

B7 Kondensator, Wasserstoff, Redox-Flow – Wir speichern regenerative Energie

Die Abfolge von Telexperimenten zur Energiespeicherung bietet einen aktuellen Einstieg in ein Thema, das für den Einsatz von regenerativen Energien besonders wichtig ist. Der zeitliche und inhaltliche Umfang der Experimente ist allerdings relativ groß. Deshalb eignet sich der Einsatz der Experimente vor allem in Form eines Projekts bzw. Projekttags zum Thema Energiewende. Aufgrund des Umfangs ist es auch kaum möglich, die zugrundeliegenden naturwissenschaftlichen Themen von den Schülerinnen und Schülern im Experiment erarbeiten zu lassen. Ein gewisses physikalisches und chemisches Grundwissen vorausgesetzt, können sie dieses allerdings anhand der Experimente bestens verifizieren. Alternativ können die Telexperimente natürlich auch einzeln dazu verwendet werden, anhand einer lebensnahen technischen Anwendung den Einstieg in eines der naturwissenschaftlichen Basisthemen zu finden. Eine Möglichkeit dabei ist, die Klasse in Gruppen aufzuteilen, die dann unterschiedliche Telexperimente ausführen.

1 Zentrale Fragestellung

Die vermehrte Nutzung von erneuerbaren Energien bringt eine große technische Herausforderung bei der stationären Energieversorgung mit sich: Wie kann die bei starkem Wind oder starker Sonneneinstrahlung erzeugte Energie effektiv gespeichert werden, um sie in Zeiten mit hohem Energiebedarf und Wind- und Sonnenenergiamangel über das Stromnetz an die Verbraucher zu liefern? Neben Wasserstoff als Energiespeicher wird hierfür an Batterien neuer Art, den Redox-Flow Zellen, gearbeitet.

Auch die Mobilität des Menschen stellt an die Entwickler von Energiespeichersystemen immer größere Anforderungen. So werden Elektroautos sich nur durchsetzen können, wenn ihr Energiespeicher (z. B. die Lithium-Batterie) eine dem Treibstofftank der heutigen Verbrennungsmotoren vergleichbare Reichweite ermöglicht und dabei ein möglichst geringes Eigengewicht und lange Lebensdauer besitzt.

Doch es sind nicht nur Batterien gefragt! Moderne U- und S-Bahnen sowie Hochgeschwindigkeitszüge sparen bereits heute bis zu 30 % der Antriebsenergie durch Rückgewinnung der Bremsenergie, die in Kondensatoren gespeichert wird.

In den folgenden Experimenten werden einige für die mobile und stationäre Energieversorgung geeignete Energiespeichersysteme behandelt. Alle Experimente eignen sich zudem dafür, in eine vertiefte Wertediskussion einzusteigen. Beispielhafte Umsetzungsmöglichkeiten zum Bereich Umwelt finden Sie im „Leitfaden Naturwissenschaften, Technik und Werte“.

2 Einordnung des Experiments in den Unterrichtszusammenhang

2.1 Fachliche Grundlagen

Den Schülerinnen und Schülern ist sicherlich schon in anderen naturwissenschaftlichen Themenbereichen der Begriff „Energie“ in anschaulicher Form als die „Fähigkeit, Arbeit zu verrichten“ beschrieben worden. Anschaulichere Ansätze erklären „Energie“ differenzierter mit „Systemen, die Energie besitzen und damit etwas anheben, bewegen, erwärmen, tönen lassen oder zum Leuchten bringen“ können.

Die Verfügbarkeit von Energie ist allerdings nur dann gesichert, wenn man für den zu erwartenden Energiebedarf auch ausreichend große Energiespeicher eingeplant hat. Das kennt jeder von Handys, Digitalkameras, Laptops usw.: Ohne aufgeladene Akkus oder eine ausreichende Zahl von Ersatzakkus oder Batterien sind diese Geräte ohne Stromnetz schnell unbrauchbar.

Den Schülerinnen und Schülern ist allerdings weniger bewusst, dass Energiespeicher auch für die Stromnetzbetreiber eine wichtige Rolle spielen, da sich Stromproduktion und Stromnutzung häufig sehr stark zeitlich (und örtlich) voneinander unterscheiden.

