

A1 Elektrischer Strom aus Solarzellen – Wir bauen eine Farbstoffzelle

Das Experiment eignet sich besonders gut für den Einstieg in das Thema Solarzellen, da im Unterschied zu Experimenten mit fertigen Siliziumzellen die prinzipielle Wirkungsweise von Solarzellen für die Schülerinnen und Schüler praktisch erfahrbar wird. Im Chemieunterricht lassen sich anhand der Experimente die Kenntnisse aus dem Bohr'schen Atommodell (Energienstufen bzw. Anregungen von Elektronen) verifizieren und auch die Kenntnisse aus dem Gebiet Redoxchemie anwenden. Im Biologieunterricht können die Experimente mit der Farbstoffzelle bestens zur Einführung oder zur Illustration des Themas Photosynthese eingesetzt werden. Die Experimente sind nicht wirklich schwierig, setzen aber sorgfältiges Arbeiten voraus. Mit geübten Schülerinnen und Schülern sind alle drei Teilversuche leicht in der vorgesehenen Zeit von ca. 45 min durchzuführen. Bei ungeübteren Schülerinnen und Schülern sollte man mehr Zeit einplanen, bzw. man könnte ggf. auch die Teilversuche 2 und 3 weglassen. Sehr gut eignet sich das Experiment auch zum Einsatz während eines Projekttags zum Thema Regenerative Energien.

1 Zentrale Fragestellung

Die Umwandlung der Sonnenenergie in chemische Energie nach dem Prinzip der Photosynthese wird seit Jahrzehnten von Naturwissenschaftlern erforscht. Nach der bereits seit 1958 eingesetzten Siliziumsolarzelle ist es nun mit der Grätzelzelle, die von ihrem Entwickler Michael Grätzel 1992 zum Patent angemeldet wurde, gelungen, die Energie des Sonnenlichts mithilfe von Farbstoffen in elektrische Energie umzuwandeln. Wenn dies großtechnisch gelingt, wäre das die günstigste Methode, Strom aus Sonnenlicht zu gewinnen.

Die hier vorgeschlagenen Experimente beschäftigen sich mit folgenden Fragen:

- Wie ist eine Grätzelzelle aufgebaut und wie funktioniert sie?
- Wie kann man die Leistung einer Grätzelzelle bestimmen und ihre Leistung verbessern?
- Welche Vorgänge sind bei Grätzelzelle und Photosynthese vergleichbar?

2 Einordnung des Experiments in den Unterrichtszusammenhang

2.1 Fachliche Grundlagen

Die Grätzelzelle ermöglicht die Umwandlung von Strahlungsenergie des Lichts in elektrische Energie. Die dabei ablaufenden Prozesse der Energieumwandlung und des Elektronentransfers sind Teil der Basiskonzepte des naturwissenschaftlichen Unterrichts.

Die Schülerinnen und Schüler können die Energieumwandlung und den Elektronentransfer experimentell nachvollziehen und den Einfluss verschiedener Materialien und Bedingungen auf die Leistung der Zelle überprüfen.

Die Grätzelzelle kann als Funktionsmodell für die Photosynthese genutzt werden.

2.2 Lehrplanrelevanz

Für die Altersstufe bis 14 Jahre sollte die Funktionsweise einer Grätzelzelle nur qualitativ oder halbquantitativ behandelt werden. Als qualitatives Zwei-Elektrodenmodell eignet sich die Grätzelzelle gut zur Erklärung aller Solarzellenprozesse. Darüber hinaus kann man sie bereits für die Altersstufe 13 bis 16 Jahre als Funktionsmodell zum besseren Verständnis der Photosynthese einsetzen (Energieumwandlung von Lichtenergie in elektrische bzw. chemische Energie).

Wenn das Energienstufenmodell, das Elektronen-Donator-Akzeptor-Prinzip und die Basisbegriffe der Elektrizitätslehre (Spannung, Stromstärke und Leistung) bekannt sind, können die einzelnen

Reaktionsschritte in der Grätzelzelle detaillierter besprochen und der Einfluss der verschiedenen Materialien und Bedingungen auf die Leistung der Zelle quantitativ bestimmt werden.

