



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

Didaktik der Chemie

# Alternative Solarzellen mit Titandioxid

Diana Zeller/ Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde





# Alternative Solarzellen mit Titandioxid – ALSO TiO<sub>2</sub>

## Inhaltsverzeichnis

### 1. Titandioxid: ein vielseitiger Halbleiter

- Arbeitsblatt: Titandioxid	2
- Arbeitsblatt: Absorption und Reflexion	4
- Versuchsdurchführung: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von Leitern, Nichtleitern und Halbleitern	5
- Arbeitsblatt: Halbleiter	9
- Arbeitsblatt: Bändermodell	11

### 2. Vom galvanischen Element zur 1-Topfzelle

- Versuchsdurchführung: Herstellung der Photoelektroden	14
- Versuchsdurchführung: 2-Topfzelle mit Hilfekarten	16
- Versuchsdurchführung: 1-Topfzelle mit Hilfekarten	25
- Animation: Die photogalvanische Zelle	30
- Leitfaden: Wie plane ich einen Versuch?	35
- Versuchsdurchführung: Photogalvanische Kompaktzelle mit Hilfekarten	36

### 3. Mit Früchten zum elektrischen Strom

- Ansetzen der Farbstofflösungen	43
- Versuchsdurchführung: Photosensibilisierte Kompaktzelle mit Hilfekarten	45
- Arbeitsblatt: Photosensibilisatoren	50
- Arbeitsblatt: Prozesse in der photosensibilisierten Zelle mit Hilfekarten	53



Baustein 1

# Titandioxid - ein vielseitiger Halbleiter

Diana Zeller/ Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde



## Titandioxid, $\text{TiO}_2$

Titandioxid ist ein Allroundtalent der Chemie und ein Stoff des täglichen Lebens. Der Großteil der produzierten Titandioxid-Menge wird als Weißpigment in der Farbindustrie, als Lebensmittelzusatzstoff E171 oder in anderen weißgefärbten Gegenständen eingesetzt. In Sonnencremes dient Titandioxid als **UV-Absorber** und wirkt in Kosmetika antibakteriell. Titandioxid ist ein industrielles Massenprodukt, das kostengünstig in großen Mengen erworben werden kann.



Abb. 1 Nanoskaliges Titandioxid-Pulver, P25

Aus Sicht der Forschung ist Titandioxid jedoch ein Stoff, der auch Lösungen zu Fragen der Nachhaltigkeit und zukünftigen Energieversorgung bietet. So können die **halbleitenden Eigenschaften** von Titandioxid in alternativen Solarzellen genutzt werden, um die Lichtenergie der Sonne in nutzbare elektrische Energie umzuwandeln. Ebenso wird in der Forschung an den **photokatalytischen Eigenschaften** Titandioxids für die Luft- und Abwasserreinigung geforscht. Mit Hilfe von Titandioxid und dem einstrahlenden Sonnenlicht können bei der Photokatalyse große organische Moleküle wie Farbstoffe oxidativ zersetzt werden.

### Farbpartikel vs. Nanopartikel

Titandioxid ist ein farbloses, geschmacks- und geruchloses Pulver, das chemisch, mechanisch und thermisch sehr stabil ist. Es ist unlöslich in Wasser und nur sehr schwer löslich in heißen, konzentrierten Säuren. Zwei Modifikationen von Titandioxid werden in der Industrie am häufigsten eingesetzt: Rutil und Anatas. Die Modifikationen unterscheiden sich in der räumlichen Verknüpfung der Atome im Kristall. Rutil wird in der Farbindustrie als Pigment eingesetzt. Diese Pigmentpartikel besitzen eine Größe zwischen  $0,2\ \mu\text{m}$  und  $0,3\ \mu\text{m}$ , es handelt sich demnach um **Mikropartikel**.

Titandioxid in der photoaktiveren Anatas-Modifikation wird verwendet, wenn photochemische Prozesse (d.h. die Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie) erfolgen sollen. Zum Beispiel wird in den alternativen Solarzellen Anatas als **Nanopartikel** eingesetzt. Diese haben nur ein Zehntel der Größe der Pigmentpartikel. Evonik P25 besitzt eine mittlere Partikelgröße von unter  $21\text{nm}$ . Die einzelnen Nanopartikel bilden sofort Agglomerate, die über mehrere Hundert Nanometer groß sind. Diese Agglomerate lassen sich in Aufnahmen einer gesinterten Titandioxid-Photoelektrode mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) erkennen [1]. Die Titandioxid-Nanopartikel bilden auf dem leitfähigen Glas ein mesoporöses Netzwerk, das dadurch eine große zusammenhängende Oberfläche aufweist.

