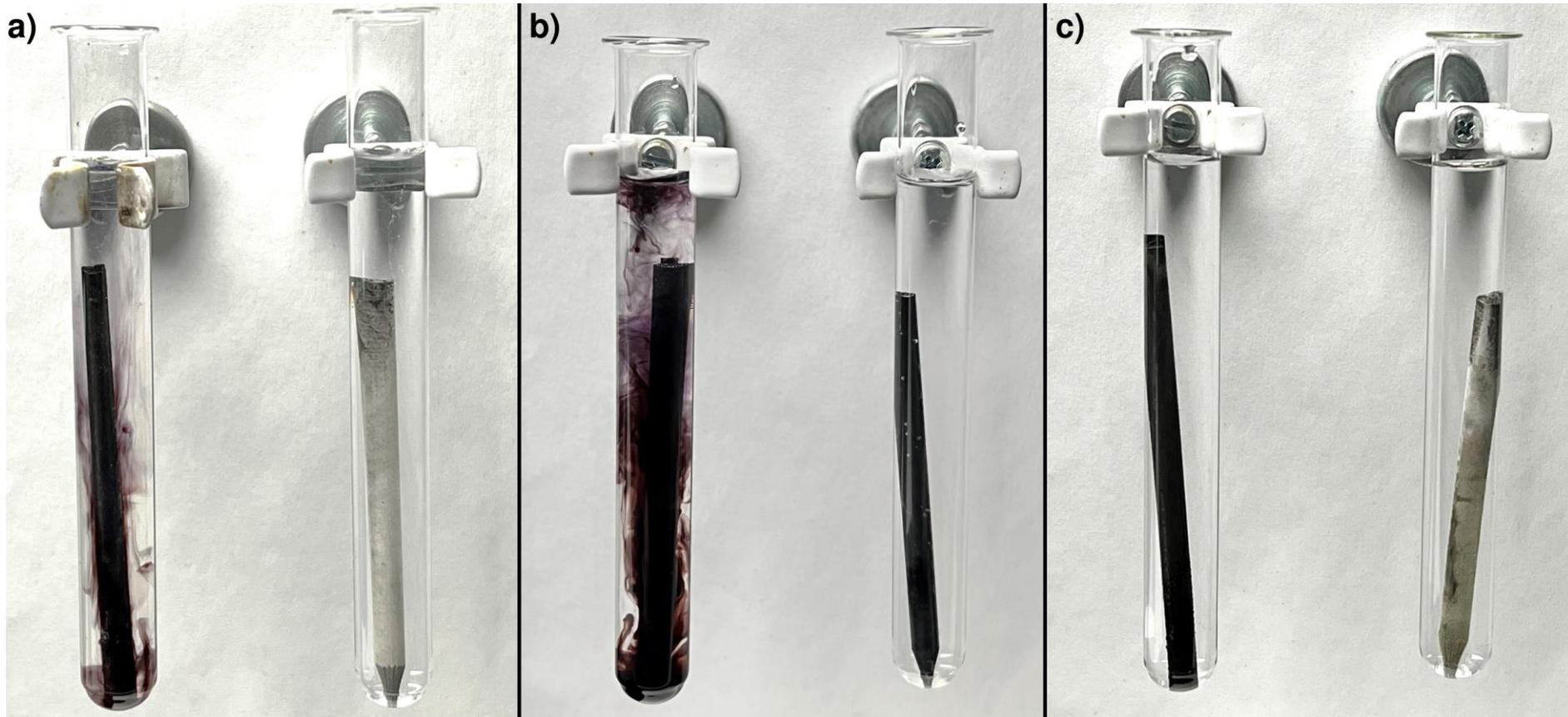


## Bipolare Elektrode (Graphit):

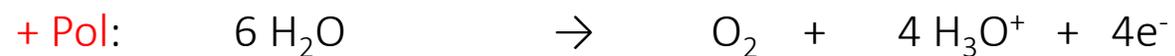




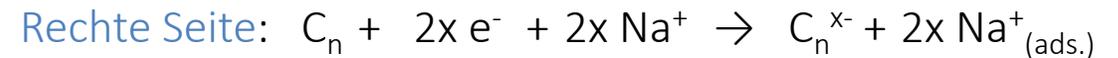
# Nachweis der Polarisierung der bipolaren Elektrode

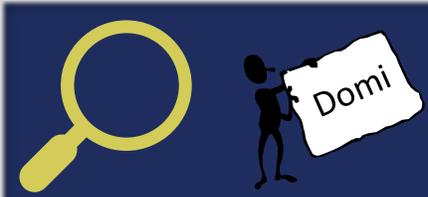


## Treiberelektroden (Platin):

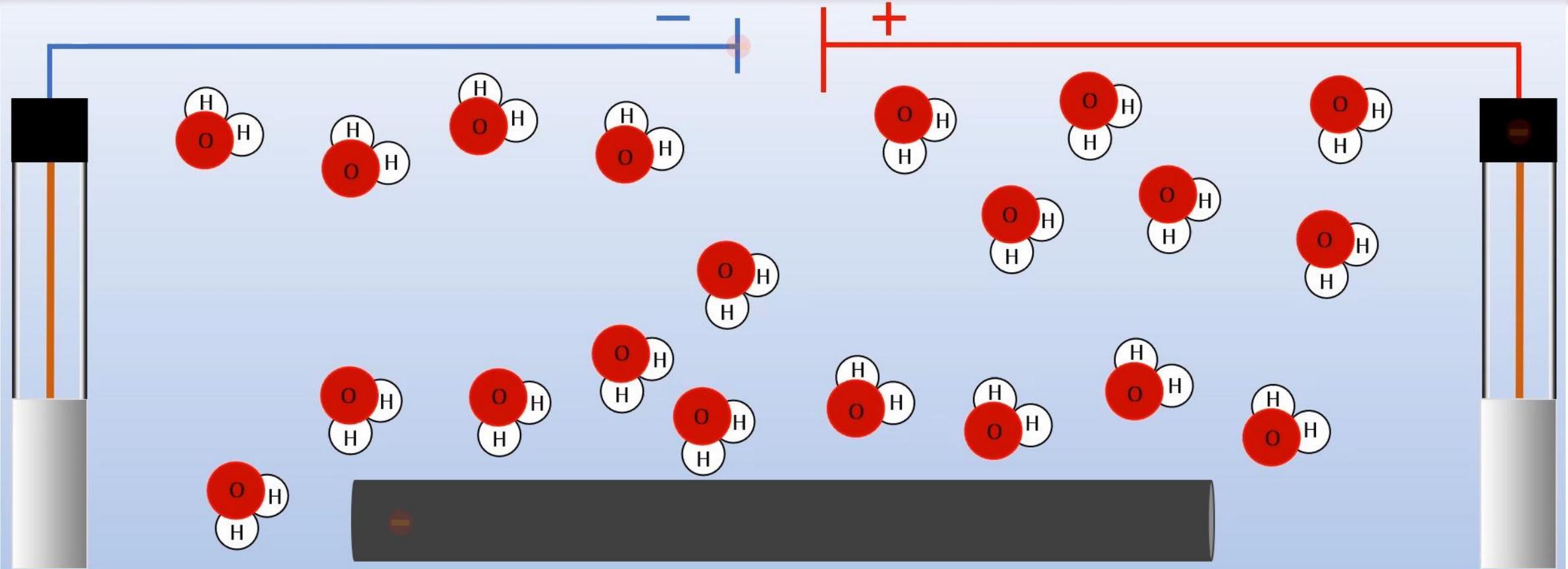


## Bipolare Elektrode (Graphit):





# Funktionsweise einer offenen bipolaren Elektrode auf der Teilchenebene



Ist es möglich, dass **an den Enden** der BPE für uns nicht wahrnehmbarer **Wasserstoff / Sauerstoff** in statu nascendi entstanden ist?

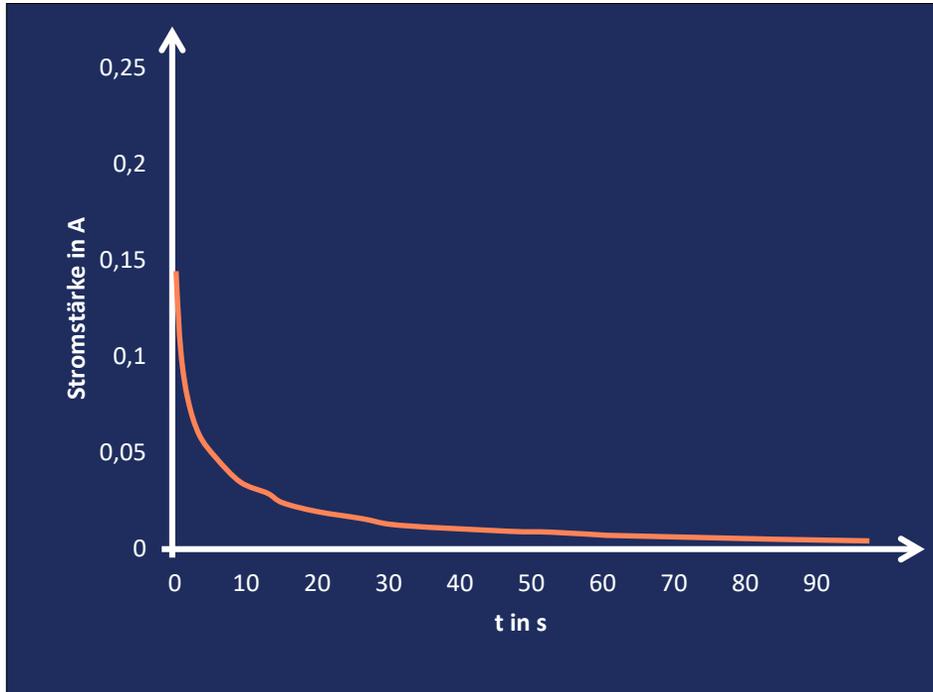




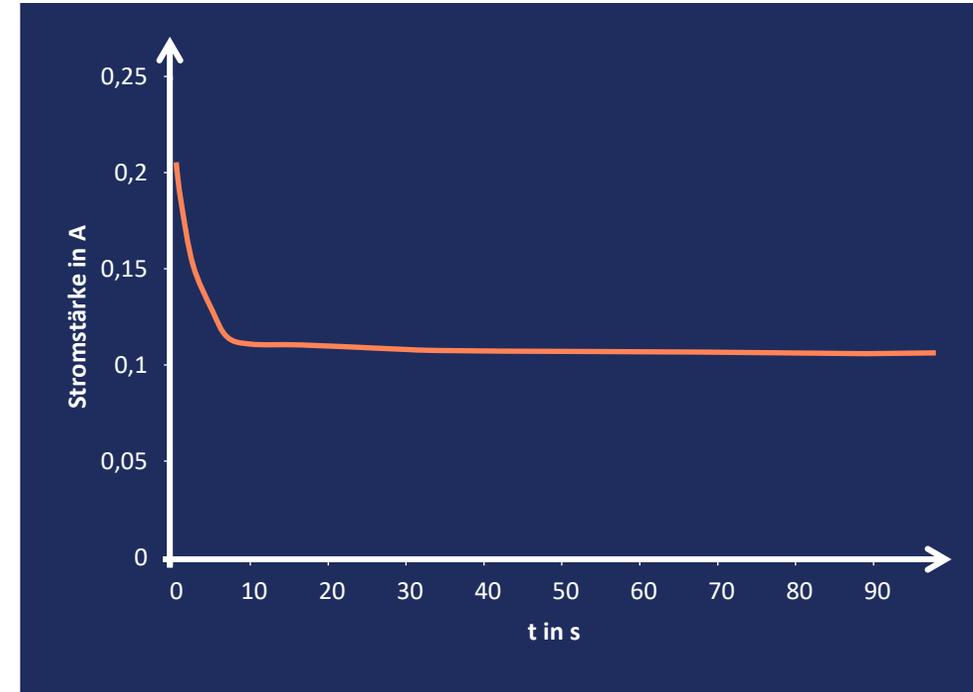
# Vergleich: Kapazitive Effekte vs. Faraday'sche Prozesse



## Stromverlauf Ladevorgang **Superkondensator**



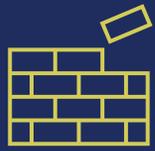
## Stromverlauf **Elektrolyse H<sub>2</sub>O**