Besonders in den Industrieländern wird „rund um die Uhr“ eine gesicherte Versorgung mit elektrischer Energie verlangt. Die Stromnetzbetreiber haben dafür computergesteuerte Ausgleichssysteme entwickelt, damit das Stromnetz bei Stromüberschuss oder Strommangel nicht „zusammenbricht“:

- Kooperationen mit anderen Stromnetzen
- Zuschaltung von gasbetriebenen Kraftwerken, die schnell hochgefahren werden können
- Einsatz von Wasserspeicherkraftwerken

Mit zunehmendem Anteil der leistungsmäßig sehr stark schwankenden erneuerbaren Energien (z. B. Offshore Windparks), die z. T. auch nicht rund um die Uhr zur Verfügung stehen (z. B. Photovoltaik), ist eine breite Anwendung zusätzlicher Technologien zur Energiespeicherung gefragt. Diese Technologien sind eigentlich schon längst bekannt, werden aber noch kaum großtechnisch eingesetzt.

Die Schülerinnen und Schüler sollen bei der Durchführung der Experimente erkennen, dass sie mit den Anwendungen ihnen bekannter Funktions-Prinzipien (Elektrolyse, Kondensatoren und Galvanische Zellen) Modellsysteme zur Energiespeicherung aufbauen und ihre Funktionsweise und Anwendungsbereiche untersuchen können.

2.2 Lehrplanrelevanz

Das Thema „Energiespeicherung“ wird ab der Altersstufe 13 Jahre zumeist qualitativ behandelt. Ab der Altersstufe 16 Jahre können auch quantitative Aspekte wie die Berechnungen des Energiegehalts und der Leistungsdichte von Speichersystemen hinzukommen.

In der Biologie wird sowohl die Umwandlung der Lichtenergie in chemische Energie (Photosynthese) als auch die Speicherung von überschüssiger Energie in Form von Kohlenhydraten behandelt. Im Fach Chemie verwendet man das Thema „Energiespeicherung“ ab der Altersstufe 13 Jahre häufig im Zusammenhang mit endothermen und exothermen Reaktionen, wobei der Verlauf von Reaktionen und weniger die Speicherung von Energie im Vordergrund steht. Die der Redox- bzw. Elektrochemie zugeordneten Themen Batterien und Akkus sind fester Bestandteil fast aller Lehrpläne. Ab der Altersstufe 16 Jahre werden Energieveränderungen qualitativ („Energie wird abgegeben/aufgenommen“) und quantitativ (Berechnung der Energieveränderung in kJ pro mol umgesetzter Stoffmenge) an geeigneten Reaktionsbeispielen behandelt und experimentell untersucht. Im Physikunterricht wird die „Energiespeicherung“ im übergeordneten Themenbereich „Energieversorgung“ behandelt. Ab der Altersstufe 16 Jahre wird in der Regel nur der Kondensator ausführlicher untersucht.

Themen und Begriffe: Anode, Brennstoffzelle, Doppelschicht-Kondensator, Drehrichtung, Druckluftspeicher, Elektrochemie, Elektrolyt, Elektrolyt-Kondensator, Elektromotor, Elektrostatik, endotherme und exotherme Reaktionen, Energiespeicher, Energieumwandlung, Energieversorgung, erneuerbare Energien, Galvanische Zellen, Gaskraftwerk, Gel-Elektrolyt, Glimmspanprobe, „Gold Cap“-Kondensator, Kathode, Knallgasreaktion, Kondensator, Kraftwerk, Ladung und Entladung (von Akkus), Leistungsdichte, Polung, Redox-Flow-Zelle, regenerative Energien, Sauerstoff, Solarmotor, Treibstofftank, Wasserspeicherkraftwerk, Wasserstoff, Windturbine

2.3 Kompetenzen

Die Schülerinnen und Schüler ...