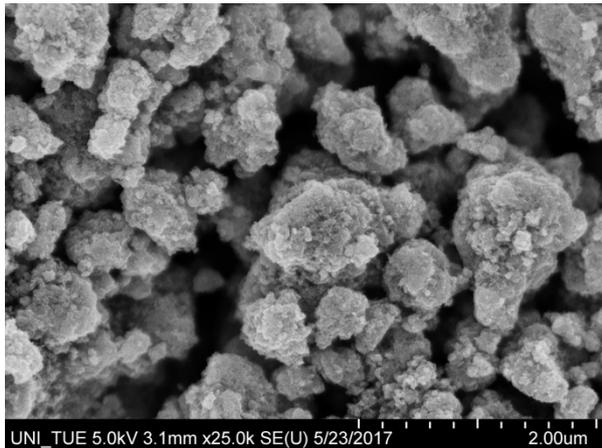


Abb. 2 REM-Aufnahme von Agglomeraten einer Titandioxid-Photoelektrode (P25)

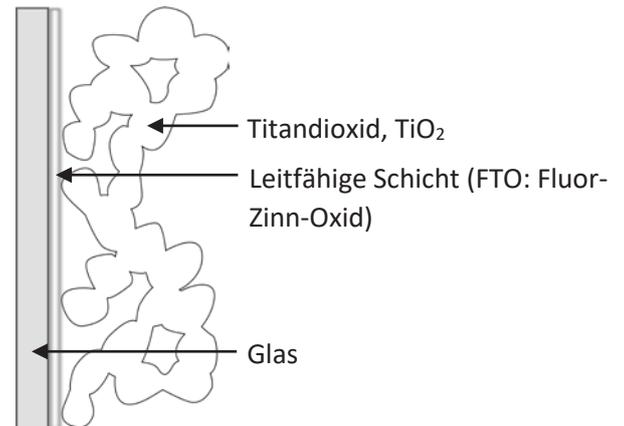


Abb. 3 Schematische Darstellung eines Querschnitts einer Titandioxid-Photoelektrode

### Titandioxid vs. Silicium

Aktuell machen auf dem Halbleiter **Silicium** basierte Solarzellen über 90% des Marktanteils aus. Ein Vorteil ist dabei, dass Silicium das zweithäufigste Element in der Erdkruste ist und zum Beispiel in Sand oder Quarz als Siliciumdioxid gebunden vorliegt. Im Schmelz-Reduktionsofen kann aus Siliciumdioxid sogenanntes Rohsilicium hergestellt werden, das aber für die Verwendung in Solarzellen weiter aufgereinigt werden muss. Im Siemens-Verfahren wird das Rohsilicium zu Reinstsilicium aufgearbeitet. Der Nachteil ist, dass dieser Prozess sehr energieaufwendig ist, sodass seit Jahren nach kostengünstigeren Alternativen zur Silicium-Solarzelle geforscht wird. Eine durchschnittliche Silicium-Solarzelle muss aktuell in Deutschland zwei Jahre im Betrieb gewesen sein, damit die benötigte Herstellungsenergie wieder kompensiert ist. Erst nach den zwei Jahren fährt sie eine positive Energiebilanz. Integriert in die Berechnung wurde auch die Energie, die benötigt wird, um die Silicium-Solarzellen nach dem Ende ihrer Lebensdauer wieder zu recyceln [2].

Die sogenannte „**Grätzel-Zelle**“ war dahingegen ein Durchbruch, weil zum ersten Mal der kostengünstige und in großen Mengen verfügbare Halbleiter Titandioxid ins Spiel gebracht wurde. Die Wirkungsgrade reichen zwar nicht an die Silicium-Solarzelle heran, aber auch heute sind auf Titandioxid basierende Solarzellen ein wichtiger Schwerpunkt der Solarzellenforschung.

[1] Mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) können vergrößerte Abbildungen von Objektflächen erstellt werden. Dabei wird die Oberfläche mit einem Elektronenstrahl nach einem bestimmten Muster gerastert.

[2] Aktuelle Zahlen finden Sie im jährlich erscheinenden „*Photovoltaics Report*“ oder „*Recent Facts about Photovoltaics in Germany*“, herausgegeben vom Fraunhofer Institut ISE.

## Absorption und Reflexion

Titandioxid ist nicht nur in zahlreichen Anwendungsbereichen des Alltags zu finden, sondern auch die Forschung nutzt seine Eigenschaften für innovative Entwicklungen. Zwei Eigenschaften sind für den vielseitigen Einsatz von Titandioxid entscheidend: die Fähigkeit zur **Absorption von UV-Licht** sowie die vollständige **Reflexion von sichtbarem Licht**.

### Absorption von Lichtenergie?

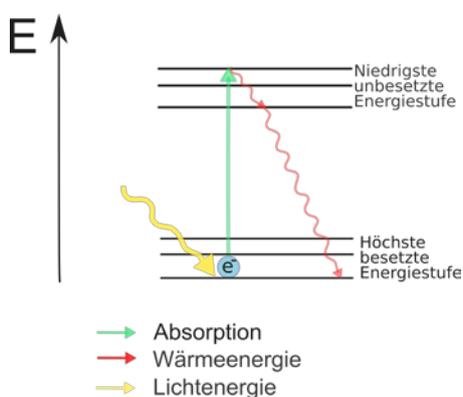


Abb.1

Die Absorption (lat. absorbere = verschlingen, verschlucken) von Lichtenergie bedeutet, dass die eingestrahlte Energie einer Lichtquelle von dem Molekül oder in einem Halbleiter wie Titandioxid aufgenommen wird. Mithilfe des **Energiestufenmodells** (Abb.1) lässt sich die Absorption von Licht verdeutlichen. Die Vorgänge mit Beteiligung von Licht lassen sich angenähert mit nur zwei Energiestufen erklären: der **höchsten besetzten Energiestufe (HBE)** und der **niedrigsten unbesetzten Energiestufe (NUE)**.