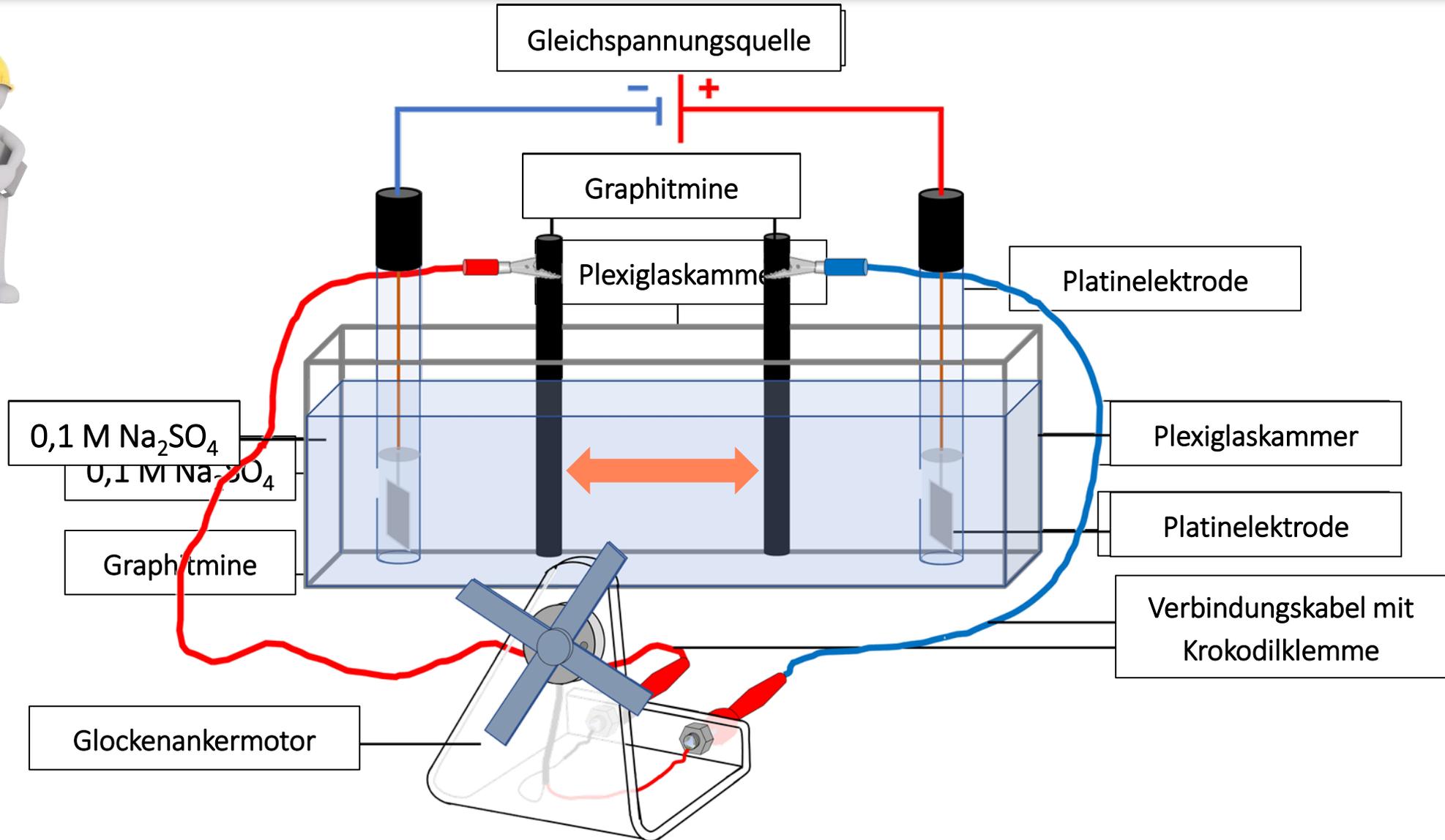
**Faraday'sche Prozesse** und **kapazitive Effekte** lassen sich aufgrund ihres **Stromverlaufes**, während der ablaufenden Vorgänge **voneinander unterscheiden**.



Daher müsste man den **Stromverlauf einer BPE messen**, um die Vorgänge eindeutig voneinander unterscheiden zu können

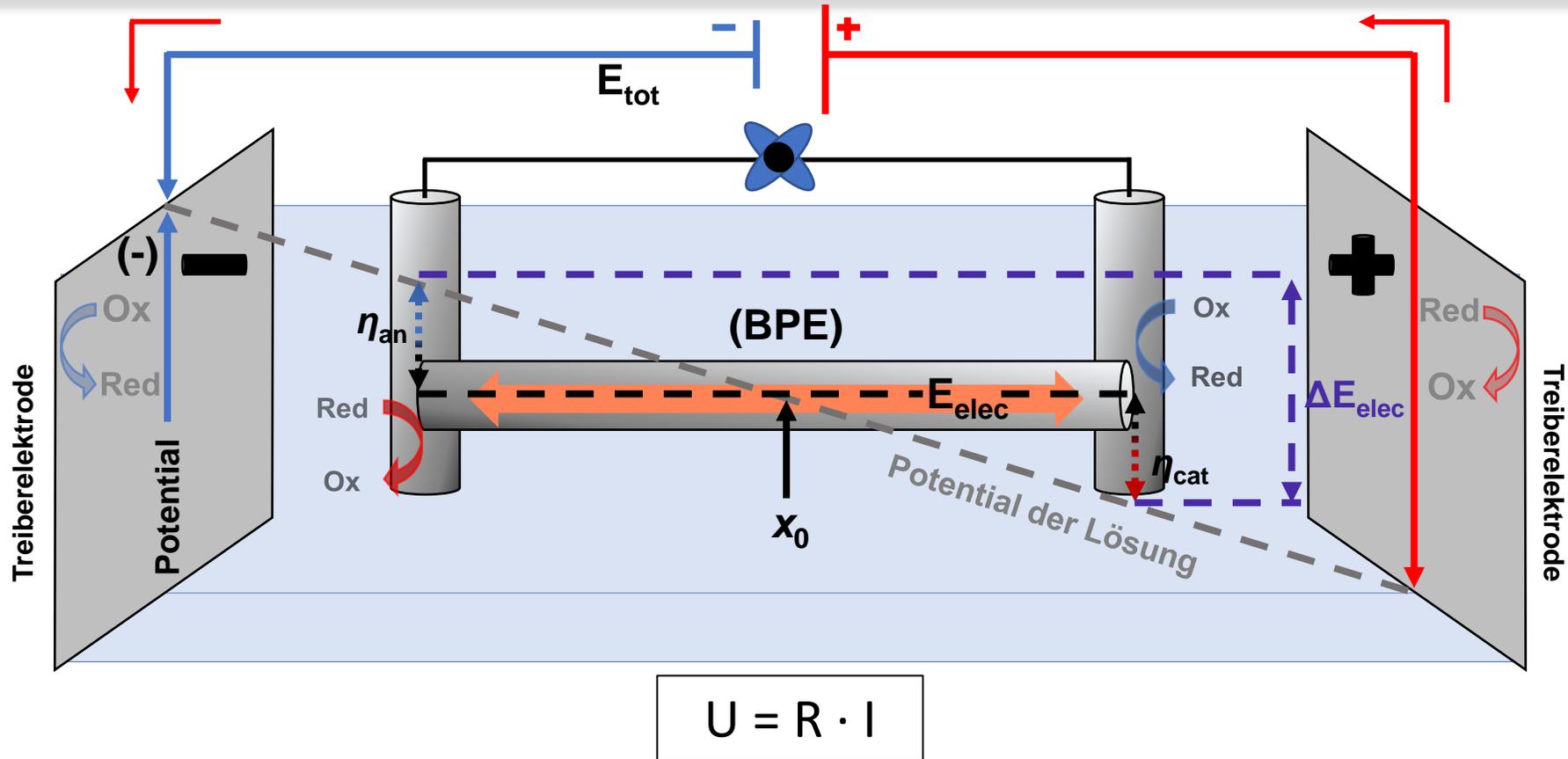


# Veränderung des Versuchsaufbaus





# Abhängigkeit des Potentials und dem Abstand der BPE

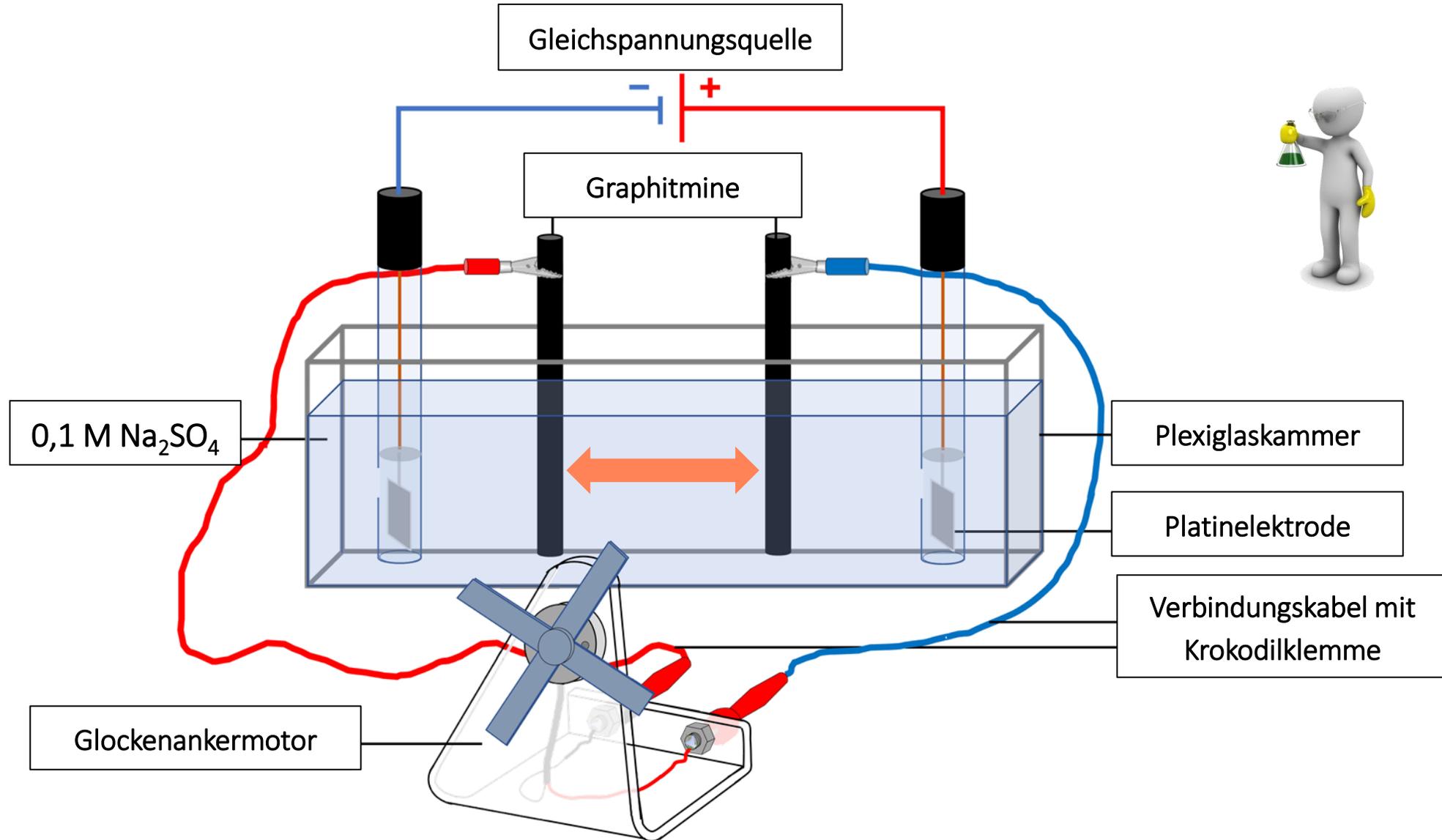


Ist es möglich durch **Veränderung der Abstände** zwischen den aufgestellten bipolaren Elektroden das **Potential der einzelnen Graphitminen zu verändern**?