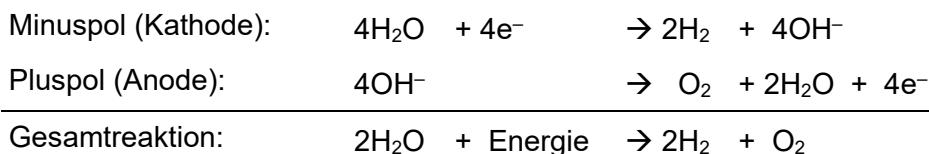
- können die Bildung von Wasserstoff (Minuspole) und Sauerstoff (Pluspol) bei der Elektrolyse von Wasser oder einer wässrigen Natriumcarbonat-Lösung („Sodalösung“) beschreiben.
- können die Knallgasreaktion als Nachweis von Wasserstoff und die Glimmspan-Probe als Nachweis für Sauerstoff beschreiben.
- können die Umsetzung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser in einer „Brennstoffzelle“ beschreiben.
- können die Elektrolyse als endotherme Reaktion und die Vorgänge in der Brennstoffzelle als exotherme Reaktion benennen.
- nennen die Elektrolysezelle als möglichen Energiespeicher für Windenergie, wobei aus der Windenergie Wasserstoff (chemische Energie) gewonnen wird, der durch Brennstoffzellen wieder in elektrische Energie umgewandelt werden kann.
- lernen Kondensatoren als Speicher für elektrische Energie kennen, erarbeiten qualitative und quantitative Eigenschaften experimentell und benennen die Anwendungsbereiche.
- beschreiben die Redox-Flow-Zelle als erweiterte Elektrolysezelle und erläutern die Speicherung von elektrischer Energie in chemischer Energie.

2.4 Das Experiment im Erklärungszusammenhang

2.4.1 Telexperiment 1: Speicherung von elektrischer Energie in chemische Energie (Wasserstoff)

Dieses Telexperiment ist ein Modellversuch zur Wasserstofftechnologie, bei der überschüssige elektrische Energie in Form von Wasserstoff (als chemische Energie) gespeichert und bei Energiebedarf in Gaskraftwerken oder Brennstoffzellen wieder zu elektrischer Energie umgewandelt wird.

Nach dem bekannten Prinzip der Elektrolyse wird dabei aus einer gesättigten Sodalösung durch Zufuhr elektrischer Energie Wasserstoff und Sauerstoff gebildet. Das gelöste Natriumcarbonat (Soda) dient hierbei als Elektrolyt, der die Eigenschaft hat, die nötige Spannung herabzusetzen. Er wird bei der Reaktion nicht verbraucht. An den Elektroden laufen folgende Reaktionen ab:

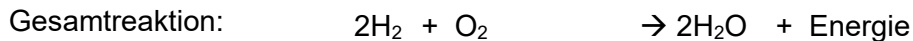
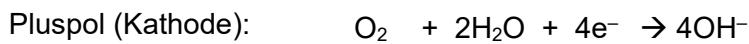
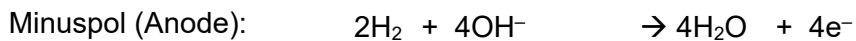


Die gebildeten Gase können durch einfache Versuche nachgewiesen werden: Wasserstoff durch die Knallgas-Probe und Sauerstoff durch die Glimmspan-Probe.

In den Auffanggefäßen über den Elektroden kann man das Volumenverhältnis der gebildeten Gase erkennen: Zwei Volumenteile Wasserstoff zu einem Volumenteil Sauerstoff.

Sind die Graphitelektroden mit genügend Wasserstoff und Sauerstoff umgeben, so funktioniert die Zelle kurzzeitig als Brennstoffzelle: Wasserstoff und Sauerstoff werden wieder zu Wasser und elektrischer Energie umgewandelt und ein angeschlossener Motor dreht sich.

An den Elektroden verlaufen folgende Reaktionen:



Werden Solarzellen an die Elektrolysekammer angeschlossen, so erkennt man eine erste Gasbildung an den Elektroden bei Zuschaltung der vierten Zelle. Die Zersetzungsspannung liegt etwa bei 2 Volt.

Nutzt man den Solarmotor durch Anpusten als Windturbine (Generator) und schließt ihn an die Elektrolysekammer an, so wird durch die erzeugte elektrische Energie ebenso Wasserstoff und Sauerstoff gebildet. Auch als Verbraucher funktioniert der Solarmotor mit gleicher Drehrichtung des Propellers, da die Polung der Elektroden die gleiche geblieben ist.