Bei Raumtemperatur befinden sich Moleküle normalerweise im elektronischen Grundzustand. Allerdings können Moleküle auch in einem elektronisch angeregten Zustand existieren. Bei der Lichtabsorption werden Elektronen durch die aufgenommene Energie vom HBE ins NUE angehoben. Das Molekül befindet sich im angeregten Zustand. Beim Übergang vom angeregten in den Grundzustand wird die aufgenommene Energie in **Wärmeenergie** umgewandelt.

### Reflexion von Lichtenergie?

Als Reflexion (lat. reflectere = zurückbeugen, zurückdrehen) wird bezeichnet, wenn an einer Oberfläche die eintreffenden Lichtstrahlen zurückgeworfen werden. Titandioxid als Weißpigment absorbiert kein Licht aus dem sichtbaren Spektralbereich und wandelt die Energie nicht in Wärmeenergie um, wohingegen schwarze Pigmente das ganze sichtbare Lichtspektrum absorbieren und in Wärme umwandeln. Weißpigmente reflektieren somit sämtliches Licht aus dem sichtbaren Spektralbereich mit einer **unselektiven Lichtstreuung** (Abb.2). Deshalb ist Titandioxid für das menschliche Auge weiß.

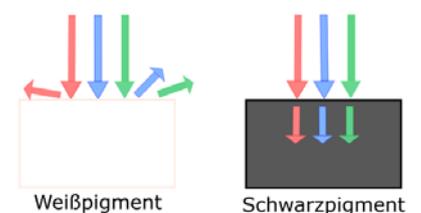


Abb.2



# Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von Metallen, Halbmetallen und Lösungen

## Versuch 1: Leitfähigkeit von Metallen bei Energiezufuhr

Sicherheitshinweise:



Chemikalien:

- Wolfram-Draht einer Glühbirne, W (s)

Materialien:

- Stromquelle
- Multimeter
- 2 Kabel
- 2 Krokodilklemmen
- Feuerzeug



Abb.1

Aufbau:

Bauen Sie den Versuch gemäß Abb.1 auf.

Durchführung:

1. Geben Sie eine Spannung von ca. 5V AC auf den Wolframdraht und messen Sie die **Stromstärke I** [mA] bei Raumtemperatur.
2. Erhitzen Sie vorsichtig den Wolframdraht mit einem Feuerzeug und beobachten Sie die Änderung der Stromstärke.
3. Entfernen Sie das Feuerzeug wieder und beobachten Sie erneut die Änderung der Stromstärke.
4. Wiederholen Sie den Versuch mehrmals.

**Beobachtung:** Stellen Sie Ihre Versuchsergebnisse in der Tabelle auf S. 3 dar.



## Versuch 2: Leitfähigkeit von Halbmetallen bei Energiezufuhr

Sicherheitshinweise:



Chemikalien:

- Stück einer Silicium-Scheibe, Si (s)

Materialien:

- Stromquelle
- Multimeter
- 2 Kabel
- 2 Krokodilklemmen
- Feuerzeug

Aufbau:

Bauen Sie den Versuch gemäß der Abb.2 auf.

Durchführung:

1. Geben Sie eine Spannung von ca. 5V AC auf das Silicium-Stück und messen Sie die **Stromstärke I** [mA] bei Raumtemperatur.
2. Verfahren Sie mit dem Experiment so, wie Sie bereits Versuch 1 durchgeführt haben.

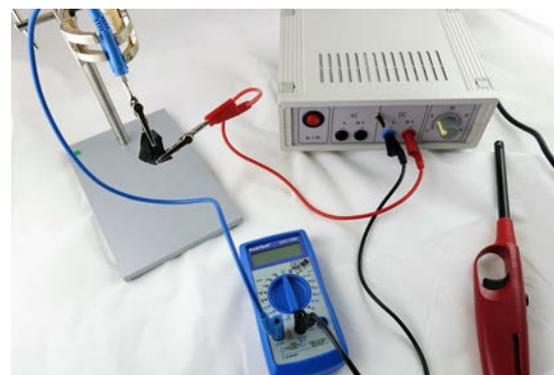


Abb.2

**Beobachtung:** Stellen Sie Ihre Versuchsergebnisse in der Tabelle auf S. 3 dar.

## Versuch 3: Leitfähigkeit von Lösungen bei Energiezufuhr

Sicherheitshinweise:



Chemikalien:

- Kaliumbromid-Lösung, KBr (aq),  $c = 0,1 \text{ mol/L}$
- 2 Graphitelektroden, C (s)

Materialien:

- 250mL Becherglas
- Multimeter
- Stromquelle
- 2 Kabel
- Thermometer
- Heizplatte



**Aufbau:**

Bauen Sie den Versuch gemäß Abb. 3 auf.

**Durchführung:**

1. Füllen Sie das Becherglas mit der Kaliumbromid-Lösung und legen Sie eine Spannung von ca. 5V AC an.
2. Messen Sie die **Stromstärke I** [mA] bei Raumtemperatur.
3. Heizen Sie dann die Lösung auf 80°C und beobachten Sie währenddessen die Stromstärke.
4. Verfolgen Sie die Änderung der Stromstärke beim Abkühlen der Lösung.