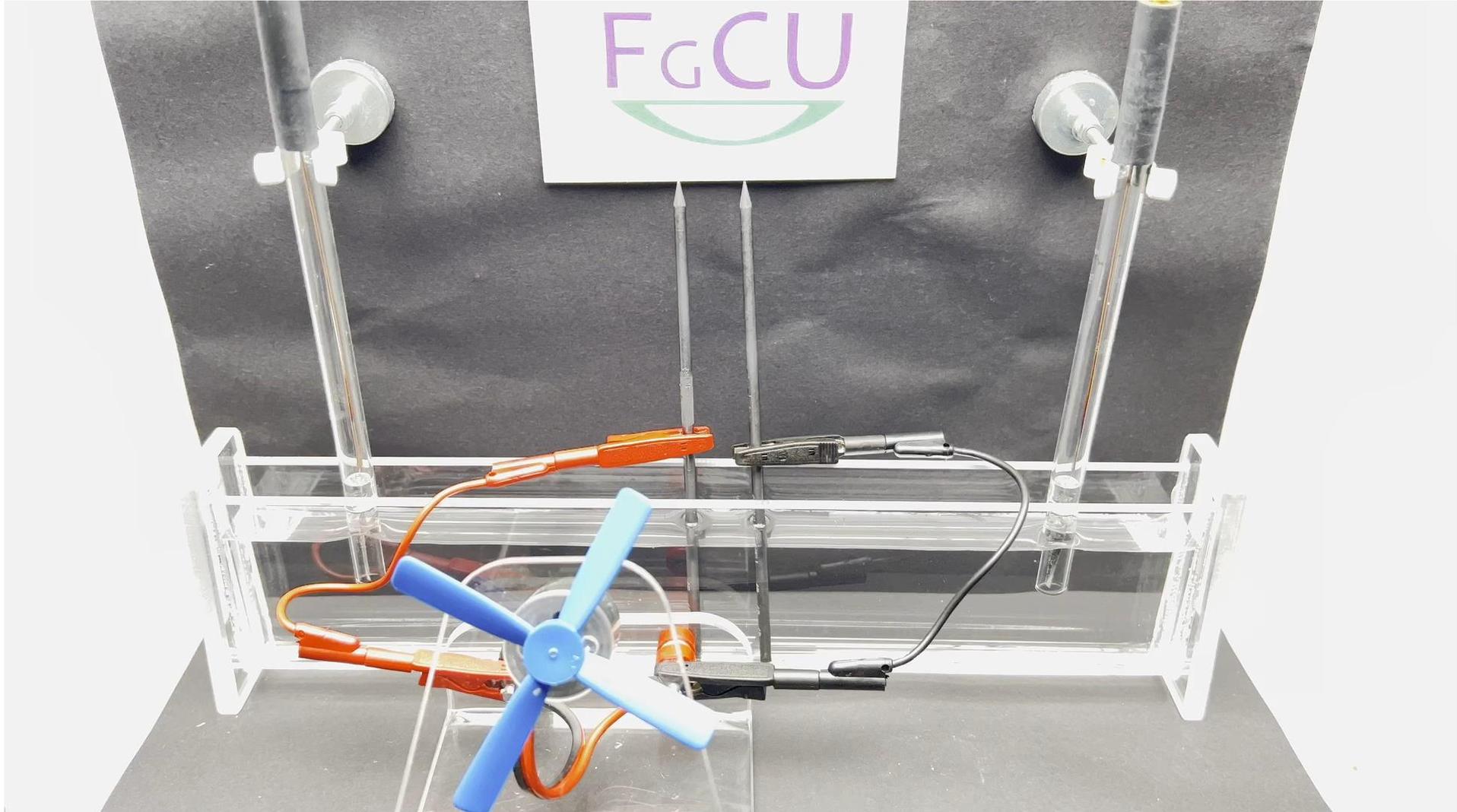


# Abhängigkeit des Potentials und dem Abstand der BPE im Experiment





# Abhängigkeit des Potentials und dem Abstand der BPE im Experiment



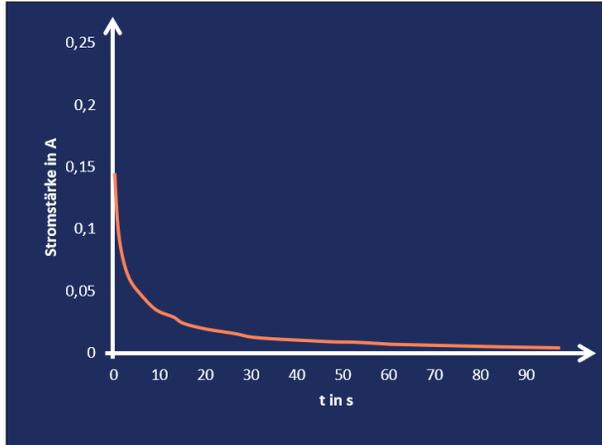
$$U = R \cdot I$$



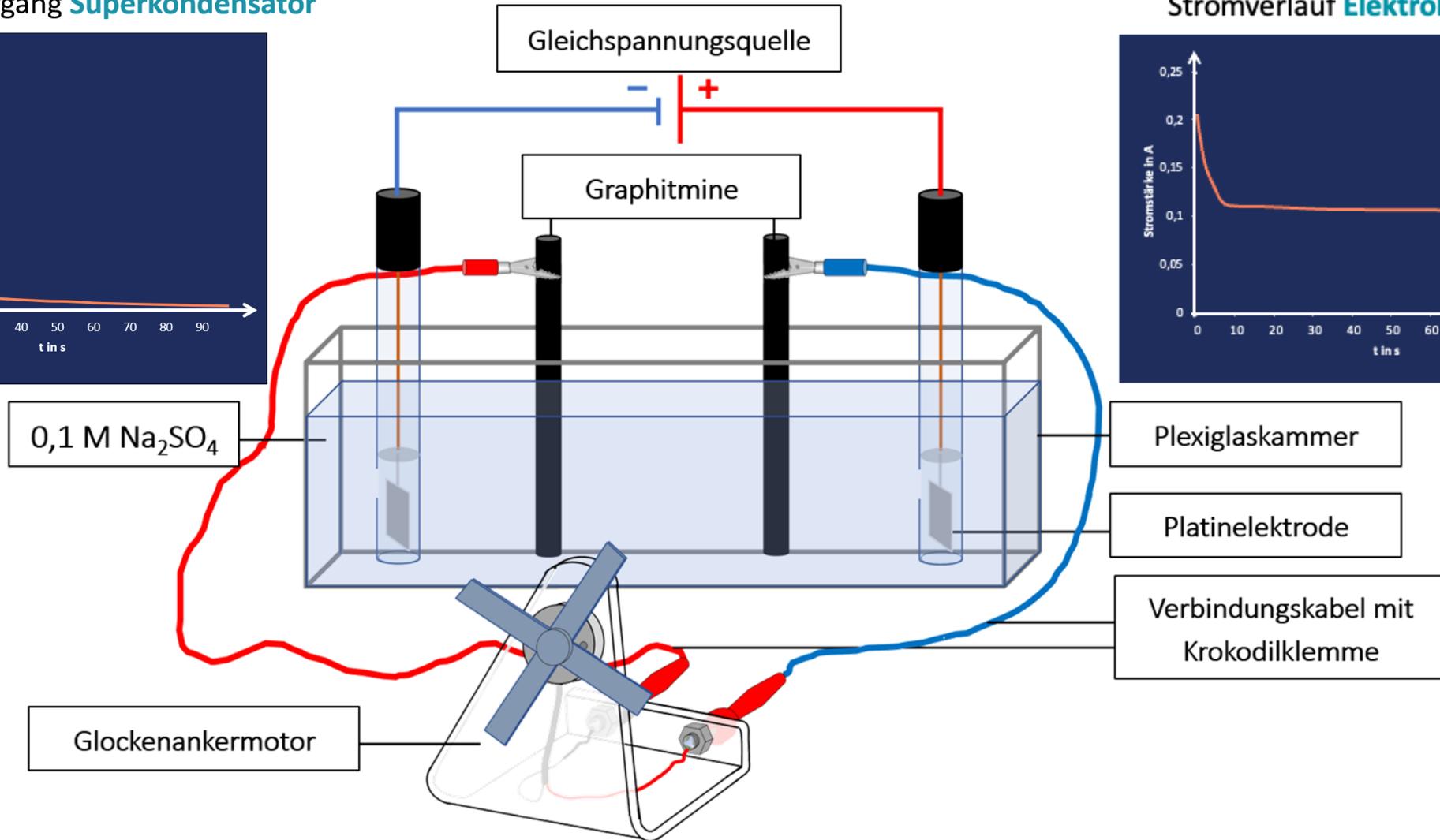
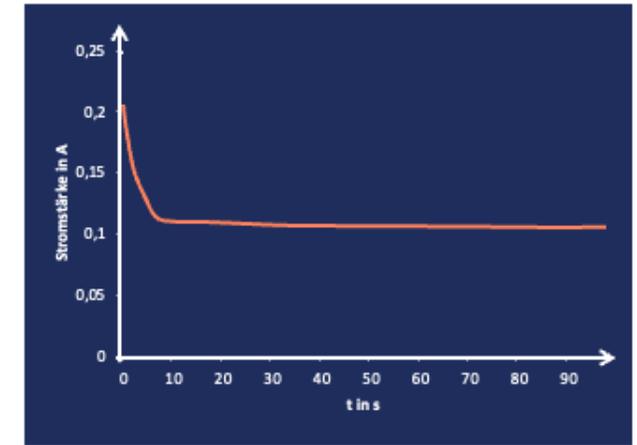
# Versuch: Kapazitive Effekte oder Faraday'sche Prozesse



Stromverlauf Ladevorgang **Superkondensator**

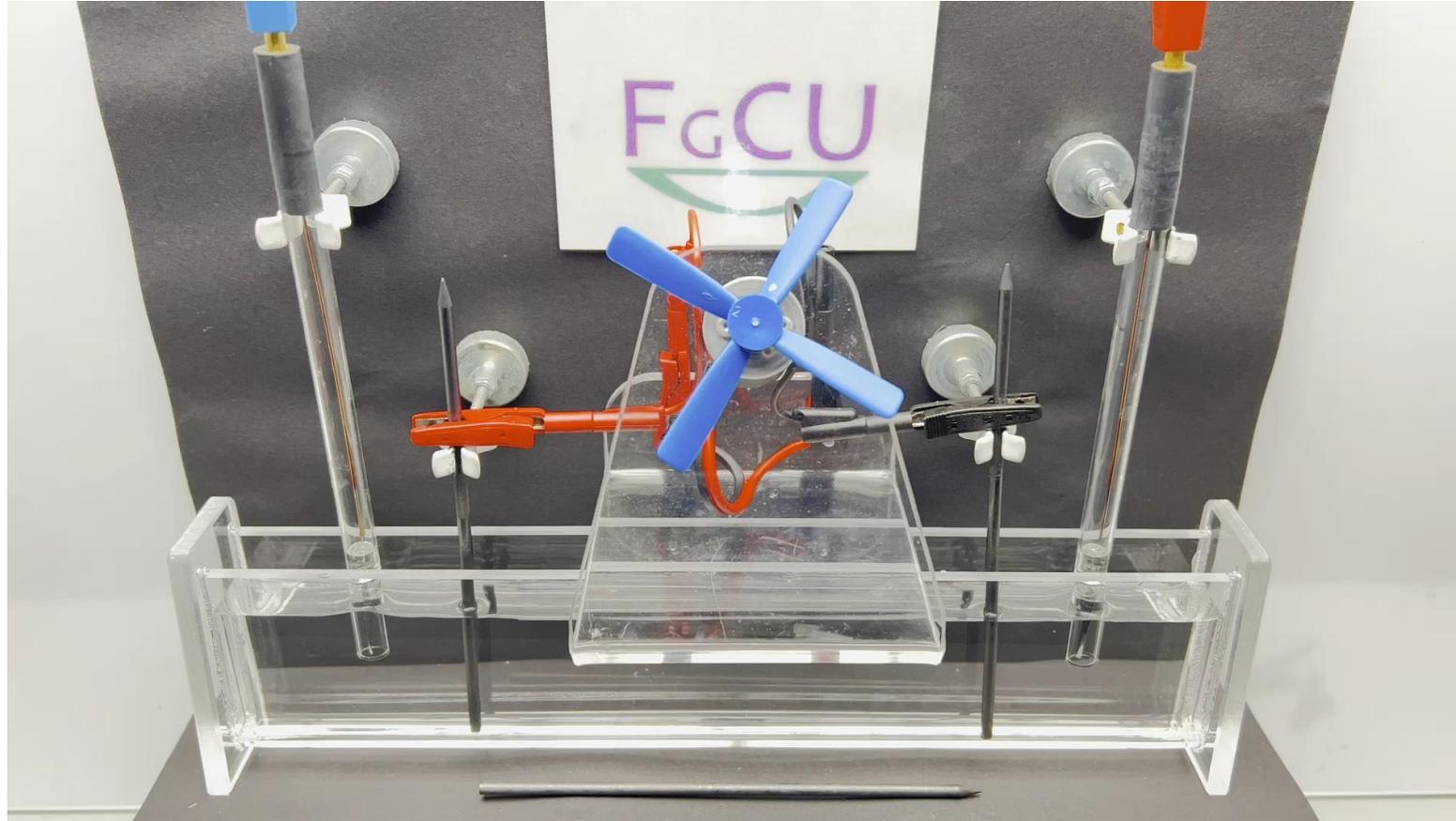


Stromverlauf **Elektrolyse H<sub>2</sub>O**

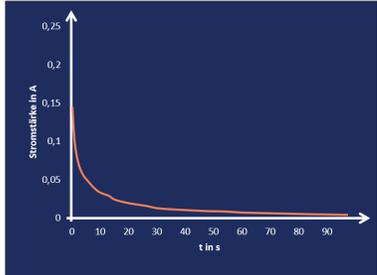




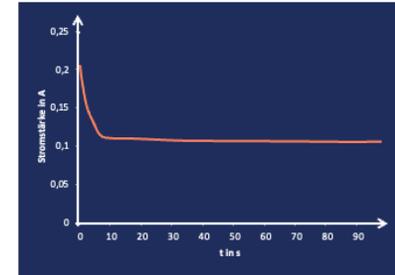
# Versuch: Kapazitive Effekte oder Faraday'sche Prozesse