Elektrische Energie wird in der Elektrolysezelle als chemische Energie (Wasserstoff und Sauerstoff) gespeichert. Der dadurch gebildete Wasserstoff könnte als Beimischung zu Erdgas über Gaspipelines zu den Verbrauchern transportiert werden, wo er wieder zur „Energieerzeugung“ eingesetzt werden kann. Oder der Wasserstoff wird stationär in Tanks gespeichert und bei Strombedarf z. B. mit Brennstoffzellen wieder in Strom verwandelt. Der Sauerstoff ist ein begehrtes chemisches Reagenz und kann gut verkauft werden (z. B. an Kläranlagen). Man kann den Sauerstoff aber auch an die Luft abgeben und bei Bedarf wieder aus der Luft entnehmen.

2.4.2 Teilexperiment 2: Direkte Speicherung von elektrischer Energie in Kondensatoren

Es stehen im Experimentierkasten insgesamt vier „Gold Cap“-Kondensatoren und acht Solarzellen zur Verfügung, es können also maximal zwei Schülergruppen parallel damit experimentieren.

Der Kondensator ist die einzige Möglichkeit, elektrische Energie direkt in Form von Ladungsträgern zu speichern. In diesem Teilexperiment wird hierzu ein besonders leistungsfähiger „Gold Cap“-Kondensator zur Energiespeicherung verwendet. Dieser Doppelschicht-Kondensator besteht aus zwei Schichten mit Aktivkohle (= Graphit), die durch einen organischen Elektrolyten voneinander getrennt sind. Zum Laden legt man an die beiden Elektroden aus Aktivkohle eine Spannung. Dann wandern die negativen Anionen des Elektrolyten zur positiv aufgeladenen Elektrode und die positiven Kationen zur negativ aufgeladenen Elektrode.

Es bilden sich vor den Kohleelektroden zwei Zonen von unbeweglichen Ladungsträgern unterschiedlichen Vorzeichens. Auf diese Weise entstehen zwei hintereinander geschaltete Kondensatoren, bei denen die Elektroden jeweils aus Graphit bestehen. So erklärt sich der Name Doppelschicht-Kondensator. In der Mitte des Kondensators befindet sich der ionendurchlässige Separator, der einen Kontakt zwischen den Elektroden verhindern soll.

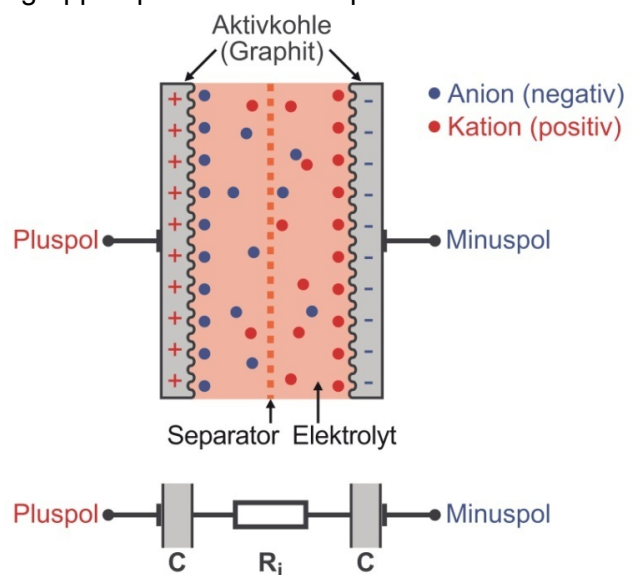


Abb. 1: „Gold Cap“-Kondensator.

Die Kapazität eines Kondensators hängt grundlegend von der Größe der Oberfläche der Elektroden ab. Aufgrund der extrem großen Oberfläche der porösen Aktivkohle hat dieser Kondensatortyp bei kleinstem Volumen höchste Kapazität.

Kondensatoren speichern zugeführte Energie elektrostatisch – also in Form von Elektronen – im Gegensatz zu elektrochemischen Energiespeichern (Batterie, Akku).

Wird der Kondensator für jeweils eine Minute mit vier Solarzellen in Reihenschaltung geladen, so läuft der Solarmotor etwa 2 Minuten und die Leuchtdiode leuchtet etwa 10 Minuten, was durch einen geringeren Stromverbrauch der Leuchtdiode zu erklären ist.

Durch Anpusten des Motors (Windturbine) wird der Kondensator ebenfalls geladen. Da die Polung bestehen bleibt, dreht sich der Motor beim Entladen des Kondensators in der gleichen Richtung weiter. Bei kräftigem Pusten für z. B. fünf Sekunden und kurzem Anhalten des Propellers sollte sich der Motor auch anschließend fünf Sekunden weiterdrehen.