Die Grätzelzelle bietet sich in den folgenden Themenbereichen hervorragend für einen fächerübergreifenden Unterricht in Biologie, Chemie und Physik an:

- Erneuerbare Energien und Energieumwandlung (Sonnenenergie in elektrische Energie)
- Energiestufenmodell (Photonen befördern Elektronen auf höhere Energieniveaus)
- Licht- und Absorptionsspektren (Wellenlänge und Energie des eingestrahlt und absorbierten Lichts)
- Elektrizitätslehre (Halbleiter, Spannung, Stromstärke, Parallel- und Serienschaltung, Leistung in Abhängigkeit von eingesetzten Materialien und Schaltungen)
- Redox-Reaktionen (Elektronentransfer)
- Photosynthese (Umwandlung von Solarenergie in chemische Energie)

Damit einhergehend lassen sich auch zahlreiche Bezüge zu ausgewählten Werten wie *Nachhaltigkeit*, *Umweltbewusstsein*, *Eigenaktivität* und die *Offenheit* gegenüber Phänomenen aus dem Energiebereich herstellen.

Themen und Begriffe: Absorptionsspektren, Elektronenabgabe, Elektronenaufnahme, Elektrolyte, Elektronentransfer, Energiestufenmodell, Elektronen-Donator-Akzeptor-Prinzip, Farbstoff, Farbstoffzelle, Halbleiter, Licht, Lichtenergie, Lichtspektrum, Reduktion von Iod zu Iodid, Strahlungsenergie, UV-Strahlung, Wellenlänge

2.3 Kompetenzen

Die Schülerinnen und Schüler ...

- beschreibenden Aufbau und die Funktionsweise einer Grätzelzelle.
- bauen selbst eine Grätzelzelle.
- ermitteln den Einfluss von verschiedenen Materialien und Bedingungen auf die Leistung der Grätzelzelle experimentell.
- beschreiben vergleichbare Reaktionsschritte in der Grätzelzelle und bei der Photosynthese.

2.4 Das Experiment im Erklärungszusammenhang

Die Teilexperimente können entsprechend den Vorkenntnissen der Schülerinnen und Schüler in verschiedenen Anspruchsniveaus durchgeführt werden:

- Aufbau einer Grätzelzelle und experimenteller Nachweis der Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Die Schülerinnen und Schüler erkennen: Es braucht zwei Elektrodenmaterialien mit den Eigenschaften „Elektronenabgabe unter Lichteinfluss“ und „Elektronenaufnahme“, damit der Umwandlungsprozess zustande kommen kann.
- Forschendes Experimentieren, um den Einfluss verschiedener Materialien und Bedingungen auf die Leistung der Zelle zu testen und die einzelnen Teilreaktionen in der Zelle zu verstehen.
- Fächerübergreifender Ansatz unter Einbeziehung eines Vergleichs zwischen der Funktionsweise der Grätzelzelle, der Photosynthese und der Solarzelle

2.4.1 Bau einer Farbstoffsolarzelle

Die Grätzelzelle ermöglicht die Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie und nutzt dabei nach dem Prinzip der Photosynthese pflanzliche Farbstoffe zur Lichtabsorption.

Die Trägerschicht der Zelle besteht aus zwei beschichteten Glasplatten (Anode und Kathode), die jeweils auf einer Seite eine leitfähige TCO-Schicht (Transparent Conducting Oxide) besitzen.

Am Minuspol (Anode) ist die TCO-Schicht noch zusätzlich mit Titandioxid beschichtet und mit einem Anthocyan-Farbstoff getränkt.

Am Pluspol (Kathode) wird die Leitfähigkeit der TCO-Schicht durch Auftragen einer dünnen Graphit-Schicht verbessert.

Bevor die beiden leitfähigen Seiten von Anode und Kathode aufeinander gelegt werden, gibt man noch zwei Tropfen Iodtinktur (Iod/Kaliumiodid-Lösung) auf die Anodenseite.