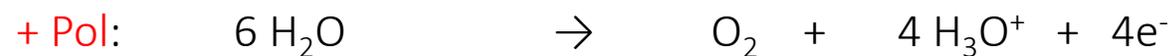
Stromverlauf Ladevorgang **Superkondensator**



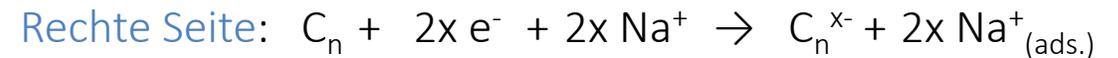
Stromverlauf **Elektrolyse H<sub>2</sub>O**



## Treiberelektroden (Platin):

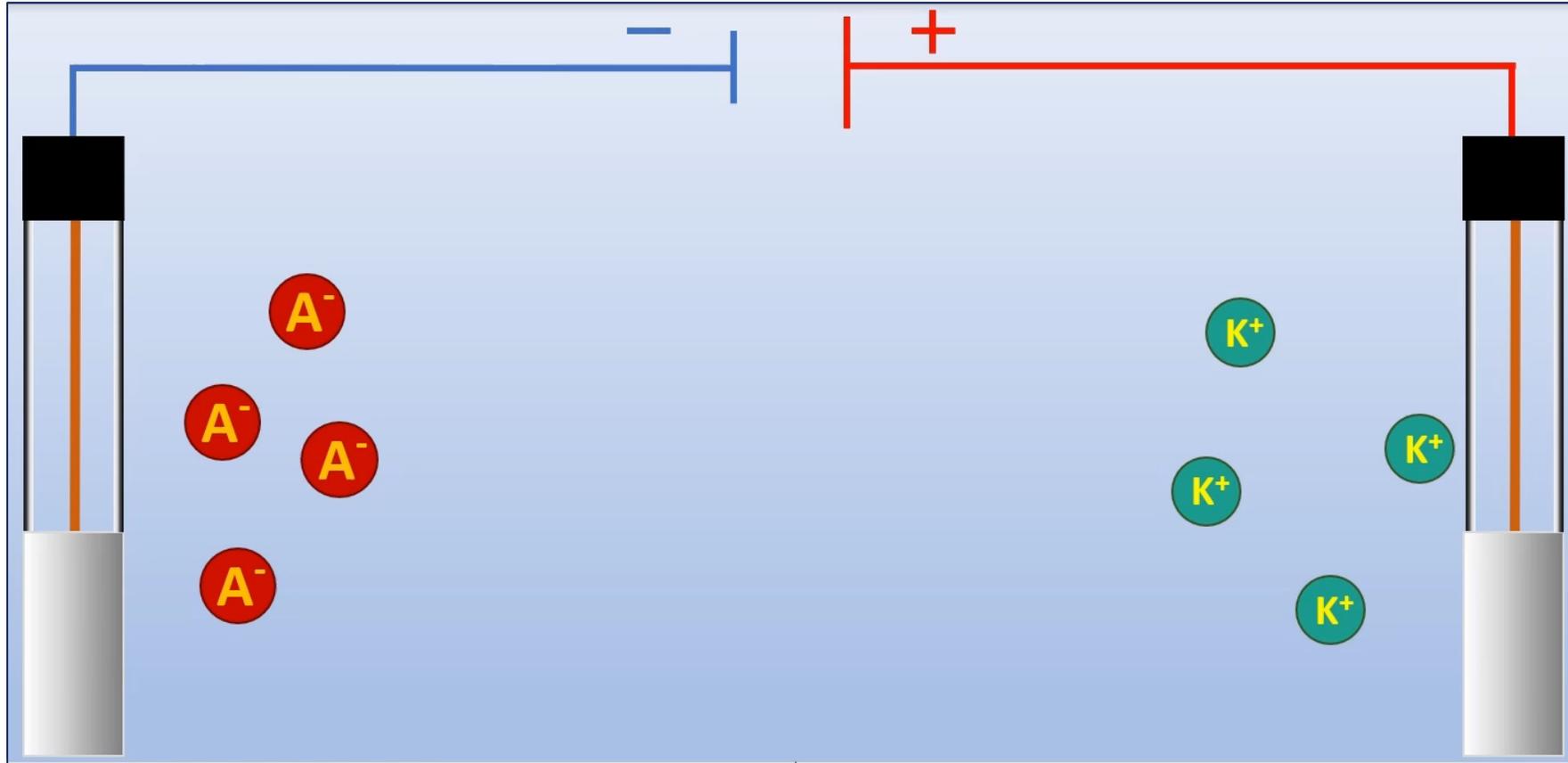


## Bipolare Elektrode (Graphit):





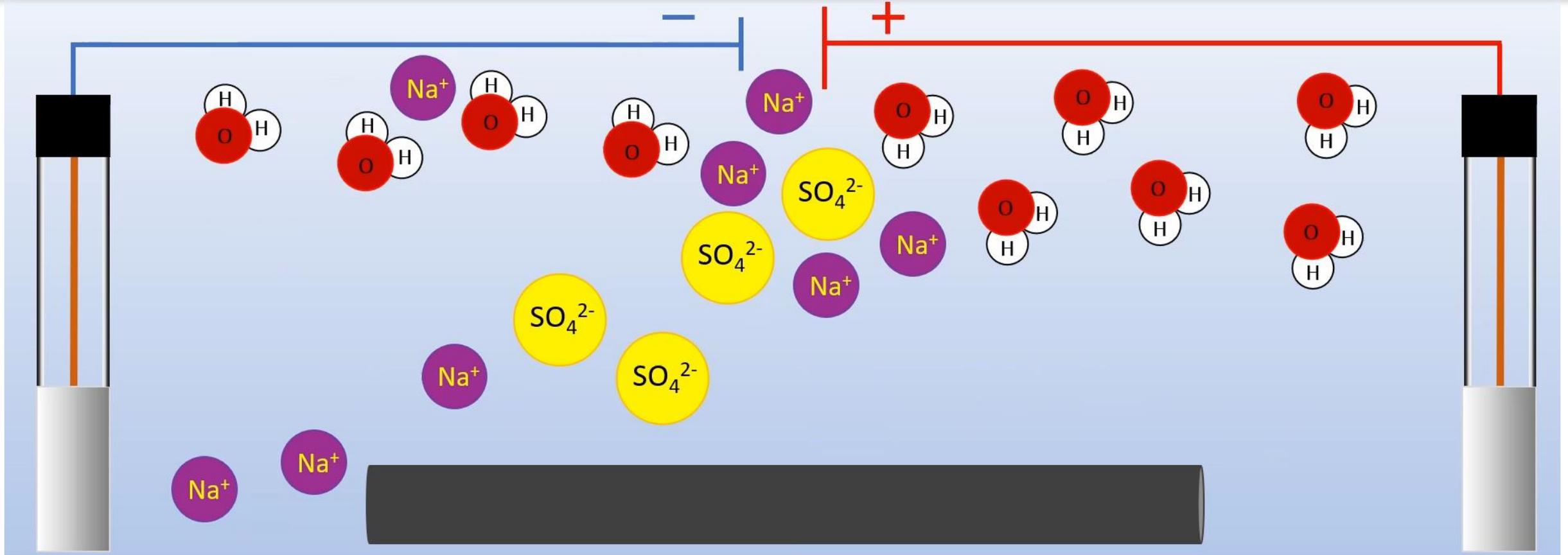
# Ladungstransport: Ionen vs. Elektronen



Dabei gilt: Je größer die Widerstände in der Lösung sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Ladungen über die Elektroden transportiert werden können.



# Gedankenexperiment zum Ladungstransport: Ionen vs. Elektronen

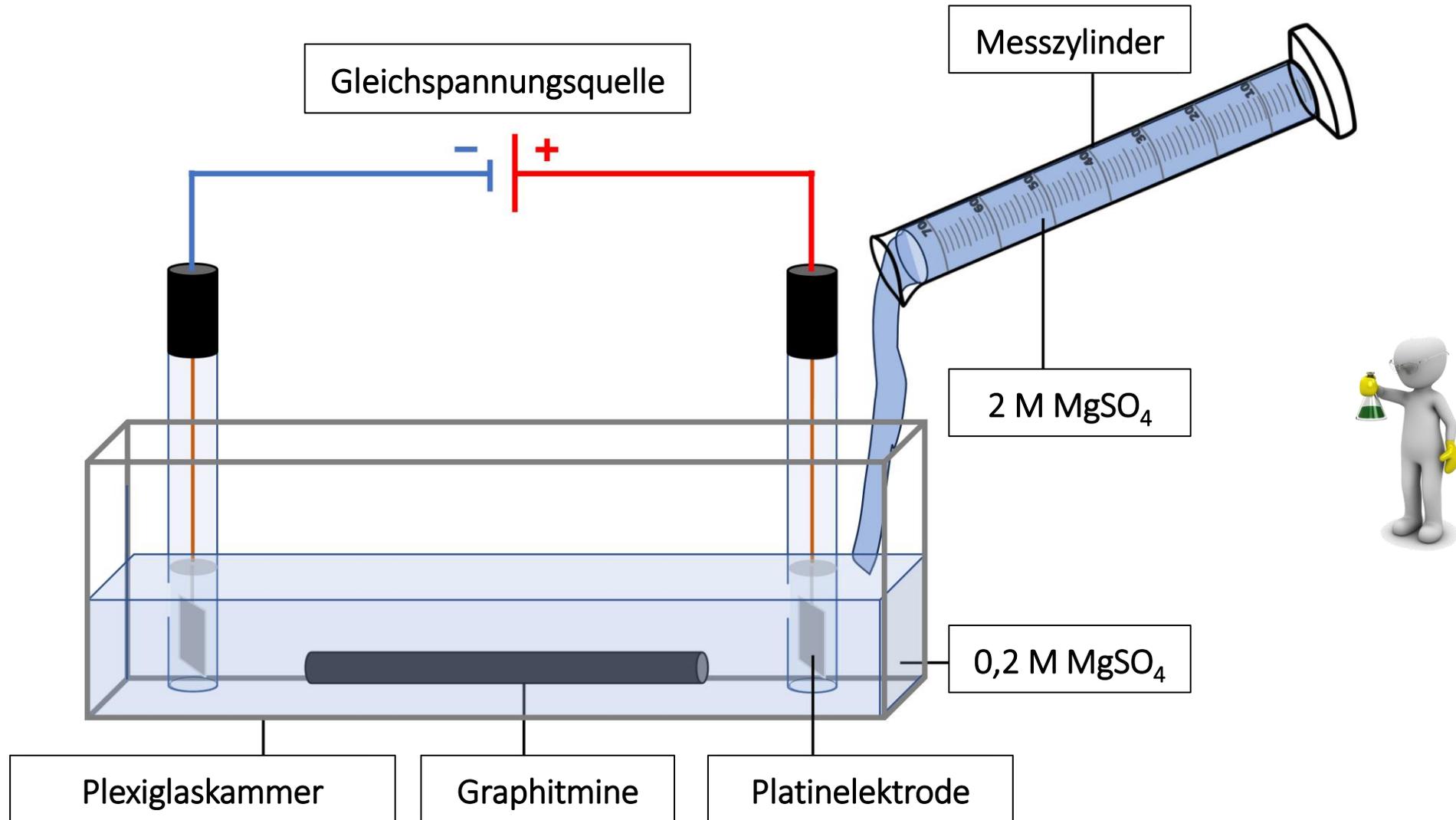


Das eingeleitete **größere Erhöhung** **Widerstand** **Elektronenkonzentration** **als** **stoßen** **Gasentwicklung** **über** **die** **Beziehung** **transportiert**.