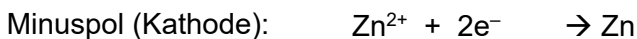
Kondensatoren könnten z. B. in Fahrrädern, die zusätzlich mit einem Akku und einem Elektromotor ausgestattet sind (sog. „Elektrobikes“), die Bremsenergie speichern, um sie bei Bedarf zur Beschleunigung beim Anfahren wieder abzugeben. Eine Technik, die in Hochgeschwindigkeitszügen sowie in U- und S-Bahn längst genutzt wird.

2.4.3 Telexperiment 3: Speicherung von elektrischer Energie in der Zinkiodid-Zelle (Redox-Flow)

Dieses Telexperiment ist ein Modellversuch für eine Redox-Flow-Zelle, in der die bei der Elektrolyse (endotherme Reaktion) erzeugten Stoffe aus der Reaktionszelle entzogen und in getrennten Tanks gelagert werden. Bei Energiebedarf werden diese Stoffe nach dem Prinzip der Galvanischen Zelle (exotherme Reaktion) wieder zur Produktion von elektrischer Energie umgesetzt.

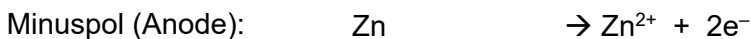
Dieser Zellentyp wird zurzeit für eine Verwendung in Windkraftanlagen erprobt.

Die chemischen Reaktionen beim Laden der Zinkiodid-Zelle:



An der Anode ist nach kurzer Ladezeit eine braune Färbung durch das gebildete Iod zu erkennen. Die Abscheidung von Zink an der Kathode ist nur schwer zu erkennen. Wir arbeiten bei unserem Modellversuch mit einem stationären Gel-Elektrolyt. In echten Redox-Flow-Zellen entstehen an Kathode und Anode lösliche Stoffe, die als Flüssigkeit in getrennte Tanks gepumpt und problemlos gelagert werden können. Die Tanks sind billig und die Speichermengen beliebig groß. Darüber hinaus sind bei diesem System theoretisch beliebig viele Lade-/Entladezyklen möglich.

Die chemischen Reaktionen beim Entladen der Zinkiodid-Zelle lautet:



Hinweis: Lädt man die Zinkiodid-Zelle sehr stark und sehr oft nacheinander auf, verschwindet die braune Iodfärbung auch beim Entladen nicht mehr, was manche Lehrkräfte aus didaktischen Gründen stört. Dies ist aber kein dauerhafter Effekt (siehe dazu im Kapitel 4.5.2).

Die Drehrichtung des Motors ändert sich nicht, da die Polung sich nicht geändert hat. Bei guter Sonneneinstrahlung läuft der Motor etwa zwei Minuten bei einer Ladezeit von einer Minute.

2.5 Durchführungsvarianten

Die verschiedenen Telexperimente können zum Beispiel von unterschiedlichen Gruppen durchgeführt werden.

Bei ausreichender Zeit sollten die Gruppen die Materialien tauschen und die Experimente der anderen Gruppen durchführen. Wichtig ist vor allem der Vergleich der Ergebnisse der Gruppen untereinander.

3 Ergänzende Informationen zum Experiment

Zur Vorbereitung bzw. zur Vertiefung dieses Experiments finden Sie ergänzende Medien auf dem Medienportal der Siemens Stiftung: <https://medienportal.siemens-stiftung.org>
(Unter anderem finden Sie dort Animationen zur Elektrolyse des Wassers und zur Funktionsweise der Brennstoffzelle)

Zum Weiterforschen:

Weitere Experimentiermöglichkeiten: Ergänzend zu den bereits vorgestellten Speichersystemen könnte mit einfachen Mitteln auch die Funktion von Wasserspeicherkraftwerken und Druckluftspeicherkraftwerken behandelt werden.

- Wasserspeicherkraftwerke: Ein mit Wasser gefüllter Behälter wird auf einen Schrank gehoben. Das über einen Schlauch ablaufende Wasser treibt eine Wasserturbine an.
- Druckluftspeicherkraftwerk: Ein Ballon wird aufgeblasen und zum Antrieb einer Windturbine genutzt.

4 Hinweise zur Durchführung der Telexperimente

4.1 Räumlichkeiten

Es sind keine besonderen Räumlichkeiten notwendig.