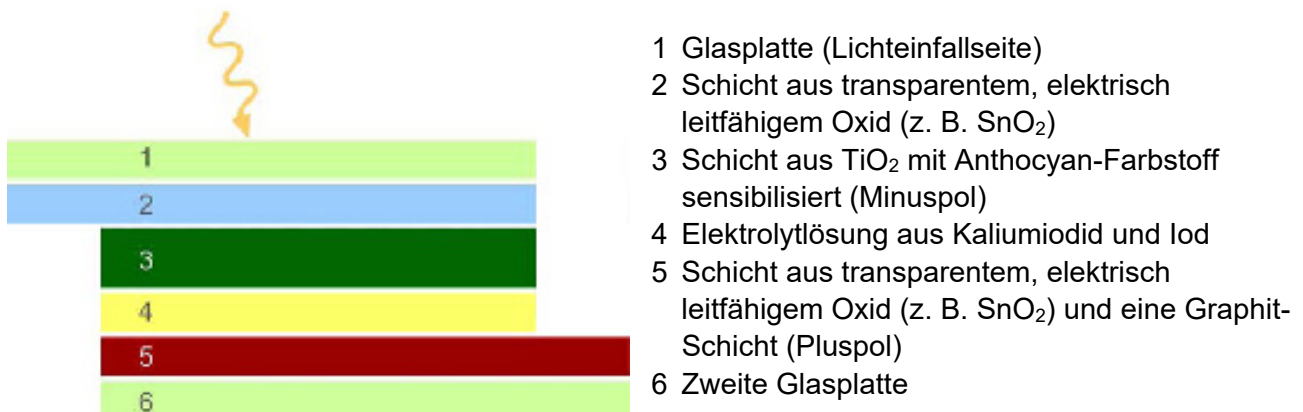


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Grätzelzelle.

2.4.2 Leistung der Grätzelzelle bei verschiedenen Beleuchtungsstärken

Die Farbstoffzelle nach Grätzel besteht, wie jede Solarzelle, aus zwei Elektroden, die durch eine Grenzschicht voneinander getrennt sind. Die erste Elektrode kann bei Lichteinstrahlung Elektronen freisetzen, die zweite Elektrode kann Elektronen aufnehmen. Dieses Prinzip hat die Farbstoffzelle gemeinsam mit allen anderen Solarzellen, wie z. B. den Siliziumzellen. Im Fall der Grätzelzelle fließen bei Lichteinfall die Elektronen jedoch direkt über den äußeren Stromkreis zur zweiten Elektrode. Dort treffen sie in der Grenzschicht zwischen den beiden Elektroden wieder auf positive Ladungsträger. So schließt sich über den inneren Stromkreis der Farbstoffzelle der Gesamtstromkreis.

2.4.3 Größere Spannungen durch mehrere Grätzelzellen

Die Funktionsweise lässt sich in folgenden miteinander verknüpften Teilschritten erklären:

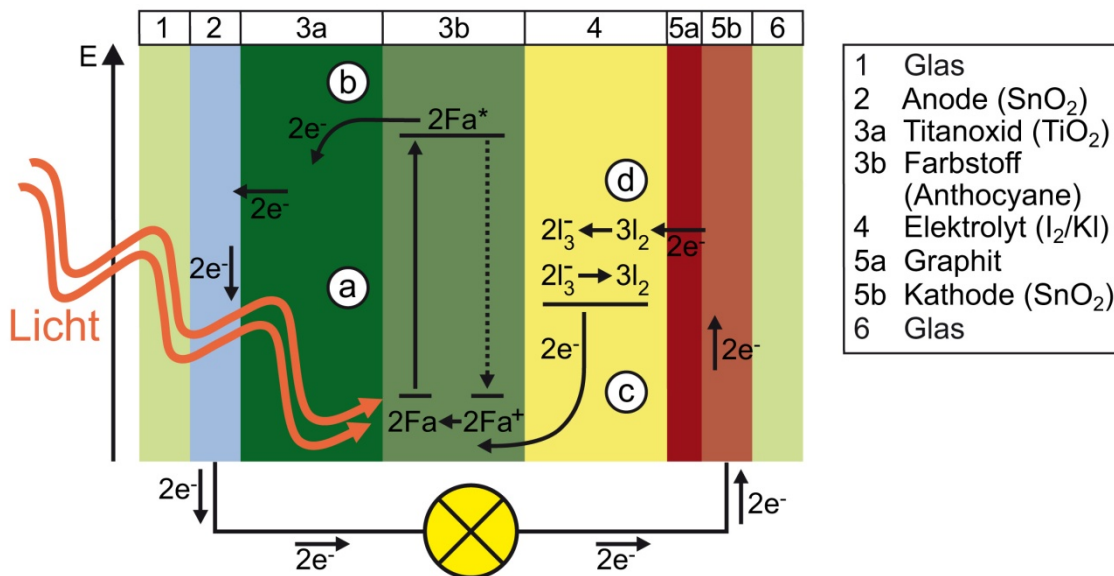


Abb. 2: Funktionsweise einer Grätzelzelle.