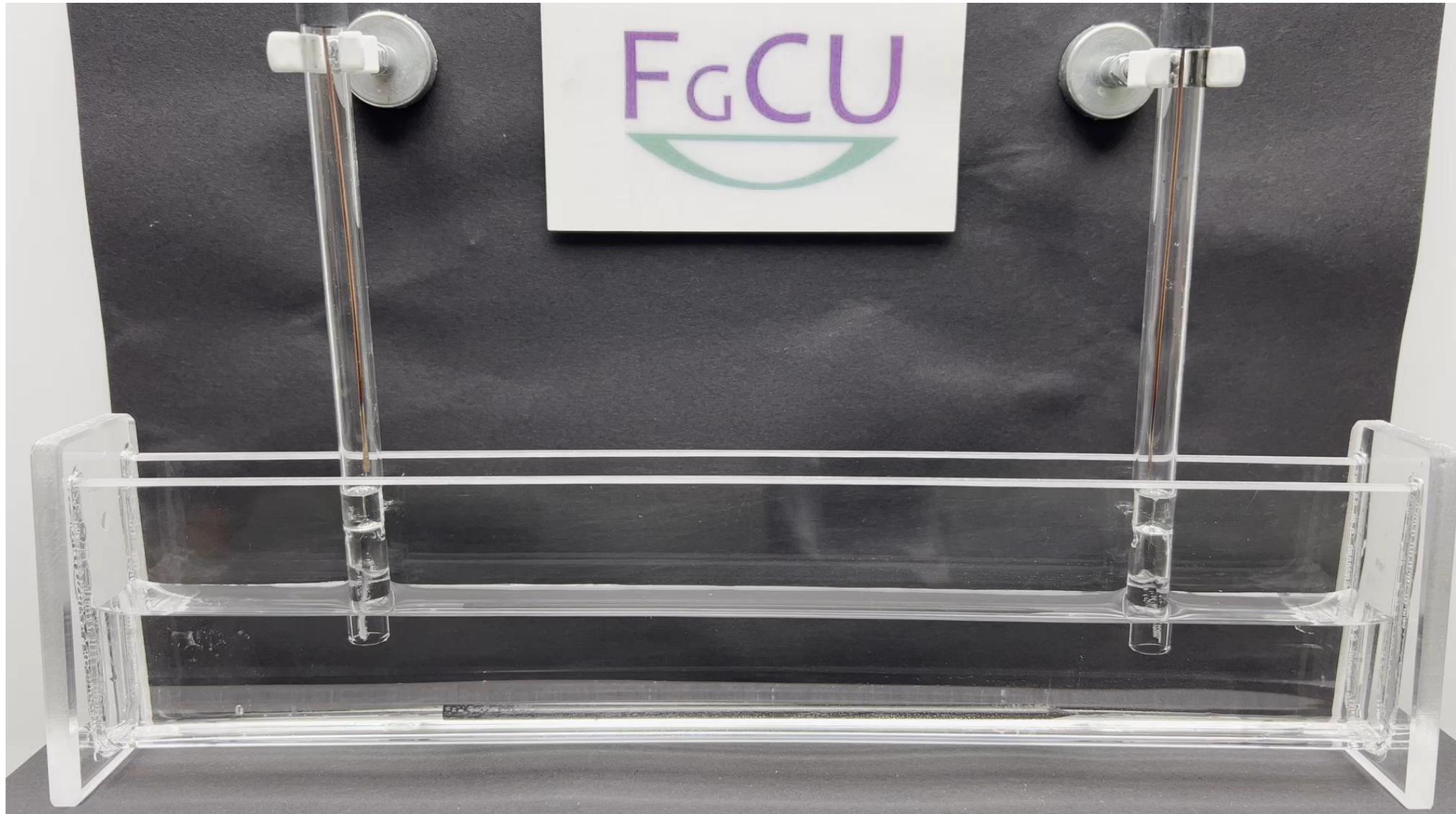


# Ladungstransport: Ionen vs. Elektronen



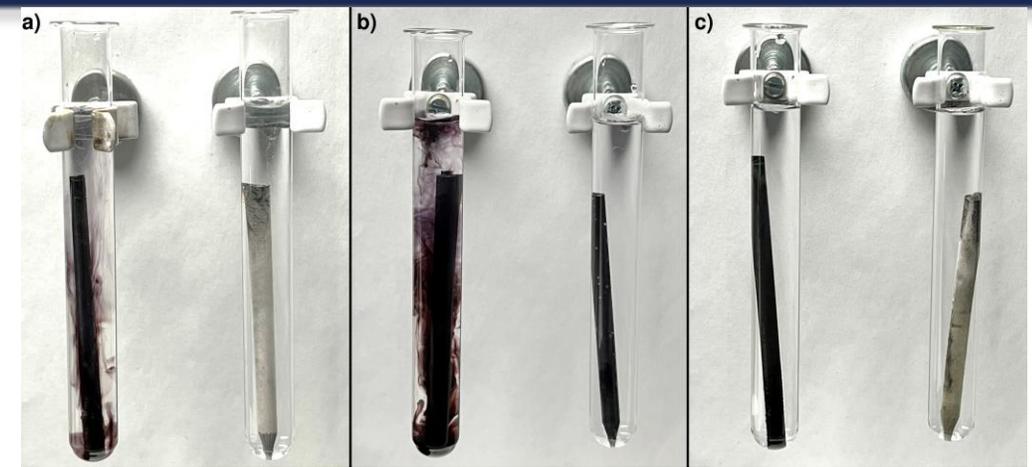
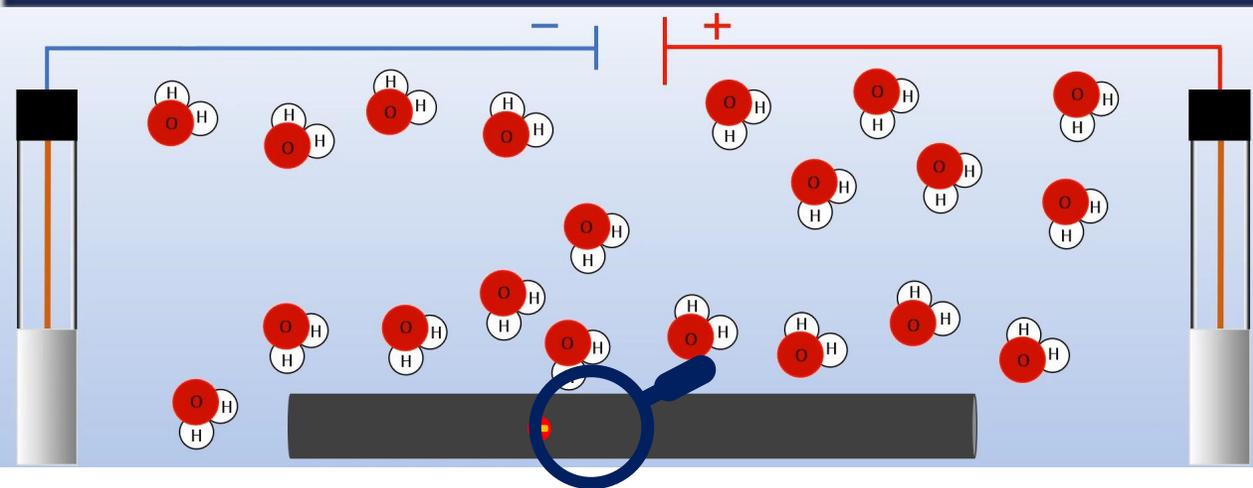


# Ladungstransport: Ionen vs. Elektronen





# Sichtbarmachung der Polarisierung der BPE



Es ist gelungen die Polarisierung der Elektrode indirekt durch Reduktion einer Silber- und Oxidation einer Iodid-Lösung aufzuzeigen.

Für Schülerinnen und Schüler wäre es für den Lernprozess von Vorteil, wenn es bereits während der Polarisierung möglich wäre die Verschiebung der Elektronen visuell zeigen zu können.

→ Für solch einen Versuch würde man eine bipolare Elektrode benötigen, die während der Polarisierung ihre Farbe ändert. Eine Art Elektronendichte-Detektor.





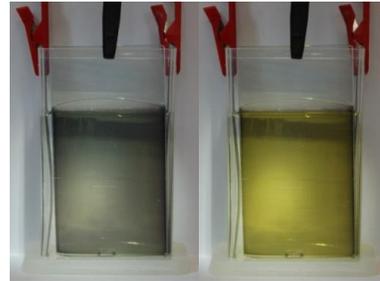
# Exkurs: Polypyrrol und elektrochrome Fensterscheiben



Das **leitfähige Polymer Polypyrrol** ist in der Forschung von großem Interesse.

Aufgrund seiner.

- guten **Leitfähigkeit**,
- seiner **leichten Herstellung** und
- seiner **hohen Langzeitstabilität**

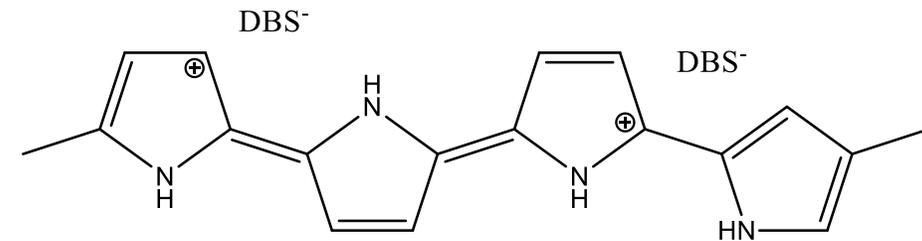
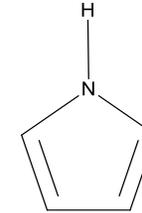


wird es in vielen technischen Produkten, wie zum Beispiel **in „smart windows“ verwendet.**

Ist es möglich **Polypyrrol als bipolare Elektrode** zu verwenden und so unseren **Elektronendichte-Detektor** zu realisieren?



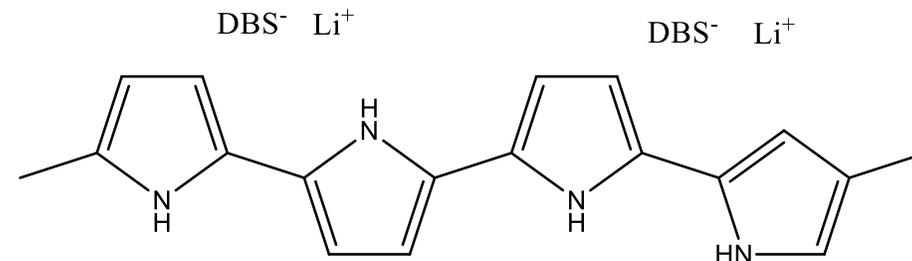
Monomer: Pyrrol

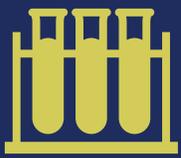


Reduktion

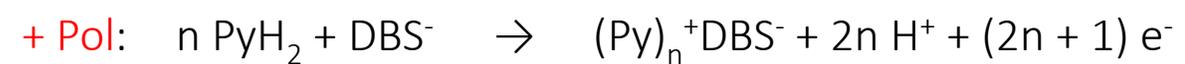
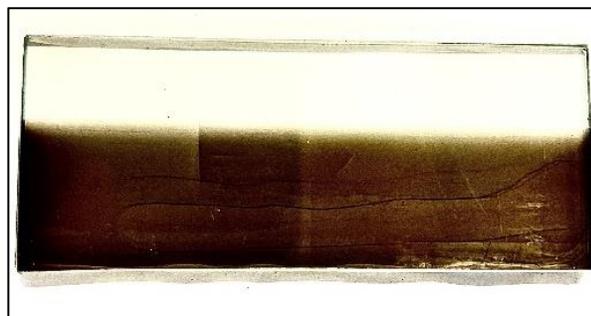
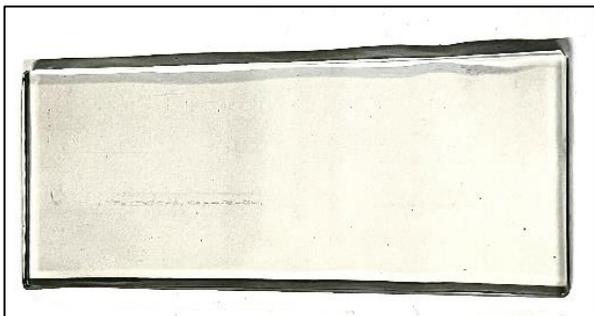
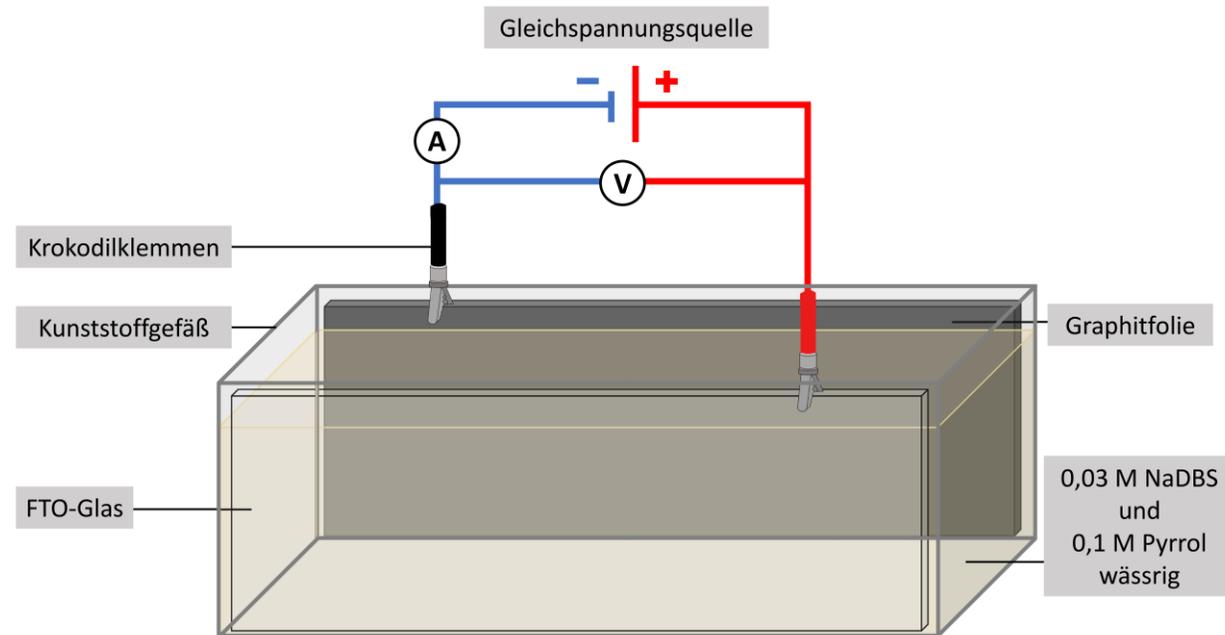
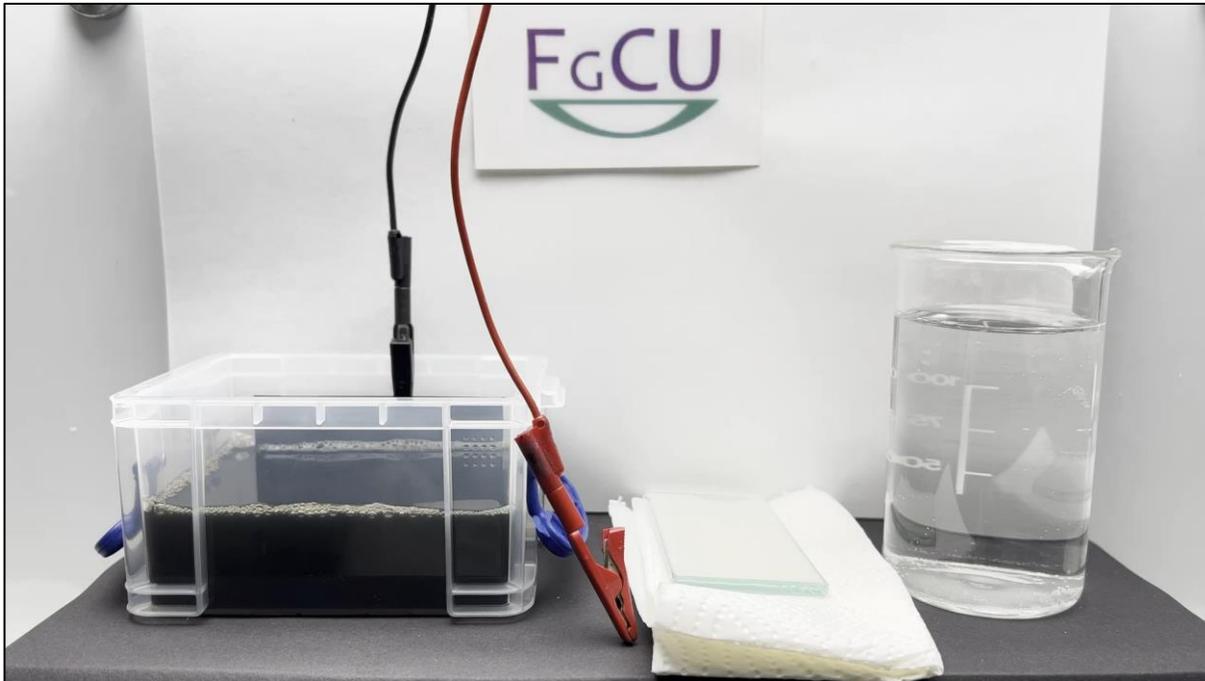