4.2 Zeitbedarf

	Vorbereitung, Durchführung, Auswertung und Besprechung
Telexperiment 1	60 min
Telexperiment 2	60 min
Telexperiment 3	60 min
Durchführung aller Experimente en bloc	180 min

4.3 Sicherheitsaspekte

Die Versuche dürfen nur bei Anwesenheit und unter Aufsicht der Lehrkraft durchgeführt werden. Die Schülerinnen und Schüler sind darauf hinzuweisen, dass die bereitgestellten Materialien nur entsprechend den jeweiligen Anweisungen eingesetzt werden dürfen.

Bei diesen Experimenten achten Sie bitte auf folgende mögliche Gefahren und machen Sie auch Ihre Schülerinnen und Schüler darauf aufmerksam:

- Beim Telexperiment 1 müssen die Schülerinnen und Schüler Schutzbrillen tragen. Weisen Sie die Schülerinnen und Schüler auf Maßnahmen zur ersten Hilfe bei Spritzern von Natriumcarbonat bzw. Sodalösung ins Auge oder auf die Haut hin (sofortiges Aus- bzw. Abspülen mit Wasser reicht aus).

Nach internationaler Gefahrstoffkennzeichnung GHS: „Achtung“



H-Sätze: H319
P-Sätze: P260, P305+ P351 +P338

- Es besteht Verbrennungsgefahr und Brandgefahr beim Arbeiten mit Feuer. Vor der ersten Benutzung der Feuerzeuge sind diese von der Lehrkraft auf ordnungsgemäße Funktion zu überprüfen, insbesondere die Regulierung der Flammengröße.
- Befüllte Elektrolysezellen müssen sachgerecht entsorgt werden. Am besten wird die Sodalösung von der Lehrkraft wieder eingesammelt, denn sie kann immer wieder verwendet werden.
- Telexperiment 3: Die Zinkiodid-Zelle darf nicht zerlegt werden, sie ist dann nicht mehr funktionsfähig und es könnten Chemikalien, die Reizungen hervorrufen, austreten.

4.4 Benötigte Materialien

Die richtige Verkabelung und die richtige Benutzung von Multimeter, LEDs und Motor sollten je nach Kenntnissstand der Schülerinnen und Schüler von der Lehrkraft vorab erklärt, ggf. demonstriert werden. Sicherheitsrelevante Materialien und Geräte sind vor Aushändigung an die Schülerinnen und Schüler auf ihre ordnungsgemäße Funktion zu testen.

Für **eine** Schülergruppe werden folgende Materialien benötigt:

Material	Anzahl
Akku, 9 V*	1
Digitalmultimeter	1
Doppelpropeller für Solarmotor klein	1
Einweghahn (passend zu Schlauch 7/4 mm und Luer Lock)	2
Elektrolysezelle**	1
Feuerzeug (wenn möglich ein Stabfeuerzeug) bzw. Streichhölzer	1
Gummiband	4
Kondensator Gold Cap, 0,22 F	1
LED rot (rotes Gehäuse), 5 V	1
Messkabel-Set Banane/Kroko, je rot und schwarz	1
Pappstreifen für die Montage der Solarzellen	nach Bedarf
Pflanzenclip (als Reagenzglasständer)	2
Reagenzglas aus Kunststoff (PP), mini	2
Schere	1
Schutzbrille	1

Material	Anzahl
Falls kein ausreichendes Sonnenlicht zur Verfügung steht, sollten helle Schreibtischlampen o. Ä. zur Verfügung stehen.	bei Bedarf
Silikonschlauch 7/4 mm, 3,5 m (passend zu Luer Lock) (beim ersten Mal 3,5-cm-Stücke abschneiden)	1
Sodalösung: Aus Sicherheitsgründen sollte die Lehrkraft am besten selbst vor Versuchsbeginn ca. 500 ml gesättigte Sodalösung in einem geeigneten Vorratsgefäß ansetzen (siehe auch Hinweis nach der Materialliste).	nach Bedarf
Solarmotor klein, Glockenanker, 0,1 V/2 mA	1
Solarzelle, 0,5 V/150 mA	4
Spritze Luer Lock, 10 ml (als Auffanggefäß)	3
Uhr (eine Armbanduhr mit Sekundenanzeige genügt)	1
Verbindungskabel Kroko/Kroko	7
Waschsoda (Natriumcarbonat), Packung***	1
Zinkiodid-Zelle	1

*Die Akkus müssen aufgeladen sein und sollten nach Gebrauch sofort wieder geladen werden.