- Die Farbstoffmoleküle (Fa) absorbieren Licht einer bestimmten Wellenlänge. Die dabei aufgenommene Energie dient zur Anhebung von Elektronen auf ein höheres Energieniveau (Fa*).
$$2 \text{ Fa} + \text{Lichtenergie} \rightarrow 2 \text{ Fa}^*$$
- Aus diesem höheren Energieniveau können die energiereichen Elektronen des Farbstoffs in das Leitungsband des Titandioxids übertragen werden. Die Farbstoffmoleküle sind jetzt einfach positiv und das Titandioxid einfach negativ geladen.
$$2 \text{ Fa}^* \rightarrow 2 \text{ Fa}^+ + 2 \text{ e}^- \quad \rightarrow \quad 2 \text{ TiO}_2 + 2 \text{ e}^- \rightarrow 2 \text{ TiO}_2^-$$
- Der Elektronenfluss ist nur möglich, weil der Elektronenverlust der Farbstoff-Moleküle durch Iodid-Moleküle ausgeglichen wird.
$$2 \text{ I}_3^- \rightarrow 3 \text{ I}_2 + 2 \text{ e}^- \quad \rightarrow \quad 2 \text{ Fa}^+ + 2 \text{ e}^- \rightarrow 2 \text{ Fa}$$
- Die energiereichen Elektronen fließen in einem äußeren Stromkreis von der Anode zur Kathode und können dabei an einen eventuellen Verbraucher Energie abgeben. Die an der Kathode (TCO- und Graphit-Schicht) ankommenden Elektronen reduzieren Iod-Moleküle wieder zu Iodid-Ionen, womit der Stromkreis geschlossen wird.
$$3 \text{ I}_2 + 2 \text{ e}^- \rightarrow 2 \text{ I}_3^-$$

Durch die Anordnung der einzelnen Elektronentransfer-Systeme können die Elektronen nur in einer Richtung fließen. Beispiel für Versuchsergebnisse:

Lichtquelle	Spannung in mV	Stromstärke in mA	Leistung in mW
Direktes Sonnenlicht	400	0,6	0,24
Overhead-Projektor	350	0,4	0,14

2.5 Durchführungsvarianten

Die Schülerinnen und Schüler können in Gruppen arbeiten und sich zunächst mit dem Aufbau und dem Funktionsprinzip einer Grätzelzelle vertraut machen. In einem zweiten Schritt kann zum Weiterforschen der Einfluss verschiedener Farbstoffe auf die Leistung einer Zelle untersucht werden. Das Ziel könnte der Betrieb eines leistungsschwachen Gerätes (Taschenrechner oder Solarmotor) mit einer entsprechenden Anzahl und Anordnung von Grätzelzellen sein. Im Projektunterricht oder beim Lernen an Stationen kann der Aufbau und das Funktionsprinzip der Grätzelzelle in einer Gruppe erarbeitet und anschließend in der Klasse vorgestellt werden. Die einzelnen Teilreaktionen in der Zelle können auch in Expertengruppen erarbeitet und anschließend in der Lerngruppe zu einer Gesamtdarstellung zusammengefügt werden. Interessant wird die fächerübergreifende Behandlung der Grätzelzelle für die Altersstufe ab 16 Jahre. In Expertengruppen könnten jeweils die Funktionsweise der Photosynthese (Biologie), der Grätzelzelle (Chemie) und der Solarzelle (Physik) erarbeitet und dann in der gesamten Lerngruppe vorgestellt und verglichen werden.

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>

4 Hinweise zur Durchführung der Teilexperimente

4.1 Räumlichkeiten

Es sind keine besonderen Räumlichkeiten notwendig.

Direktes Sonnenlicht oder eine starke künstliche Lichtquelle muss zur Verfügung stehen.

4.2 Zeitbedarf

- ca. 45 min für Aufbau und Funktionstest der Zelle (Teilexperimente 1, 2 und 3).
- ca. 90 min für das forschende Experimentieren mit verschiedenen Materialien (Varianten).
- ca. 15 min bis 45 min für die Besprechung der Ergebnisse. Weitere ca. 120 min für eine fächerübergreifende Behandlung inklusive Photosynthese.

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:

- Heißes Wasser zur Bereitung des Tees sollte im Normalfall immer von der Lehrkraft bereitgestellt werden.
- Iod ist nur bei Aufnahme großer Mengen in den Körper gesundheitsschädlich (Einnehmen, Einatmen, Hautkontakt). In kleinen Mengen wird es nach wie vor in der Medizin zur Desinfektion verwendet. Allergiker sollten auf jeden Fall den Hautkontakt vermeiden! Die Iodtinktur sollte von der Lehrkraft auf die vorbereitete Glasplatte getropft werden.

Nach internationaler Gefahrstoffkennzeichnung GHS: „Achtung“

H-Sätze: H373
P-Sätze: P260, P314



4.4 Benötigte Materialien

Die richtige Verkabelung und die richtige Benutzung von Multimeter, LEDs und Motor sollten je nach Kenntnistand der Schülerinnen und Schüler von der Lehrkraft vorab erklärt, ggf. demonstriert werden.