Oxidation

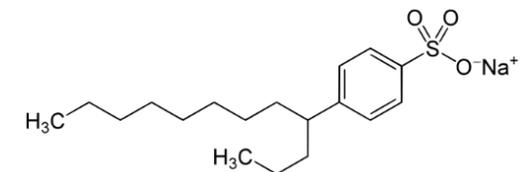




# Polymerisation von Pyrrol zu Polypyrrol

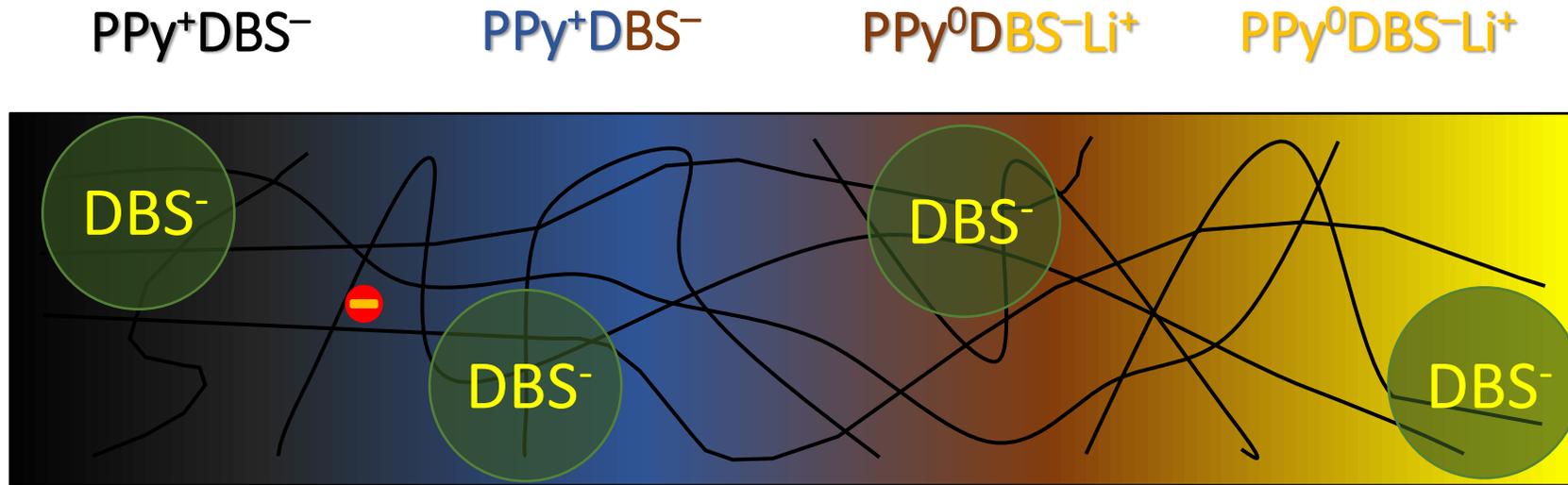


p-Dotierung mit:  
Dodecylbenzolsulfonat-Anion





# Polypyrrol als Elektronendichte-Detektor

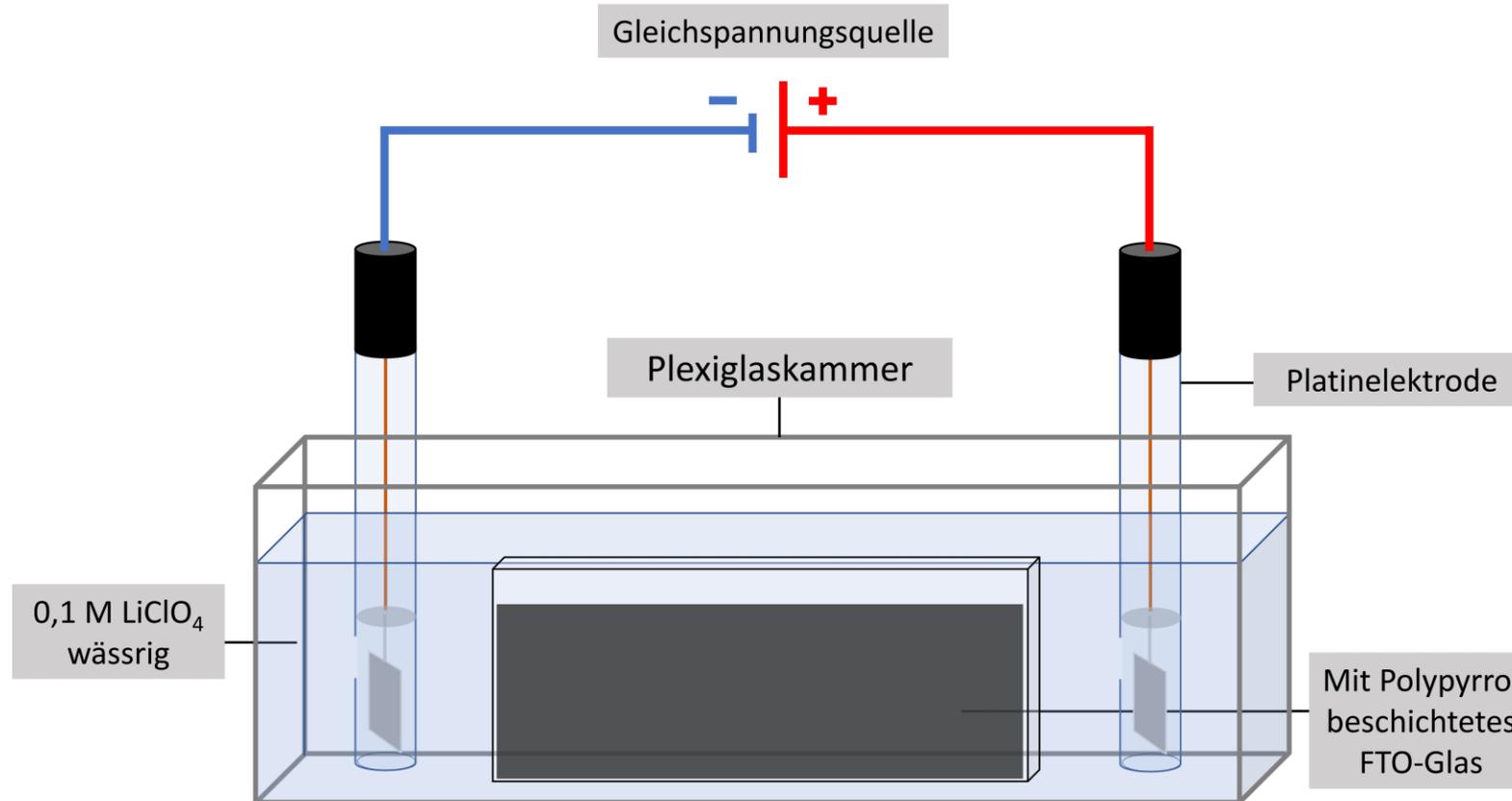


Sollte es gelingen **Polypyrrol als Elektronendichte-Detektor** einzusetzen, müsste sich auf der Phänomenebene die Elektrochrome-Fensterscheibe von

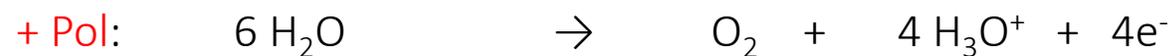
**Schwarz** über **Blau** zu **Braun** nach **Gelb** färben.