**Abb.3**

**Beobachtung:** Stellen Sie Ihre Versuchsergebnisse in der Tabelle auf S. 3 dar.

	Stromstärke bei Raumtemperatur	Veränderung der Stromstärke beim Erwärmen	Ladungsträger, die für die Stromleitung verantwortlich sind	Ladungen der Ladungsträger	Sichtbare stoffliche Veränderungen?
Metall					
Halbleiter					
Lösung					



Auswertung:

1. Vergleichen Sie die Leitfähigkeit des Metalls, des Halbleiters und der Salzlösung.

2. Erklären Sie aufgrund Ihrer Beobachtungen, wie sich der Begriff Halbleiter begründen lässt.

## Halbleiter

Silicium und Titandioxid sind Halbleiter. Die Leitfähigkeit von Halbleitern ist bei Raumtemperatur kaum messbar. Das liegt daran, dass im Gegensatz zu Metallen, in denen die negativ geladenen Elektronen sich um die Atomrümpfe frei bewegen können, bei Raumtemperatur keine freien Ladungsträger vorliegen.

In a) in Abb. 1 wird auf der Teilchenebene dargestellt, wie durch Energiezufuhr in Form von Wärme oder Licht Ladungsträger im Halbleiter entstehen, die **Elektron-Loch-Paare**.

Wie b) zeigt, bestehen diese Elektron-Loch-Paare aus einem angeregten Elektron ( $e^-$ ) und einem positiven Elektronendefizit, dem sogenannten Loch ( $h^+$ ). Beim Anlegen einer Spannung werden Elektronen und Löcher voneinander getrennt und driften in verschiedene Richtungen. Die Elektronen wandern durch den Halbleiter in Richtung Anode (Pluspol). Die positiven Löcher wandern in Richtung Kathode (Minuspol) durch den „Hopping“-Prozess.

Diese Bewegung ist in b) bis d) dargestellt: In b) gleicht ein Valenzelektron eines Nachbaratoms das Loch aus. Dadurch befindet sich nun am Nachbaratom ein Loch, das wiederum durch ein Elektron eines benachbarten Atoms ausgeglichen wird, siehe c). Dieses „Hopping“ findet so lange statt, bis wie in d) dargestellt, das Loch Elektron aus dem äußeren Stromkreis ausgeglichen wird.

Halbleiter leiten somit umso besser elektrische Energie, wenn von außen Energie zugeführt wird, da mehr Elektron-Loch-Paare gebildet werden.

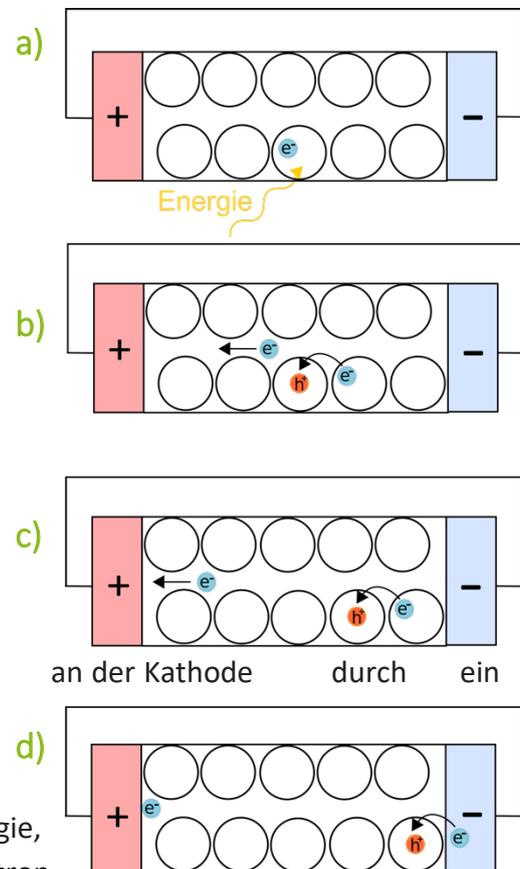


Abb. 1



## Aufgaben:

1. Beschriften Sie die Bildbestandteile a) bis d) mit geeigneten Bildbeschreibungen.
  
2. Vergleichen Sie die Vorgänge der Stromleitung in Halbleitern mit den Vorgängen in Metallen und Salzlösungen.



### Zusatzaufgabe:

Recherchieren Sie zu n- und p-dotierten Halbleitern und beschreiben Sie den Nutzen einer Dotierung des Halbleiters.



## Bändermodell

Photogalvanische Zellen können kein sichtbares Licht, sondern nur das höher energetische UV-Licht in elektrische Energie umwandeln. Doch warum ist das so?

Diese Frage kann durch das Energiebändermodell, kurz Bändermodell, beantwortet werden. Nach dem Bändermodell sind Valenzelektronen von Atomen eines Feststoffgitters dazu in der Lage, verschiedene Energiezustände einnehmen zu können. Die Energiezustände werden im Bändermodell in zwei Bänder unterteilt, das **Valenzband (VB)** und das **Leitungsband (LB)**.