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

Material	Anzahl
Becherglas oder Tasse	1
Bleistift, weich (6B)	1
Digitalmultimeter	1
Glaselektrode für Farbstoffzelle (SnO, klar)	1
Glaselektrode für Farbstoffzelle (TiO ₂ , weiß)	1
Helle Schreibtischlampen	nach Bedarf
Hibiskusteebeutel (als Farbstoff für Solarzelle)	1 für die ganze Klasse
Hibiskus-Tee bereiten: Eine halbe Tasse konzentrierter(!) Hibiskus-Tee wird am besten von der Lehrkraft vorab bereitet und kann dann bereits abgekühlt ins Klassenzimmer mitgebracht werden. Aufbewahren des Tees über Tage oder Wochen ist nicht möglich, da dann der Farbstoff seine Wirkung verliert. Zur Herstellung des konzentrierten Tees müssen 2 Beutel mit 100 ml kochendem Wasser übergossen werden. Beim Herausnehmen der Beutel diese gut ausdrücken.	ca. 10 ml
Iod/Kaliumiodid-Lösung („Iodtinktur“), Tropffläschchen	1
Klammer (Aktenklammer)	2
Messkabel-Set Banane/Kroko, je rot und schwarz	1
Evtl. je nach Versuchsvarianten: Obst oder Obstsäfte (z. B. Brombeere, Himbeere, Kirsche, schwarze Johannisbeere). Die Säfte von Brombeeren, Holunder, schwarzer Johannisbeere und anderen Anthocyane-haltigen Stoffen können auch portionsweise eingefroren aufbewahrt werden.	nach Bedarf
Overheadfolienschreiber, Filzstift, Faserschreiber o. Ä.	1
Papiertücher	nach Bedarf
Schraubdeckel (für Becher 100 ml) oder Petrischale	1
Spritze (konische Spitze), 5 ml (als Pipette)	1
Verbindungskabel Kroko/Kroko	4
Wasserkocher	1



Abb. 3: Materialien für eine Schülergruppe, beispielhafte Abbildung.

4.5 Aufräumen, Entsorgen, Recyceln

Fast alle verwendeten Geräte und Materialien sind wiederverwendbar. Daher sollten sie nach Beendigung des jeweiligen Experiments wieder ordentlich aufgeräumt werden. So wird sichergestellt, 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.

Haltbarkeit und Regeneration der angefertigten Grätzelzellen

In der Anleitung wird davon ausgegangen, dass bereits angesetzte Iod/Kaliumiodid-Lösung verwendet wird. Stattdessen kann auch selbst eine Lösung angesetzt werden: Iod/Lithiumiodidlösung (Zusammensetzung: Lithiumiodid (LiI) 0,5 mol/l und Iod (I_2) 0,05 mol/l).

Werden die angefertigten Solarzellen kühl und dunkel gelagert, können sie mindestens eine Woche funktionsfähig bleiben. Starke Lichtquellen, z. B. Overheadprojektoren, führen schneller zum Austrocknen der Zellen. Diese können mit einem Tropfen Elektrolytlösung wieder aktiviert werden. Zum vollständigen Regenerieren wird folgendermaßen vorgegangen:

Zunächst wird die negative Elektrode (die mit der eingefärbten Titanoxidschicht) mit destilliertem Wasser abgespült. Dann wird sie zum Entfärben in eine Schale mit destilliertem Wasser eingelegt und in die Sonne gestellt (z. B. auf eine Fensterbank). Die Ultraviolettstrahlung im Tageslicht sorgt für die Entfärbung, da die organischen Bestandteile des Farbstoffs zerstört werden.

Wenn die Titandioxidschicht weiß ist, kann die Elektrode aus dem Wasser genommen, mit einem Föhn getrocknet und anschließend wiederverwendet werden.

Bei der Reinigung der positiven Elektrode muss nur der Elektrolyt, nicht aber das Graphit abgewaschen werden. Das Graphit altert nicht und bleibt voll funktionsfähig. Wird das Experiment wiederholt, sollte man trotzdem sicherheitshalber auf der vorhandenen Graphitschicht eine neue Schicht Graphit auftragen.

Achtung: Beim Regenerieren beider Elektroden dürfen diese niemals mit einem Tuch oder gar einer Bürste abgerieben werden. Die empfindlichen Beschichtungen würden zerstört. Um die Trocknung zu beschleunigen, darf man die nassen Elektroden höchstens mit einem weichen Papiertuch oder Watte abtupfen.

Die negativen und die positiven Elektroden sollten getrennt voneinander aufbewahrt werden.