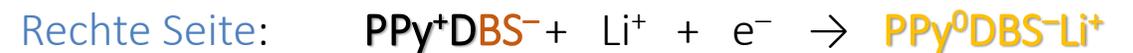
# Polypyrrol als BPE im Schulversuch



## Treiberelektroden (Platin):

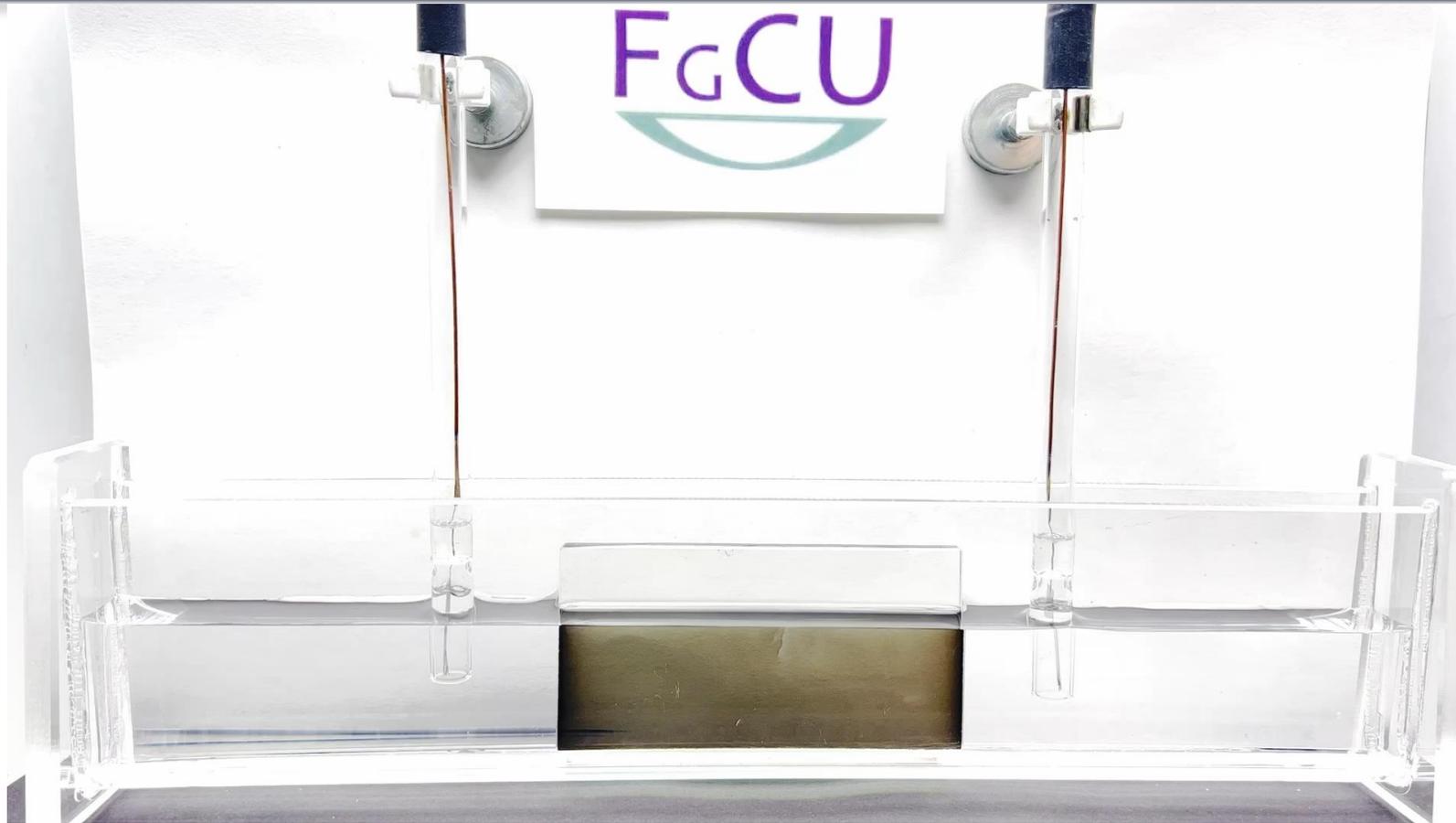


## Bipolare Elektrode (Polypyrrol):

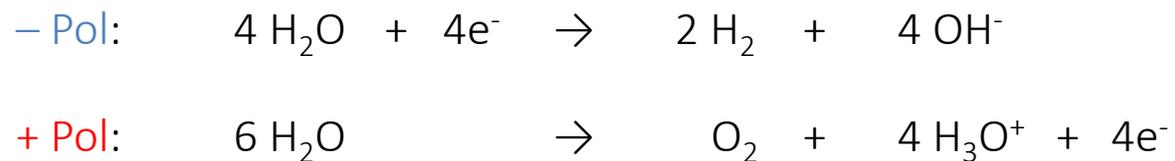




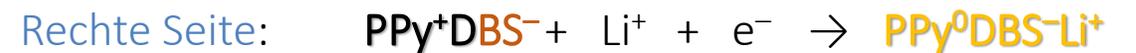
# Polypyrrol als BPE im Schulversuch



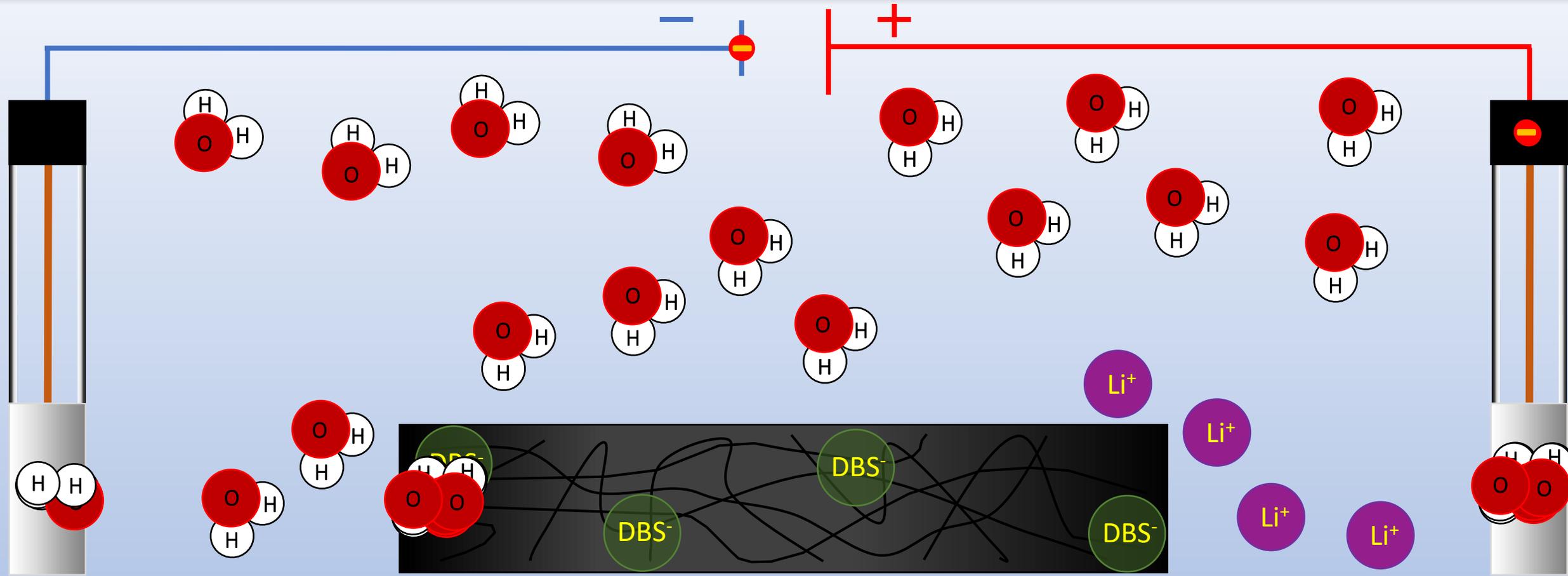
## Treiberelektroden (Platin):



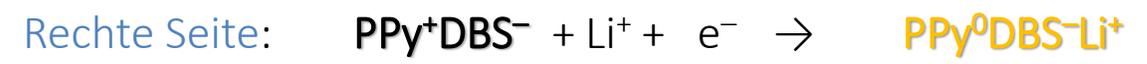
## Bipolare Elektrode (Polypyrrol):



# Polypyrrol – Der Elektronendichtedetektor als bipolaren Elektrode auf der Teilchenebene

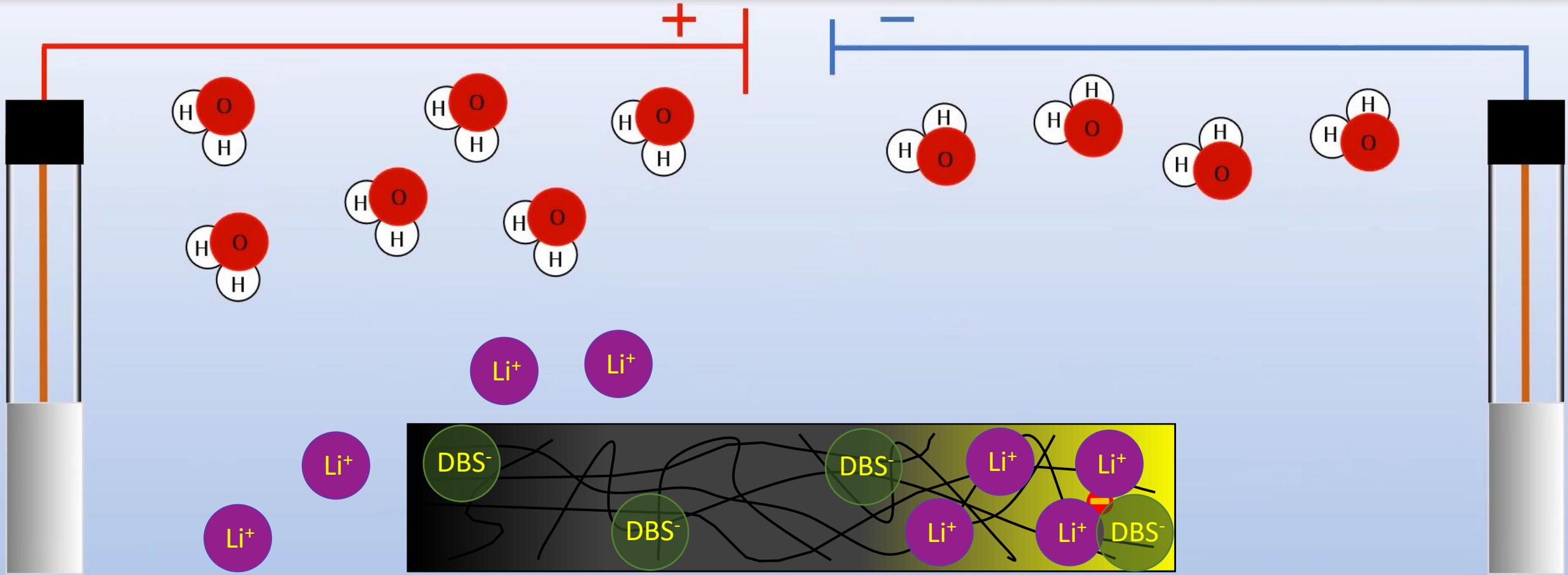


## Bipolare Elektrode (Polypyrrol):

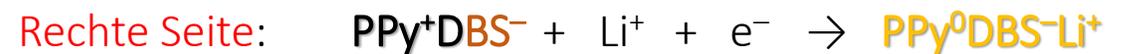




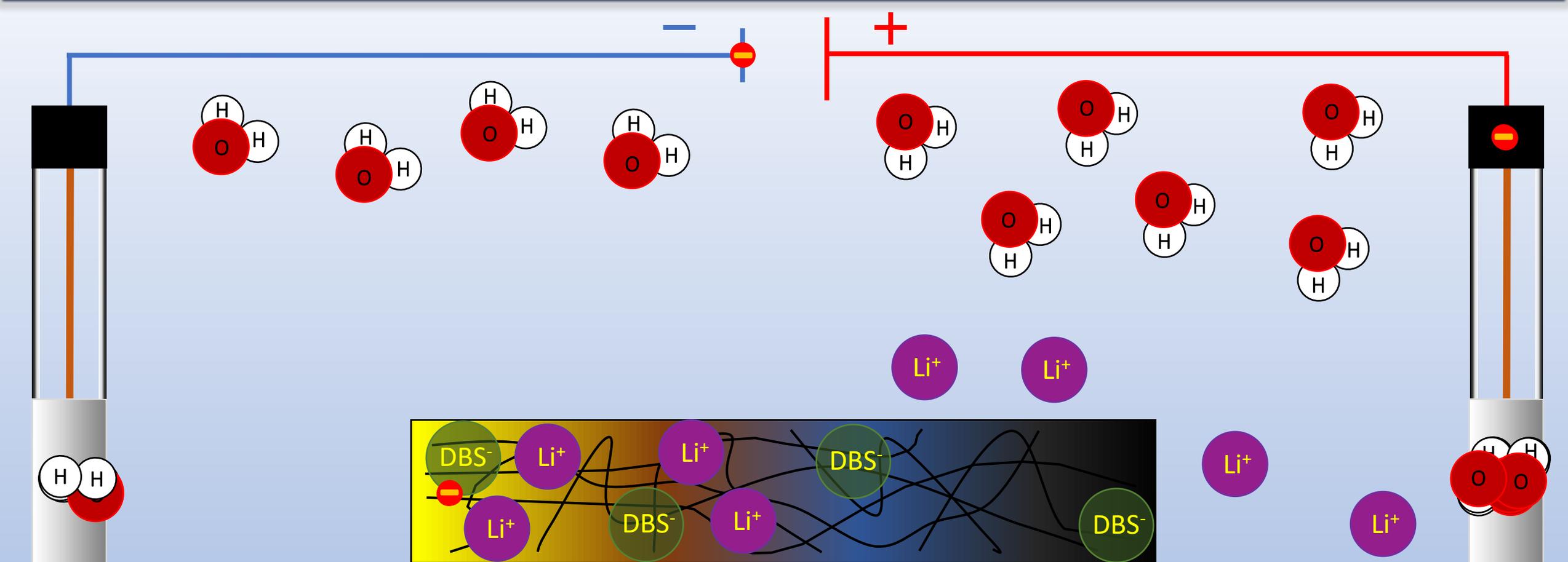
# Polypyrrol – Der Elektronendichtedetektor als bipolaren Elektrode auf der Teilchenebene