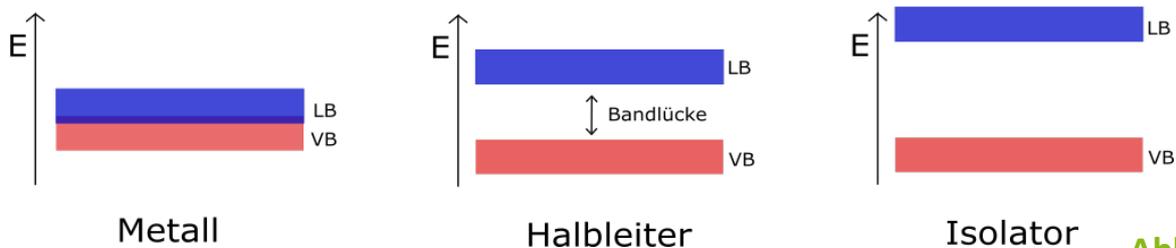


Abb.1

Das **Valenzband** umfasst alle Energiezustände, in denen die Valenzelektronen an einen bestimmten Atomrumpf gebunden sind.

Das **Leitungsband** umfasst dagegen alle Energiezustände freier Elektronen, die nicht einem bestimmten Atomrumpf zugeordnet werden und sich frei durch das Feststoffgitter bewegen können.

Abb. 1 zeigt die Bänder verschiedener Feststoffgitter, die sich voneinander unterscheiden. Bei **Metallen**, die **Leiter** sind, überlappt sich das VB mit dem LB, sodass Valenzelektronen aus dem VB ohne großen Energieaufwand ins LB übergehen können: Aus diesem Grund leitet Metall bereits bei Raumtemperatur Elektrizität. Bei **Isolatoren** wie **Salze** ist die Lücke zwischen VB und LB so groß, dass sie nicht überwunden werden kann. Sie sind nicht leitend. Bei **Halbleitern** gibt es zwischen VB und LB eine **Energielücke** oder **Bandlücke**, abgekürzt  $E_g$ . Erst durch Energiezufuhr können Valenzelektronen die Energielücke überwinden und aus dem VB ins LB übergehen. Daher können Halbleiter umso besser Elektrizität leiten, je mehr Energie durch Bestrahlung oder Erwärmen zugeführt wird. Allerdings ist die Bandlücke bei jedem Halbleiter unterschiedlich groß.



### Aufgaben:

1. Erklären Sie, warum erst die Energie des nahen UV-Bereichs ausreicht, um den Halbleiter Titandioxid anzuregen.

2. Beschreiben Sie mithilfe von Abb. 2 + 3 und unter Bezug auf das Bändermodell, welche Prozesse im Titandioxid-Feststoffgitter bei Bestrahlung mit UV-Licht ablaufen.

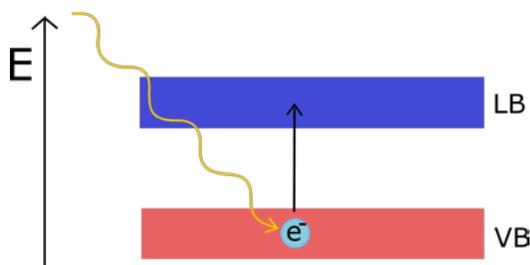


Abb.2

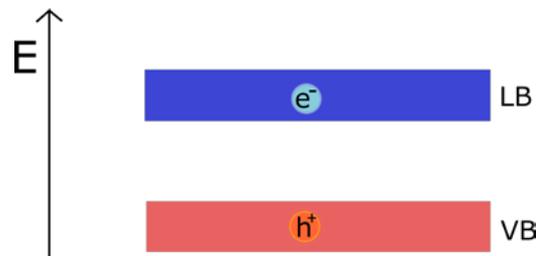


Abb.3



### Zusatzaufgabe:

Berechnen Sie mit Hilfe der angegebenen Formeln die Wellenlänge, die benötigt wird, um Titandioxid anzuregen. Die Bandlücke von Titandioxid beträgt ca. 3,2 eV.

$$\text{Formel: } E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$E = \text{Energie} = 1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$h = \text{Planck'sches Wirkungsquantum (Naturkonstante)} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}$$

$$c = \text{Lichtgeschwindigkeit} = 2,99 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\lambda = \text{Wellenlänge} = \text{wird gesucht}$$



Baustein 2

Vom

galvanischen

Element zur

1-Topfzelle



# Herstellung der Titandioxid-Photoelektroden

Sicherheitshinweise:



Zeitlicher Umfang: 10 Min. + Sinterzeit: 15 Min.

## Chemikalien:

- Titandioxid-Suspension

## Materialien:

- leitfähiges Glas (FTO-Glas)
- Klebefilm
- Glasstab
- Objektträger
- Pinzette
- Heizplatte

## Durchführung:

1. Fixieren Sie das Glas mit der leitfähigen Seite nach oben mit je einem Klebestreifen an jedem schmalen Ende auf einem Tisch wie in Abb. 1 und streichen Sie den Klebestreifen möglichst glatt.
2. Tragen Sie am unbedeckten Ende des Glases mit einem Glasstab einen schmalen Streifen der Titandioxid-Suspension auf.
3. Ziehen Sie mit einem Objektträger die Titandioxid-Suspension zügig über das Glas, sodass dieses mit einer gleichmäßigen Schicht bedeckt ist. Diesen Vorgang, wie in Abb.2 gezeigt, nennt man „Rakeln“.