**Die Elektrolysezelle ist als Teil-Set (Becher, 2 Graphitelektroden, 2 Drahtstücke, 2 Schlauchabschnitte) erhältlich und muss von der ersten Schülergruppe noch montiert werden (Anleitung im Teil für Schülerinnen und Schüler).

*****Hinweis:** Ein Selbstansatz der für das Experiment erforderlichen Sodalösung durch die Schülerinnen und Schüler erscheint wenig sinnvoll. Zumal die Lösung immer wiederverwendet werden kann. Zur Vorbereitung von Teilexperiment 4 sollten deshalb von der Lehrkraft etwa 500 ml gesättigte Natriumcarbonat-Lösung hergestellt werden. (Bei 20 °C lösen sich maximal 217 g Natriumcarbonat in einem Liter Wasser).

Die Lösung sollte in einem gut verschließbaren Gefäß bereitgestellt werden. Nach der Durchführung der Experimente kann dann die Natriumcarbonat-Lösung von den Schülerinnen und Schülern zur weiteren Verwendung in das verschließbare Vorratsgefäß zurück gegossen werden.



Abb. 1: Geräte bzw. Materialien für eine Schülergruppe, beispielhafte Abbildung.

4.5 Aufräumen, Entsorgen, Recyceln

4.5.1 Allgemein

Fast alle verwendeten Geräte und Materialien sind wiederverwendbar. Daher sollten sie nach Beendigung des jeweiligen Experiments ordentlich aufgeräumt werden. So stellen Sie sicher, dass Sie bzw. Ihre Kolleginnen und Kollegen beim nächsten Einsatz alles schnell wiederfinden. Geräte, die beim Experimentieren verschmutzt wurden, wie z. B. Becher, Schalen, Löffel, Reagenzgläser, sollten vor dem Zurücklegen erst gereinigt werden. Sinnvollerweise lässt man dies die Schülerinnen und Schüler gleich nach Beendigung des Experiments erledigen.

Stellen Sie zudem sicher, dass die Geräte wieder für den nächsten Einsatz betriebsbereit sind. Beispielsweise sind benutzte Akkus gleich aufzuladen (Auch bei längerer Nichtbenutzung ist das Aufladen der Akkus sinnvoll.).

Materialien, die nicht wiederverwendbar sind, wie z. B. gebrauchte pH-Messstäbchen oder Filterpapier, sollten fachgerecht entsorgt werden.

Die Entsorgung der in diesem Experiment anfallenden Abfälle kann über den normalen Hausmüll bzw. den Ausguss erfolgen.

4.5.2 Zur Regeneration der Zinkiodid-Zelle

Wird die Zinkiodid Zelle geladen, bilden sich atomares Iod und Zink. Besonders das gebildete Iod ist als braune „Wolke“ um die positive Elektrode gut sichtbar. Dieses Phänomen ist didaktisch sehr wertvoll, da man sofort ein Ergebnis des Aufladevorgangs sehen kann. Beim Entladen der Zinkiodid-Zelle mit dem Elektromotor verschwindet jedoch die Braunfärbung durch das Iod nicht vollständig. Um das Entladen und damit die Entfärbung zu beschleunigen, sollte man deshalb die beiden Elektroden der Zelle mit einem Kroko-Verbindungskabel kurzschließen. Je nach Ladungszustand der Zelle dauert es dann noch einige Stunden bis maximal drei Tage bis zur kompletten Entfärbung. Der Grund für diese langsame Entladung ist: Das Iod diffundiert zu weit von der Elektrode weg, um von ihr wieder zu I^- (farblos) reduziert werden zu können. Es dauert also relativ lange, bis das diffundierende Iod auf Zink-Metallteilchen trifft (interner Kurzschluss) und mit diesen wieder zu farblosem Zinkiodid reagiert. Notfalls muss man aber nicht tagelang warten, bis man das Experiment wiederholen kann. Auch dann, wenn noch eine Braunfärbung vorhanden ist, lässt sich die Zelle jederzeit auf- und entladen (man verzichtet dabei nur auf den deutlichen Farbeffekt).