## Bipolare Elektrode (Polypyrrol):



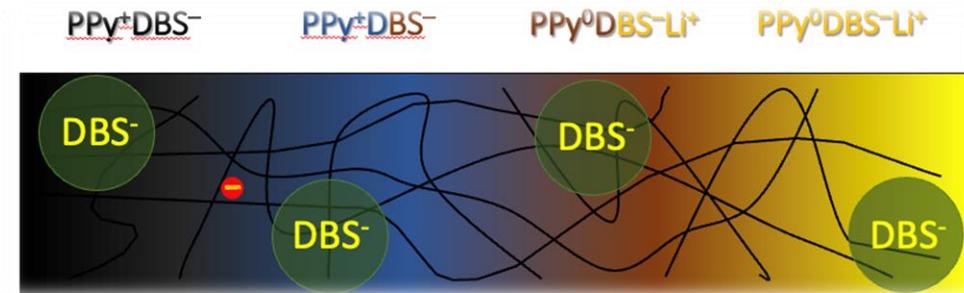
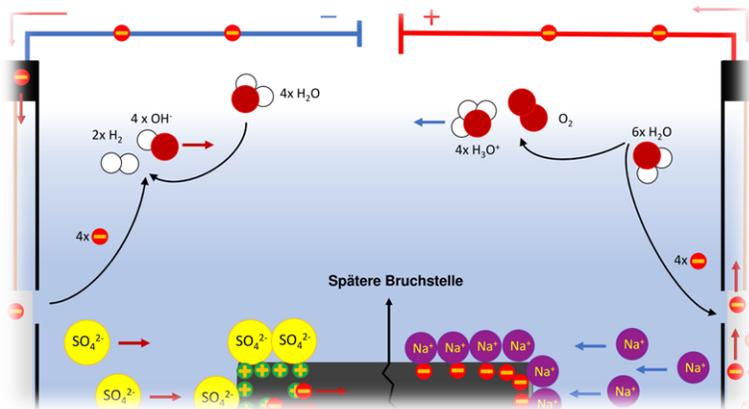
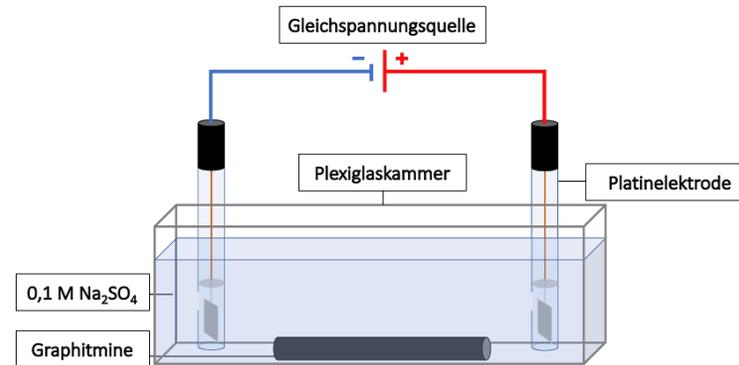
# Polypyrrol – Der Elektronendichtedetektor als bipolaren Elektrode auf der Teilchenebene



## Bipolare Elektrode (Polypyrrol):



# Zusammenfassung und Ausblick





# Der Strom, der aus dem E-Feld kam

-

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !**



Dr. Dominik Quarthal  
Prof. Dr. Marco Oetken

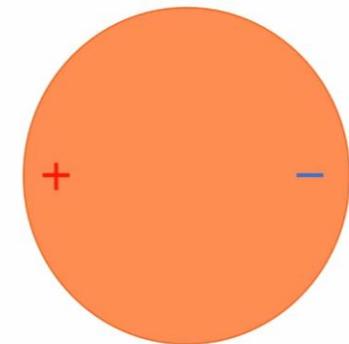
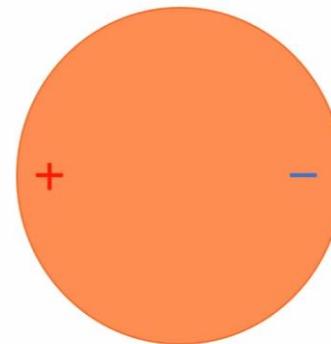
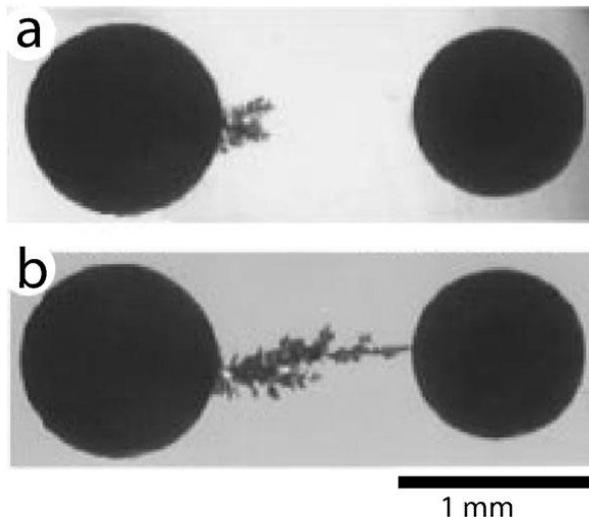


# Einsatz in der Mikro- und Nanofabrikation



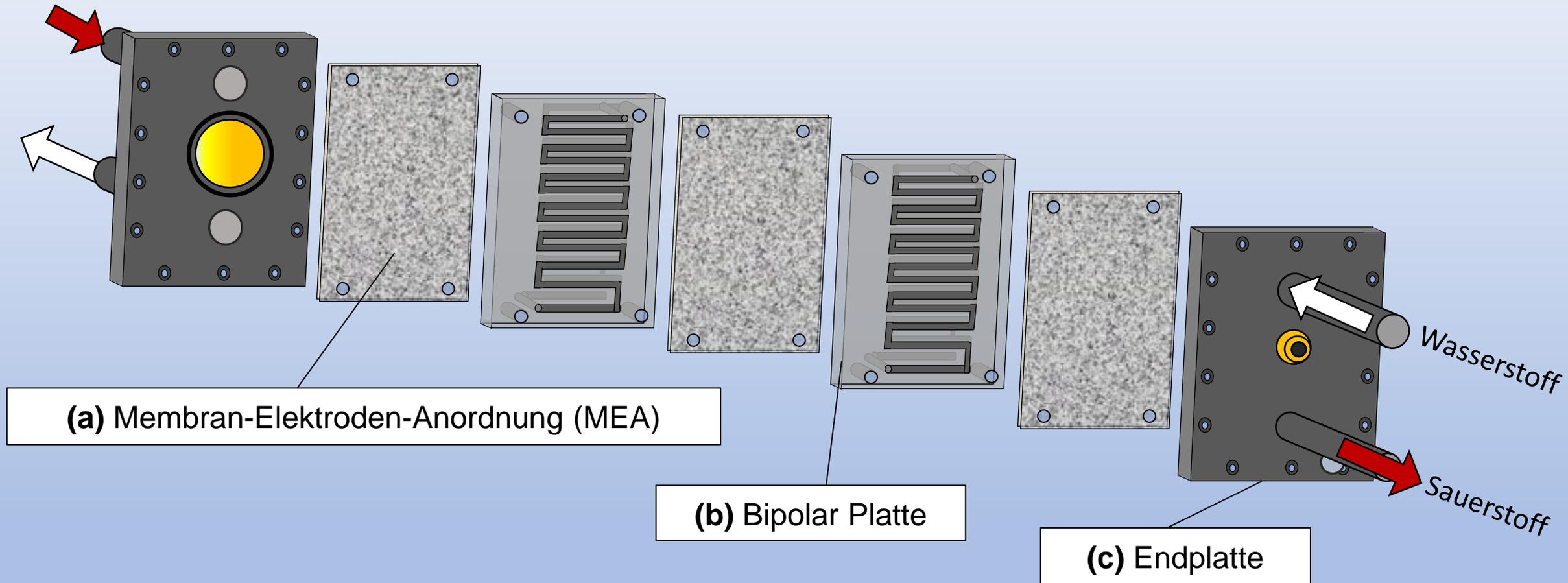
Die **bipolare Elektrochemie** ermöglicht es auf vielfältige Weise, **komplizierte Prozesse** bei der Mikro- und Nanofabrikation **zu vereinfachen**:

- Außerdem ermöglicht es auf **zwei bipolare Elektroden** wie **Platin** und **Gold** gleichzeitig **Spitzen** und **Nischen** auf **beiden** Elektroden **abscheiden** **modifiziert werden können**:
- Dies **beispielsweise** lassen sich **kleinste Kupferpartikel** auf **Kohlenstofffasern** **kontaktieren** die **Grundlage neuerer heterogener Katalysatoren** bilden





# Bipolare Elektroden als Schlüssel zu effizienteren Batterien ?



- Der Einsatz **bipolarer Elektroden (-Platten)** bietet die Möglichkeit die **Schaltung** in **Brennstoffzellen** sowie **Redox-Flow-Batterien** zu **vereinfachen** und **wesentlich mehr Platz** für Elektrodenmaterial zu schaffen.



# Bipolare Elektroden als Schlüssel zu effizienteren Batterien ?



Konzept der Embatt-Bipolarbatterie

© IAV GmbH

**Bipolarbatterien** sind Lithium-Ionen-Batterien, die aus aufeinandergestapelten, seriell verschalteten Elektroden bestehen. Im Gegensatz zu konventionellen **Lithium-Ionen-Batterien** ☹ sind diese Elektroden "bipolar" aufgebaut. Das bedeutet: Auf einem gemeinsamen Elektrodenträger sind die Aktivmaterialien für die Kathode der Batterie und umseitig die Aktivmaterialien für die Anode aufgebracht.

Kürzlich hat das Fraunhofer IKTS zusammen mit Partnern im **Projekt "Embatt-goes-FAB"** das von **der Brennstoffzelle** ☹ bekannte **Bipolar-Prinzip auf die Lithium-Batterie übertragen**. Wichtigster Bestandteil der Batterie ist laut den Forschern die Bipolar-Elektrode – eine metallische Folie, die mit keramischen Speichermaterialien beidseitig beschichtet wird. Eine Seite wird dadurch zur Anode, die andere zur Kathode. **Als Herz der Batterie speichert sie die Energie.**

keramischen Speichermaterialien beidseitig beschichtet wird. Eine Seite wird dadurch zur Anode, die andere zur Kathode. Als Herz der Batterie speichert sie die Energie.

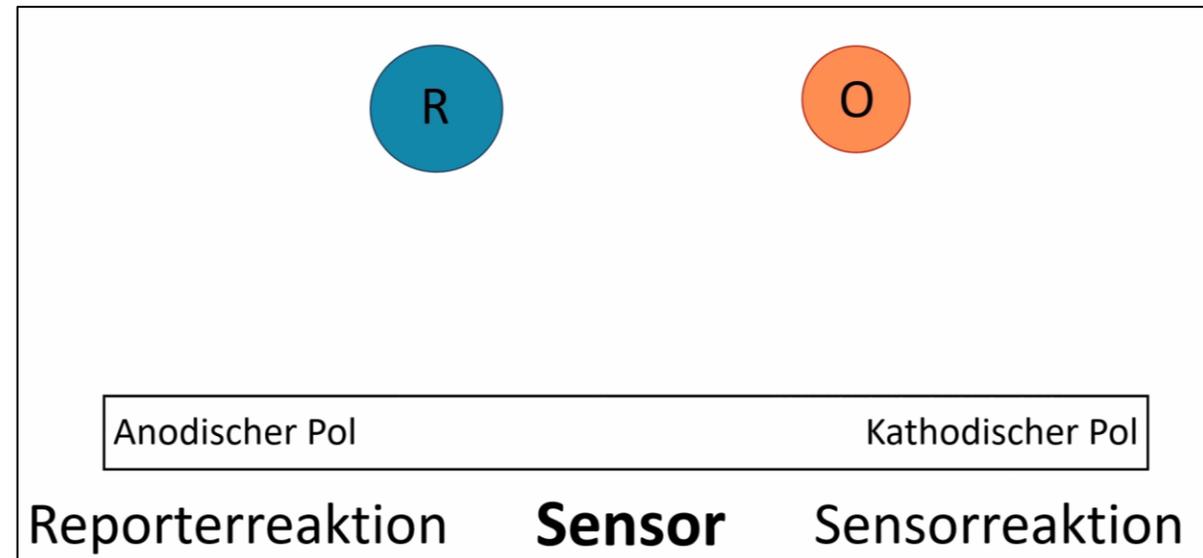


# Einsatz in der chemischen Sensorik



**Bipolare Elektroden** werden seit jüngerer Zeit auch in der **chemischen Sensorik** eingesetzt:

- Dabei werden ein Sensor und Reporterpol elektrisch gekoppelt:
- Der **Reporterpol** meldet den Status des **Sensorpols**, indem der Stromfluss bei beiden Polen der BPE gleich ist.
- D.h.: Ist die **Sensorreaktion** eine elektrochemische **Reduktion**, so stammen die **Elektronen** aus einer **Reporter-Oxidation**.



Reporterreaktionen müssen **Oxidationen** sein, welche **leicht zu detektieren** sind.

Aus diesem Grund greift man auf Oxidationen aus den Bereichen der **Elektrolumineszenz (ECL)**, **Fluoreszenz**, **anodische Ablösung eines Metallfilms** zurück



# Bipolare Elektrochemie für den Schulunterricht



Bei der **Aktualität** und **vielfältigen Einsatzmöglichkeit** der **bipolaren Elektrochemie** stellt sich die Frage:



Wie kann man dieses **brandaktuelle Themenfeld** in die **Curricula** der **Schule** und **Hochschule** **experimentell** und **konzeptionell** mit möglichst einfachen Mitteln **implementieren**?