Abb.1



Abb.2

**Hinweis:** Sollte die Menge an Titandioxid-Suspension nicht ausgereicht haben, um das ganze Glas zu bedecken, kann auf die gegenüberliegende Seite ein zweiter Streifen der Suspension aufgetragen werden. Rakeln Sie dann in die gegengesetzte Richtung.

4. Lassen Sie die Photoelektroden für 5 Minuten antrocknen. Entfernen Sie dann rückstandslos den Klebefilm.



### Das Sintern:

Die hergestellten Photoelektroden müssen nun **gesintert**, das heißt erhitzt werden, bevor sie in die photogalvanischen Zellen eingesetzt werden.

1. Legen Sie bis zu vier Gläser auf eine Heizplatte. Die Gläser sollten für 5 Minuten auf 150°C erhitzt werden. Stellen sie dann die Heizplatte aus.
2. Nach weiteren 10 Minuten Abkühlzeit, wenn die Temperatur circa 60°C beträgt, können die Photoelektroden von der Platte genommen werden und weiter abkühlen.

Um eine höhere Haltbarkeit für den mehrfachen Einsatz der Photoelektroden zu erreichen, müssen diese für eine 1h bei 400 °C gesintert werden.

# 1

## Photogalvanische 2-Topfzelle

Sicherheitshinweise:



### Chemikalien:

- Photoelektrode mit Titandioxid,  $\text{TiO}_2$  (s)
- Platin-Elektrode oder Graphit-Elektrode
- Salzsäure-Lösung,  $\text{HCl}$  (aq),  $c = 1 \text{ mol/L}$  
- Kaliumbromid-Lösung,  $\text{KBr}$  (aq),  
 $c = 1 \text{ mol/L}$  
- Iod-Kristalle,  $\text{I}_2$  (s) 
- Kaliumiodid/Stärke-Lösung (frisch)

### Materialien:

- 1 Glasküvette
- 1 Becherglas
- 2 Kabel
- 1 Krokodilklemme
- 1 Salzbrücke/Filterpapier
- 1 Multimeter
- 1 UV-Taschenlampe
- 1 Taschenlampe mit farbigem Licht
- 2 Pipetten
- 1 Spatel
- 1 Tüpfelplatte
- 1 Stativ mit Klemmen + Muffen

### Versuch 1 – Die Photogalvanische 2-Topfzelle

#### Aufbau:

Bauen Sie die 2-Topf-Zelle gemeinsam gemäß Abb. 1 auf. Achten Sie darauf, dass die Elektroden weder die Salzbrücke, noch die Glaswand der Küvette oder des Becherglases berühren. Befestigen Sie die Glasküvette und die beiden Elektroden am Stativ.

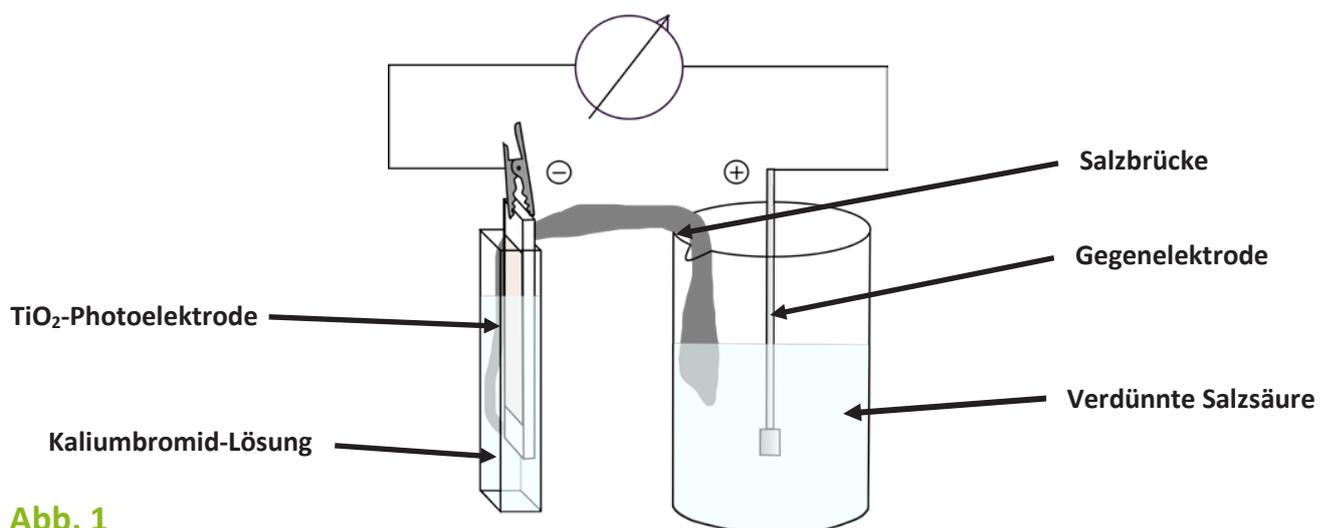


Abb. 1



Durchführung:

- Bestrahlen Sie die Photoelektrode mit der Taschenlampe mit UV-Licht aus einem Abstand von 15 cm und messen Sie die **Spannung U** [mV].
  - Bestrahlen Sie die Elektrode solange, bis sich ein Spannungsmaximum einstellt.
  - Messen Sie die Spannung bei Intervallbestrahlung (30 Sekunden belichten, 30 Sekunden abdecken).
 Notieren Sie Ihre Beobachtungen!
- Messen Sie anschließend die **Stromstärke I** [mA] der Zelle auf gleiche Weise und notieren Sie die Messergebnisse.
- Testen Sie an der Zelle anschließend Taschenlampen mit verschiedenen Lichtfarben. Messen Sie dabei die **Spannung U**.

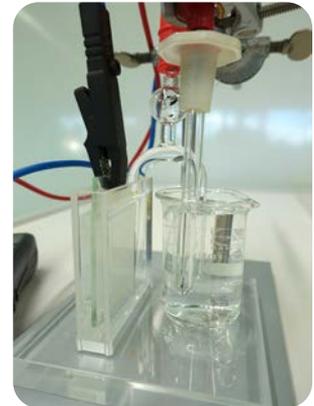


Abb. 2

Beobachtung:

1a)

$U_{\max}$ : \_\_\_ mV

1b) Notieren Sie Ihre Messergebnisse in die Tabelle. Ergänzen Sie, ob es sich um eine **Belichtung (B)** oder **Abdunklung (A)** handelt.

Zeit (t) in s	30	60	90	120	150	180	210	240
	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )
Spannung (U) in mV								

2a)

$I_{\max}$ : \_\_\_ mA

2b) Notieren Sie Ihre Messergebnisse in die Tabelle. Ergänzen Sie über der entsprechenden Spalte, ob es sich um eine **Belichtung (B)** oder **Abdunklung (A)** handelt.

Zeit (t) in s	30	60	90	120	150	180	210	240
	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )
Stromstärke (I) in mA								



3)

Rotes Licht

$U_{\max}$ : \_\_\_ mV

Blaues Licht

$U_{\max}$ : \_\_\_ mV

Weißes Licht

$U_{\max}$ : \_\_\_ mV

## Versuch 2

### Durchführung:

1. Beobachten Sie genau, ob sich in den beiden Halbzellen etwas verändert hat.
2. Weisen Sie das entstandene Produkt in der Halbzelle mit der Photoelektrode nach: Hierfür entnehmen Sie einige Tropfen der Elektrolyt-Lösung und tropfen sie in eine Tüpfelplatte zu einigen Tropfen einer Kaliumiodid/Stärke Lösung.
3. Führen Sie zum Vergleich zwei Blindproben auf der Tüpfelplatte durch:
  - Kaliumiodid/Stärke-Lösung + Kaliumbromid-Lösung
  - Kaliumiodid/Stärke-Lösung + Iod-Kristalle

### Beobachtung:

**Entsorgung:** Die Salzsäure-Lösung wird neutralisiert. Die Photoelektrode und Gegenelektrode können mit dest. Wasser abgespült und erneut verwendet werden.



### Auswertung:

Für einige der Aufgaben, die mit diesem Symbol  gekennzeichnet sind, stehen Hilfskarten zur Verfügung. Auf diese können Sie zurückgreifen, wenn Sie zur Lösung der Aufgaben Unterstützung benötigen. Für die Schnellen gibt es auch eine Zusatzaufgabe  .



1. Vergleichen Sie die photogalvanische 2-Topf-Zelle mit dem bereits bekannten Aufbau der galvanischen Zelle.

### Galvanische Zelle und photogalvanische 2-Topfzelle

Gemeinsamkeiten

Unterschiede

--	--



2. Nach mehrstündiger Bestrahlung unter Kurzschluss-Bedingungen können an der Platin-Elektrode winzige farblose Gasblasen und in der Halbzelle mit der Kaliumbromid-Lösung und der Photoelektrode eine leicht bräunliche Färbung der Lösung beobachtet werden. Benennen Sie die Produkte.

3. Formulieren Sie nun die Reaktionsgleichungen für die ablaufenden Prozesse in der 2-Topfzelle.

In der Photoelektrode/KBr-Halbzelle:

In der Gegenelektrode/HCl-Halbzelle:

---

Gesamt:

4. Ergänzen Sie die Graphik mit den Energieformen, die in der 2-Topfzelle ineinander umgewandelt werden.



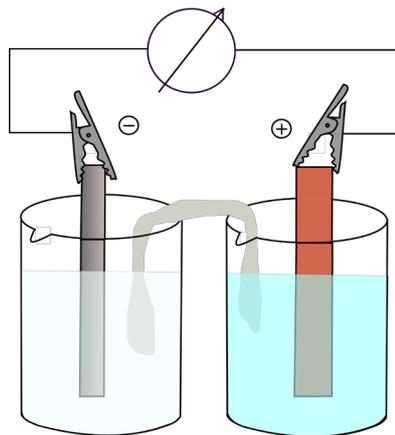
- Zusatzaufgaben:

1. Stellen Sie aufgrund Ihrer Beobachtungen eine Hypothese auf, welche Funktion das Titandioxid haben könnte und für welchen Prozessschritt es relevant zu sein scheint.

2. Die Kaliumiodid-Stärke-Lösung ist ein indirekter Nachweis für das Produkt aus der Halbzelle mit der Kaliumbromid-Lösung und der Photoelektrode. Erklären Sie mit Hilfe der elektrochemischen Spannungsreihe wie dieser Nachweis erfolgt.

**1. Vergleichen Sie die photogalvanische 2-Topfzelle mit dem bereits bekannten Aufbau der Galvanischen Zelle.**

Zur Erinnerung: Die Galvanische Zelle



**2./3. Welche Produkte entstehen? Formulieren Sie nun die Reaktionsgleichungen für die ablaufenden Prozesse in der 2-Topfzelle.**

In der Pt/HCl: Stichwort „Standardwasserstoffelektrode“  
Nutzen Sie hierbei Ihre Kenntnisse zur elektrochemischen Spannungsreihe und den Standardpotentialen.

Überlegen Sie, welcher Stoff oxidiert, welcher reduziert wird?

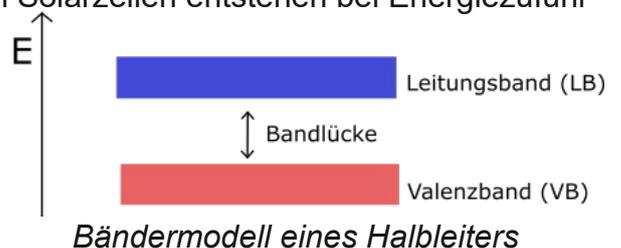
Halbzellenreaktionen			E° (V)
Red	⇌	Ox + z e <sup>-</sup>	
Li (s)	⇌	Li <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup>	-3,04
K (s)	⇌	K <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup>	-2,92
Zn (s)	⇌	Zn <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	-0,76
Fe (s)	⇌	Fe <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	-0,41
H <sub>2</sub> (g)	⇌	2H <sup>+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	0
Cu (s)	⇌	Cu <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	+0,35
2 I <sup>-</sup> (aq)	⇌	I <sub>2</sub> (aq) + 2e <sup>-</sup>	+0,54
2 Br <sup>-</sup> (aq)	⇌	Br <sub>2</sub> (aq) + 2e <sup>-</sup>	+1,07
Pt (s)	⇌	Pt <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	+1,20
Au (s)	⇌	Au <sup>3+</sup> (aq) + 3e <sup>-</sup>	+1,41

*Elektrochemische Spannungsreihe*

**Zusatzaufgabe 1: Stellen Sie aufgrund Ihrer Beobachtungen eine Hypothese auf, welche Funktion das Titandioxid haben könnte und für welchen Prozessschritt es relevant zu sein scheint.**

Titandioxid ist ein Halbleiter. In halbleiter-basierten Solarzellen entstehen bei Energiezufuhr Elektron-Loch-Paare.

Diese werden in einem zweiten Schritt getrennt.



**2TZ-1**

**2TZ-2/3**

**2TZ-Z1**

**Zusatzaufgabe 2: Erklären Sie, wie das Produkt aus der Halbzelle mit der Kaliumbromid-Lösung und der Photoelektrode durch die Kaliumiodid/Stärke-Lösung nachgewiesen wird.**

Die Stärke-Lösung verfärbt sich dunkel, wenn Iodmoleküle in die Helix des Stärkemoleküls Amylose einlagern.  
Überlegen Sie mithilfe der elektrochemischen Spannungsreihe, welche Redoxreaktion vor diesem Schritt stattfinden muss.

Halbzellenreaktionen		E° (V)
Red	⇌ Ox + z e <sup>-</sup>	
Li (s)	⇌ Li <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup>	-3,04
K (s)	⇌ K <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup>	-2,92
Zn (s)	⇌ Zn <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	-0,76
Fe (s)	⇌ Fe <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	-0,41
H <sub>2</sub> (g)	⇌ 2H <sup>+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	0
Cu (s)	⇌ Cu <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	+0,35
2 I <sup>-</sup> (aq)	⇌ I <sub>2</sub> (aq) + 2e <sup>-</sup>	+0,54
2 Br <sup>-</sup> (aq)	⇌ Br <sub>2</sub> (aq) + 2e <sup>-</sup>	+1,07
Pt (s)	⇌ Pt <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup>	+1,20
Au (s)	⇌ Au <sup>3+</sup> (aq) + 3e <sup>-</sup>	+1,41

*Elektrochemische Spannungsreihe*

**2TZ-Z2**

# 2

## Photogalvanische 1-Topfzelle

Sicherheitshinweise:



### Chemikalien:

- Photoelektrode mit Titandioxid,  $\text{TiO}_2$  (s)
- Gegenelektrode: Rasierscherfolie oder Graphitfolie
- Dinatriumdihydrogendiethylendiamintetraacetat-Lösung, Arbeitsbezeichnung: EDTA-Lösung, EDTA (aq),  $c = 0,2 \text{ mol/L}$  neutralisiert

### Materialien:

- Glasküvette
- 2 Kabel
- 2 Krokodilklemmen
- 1 Multimeter
- 1 UV-Taschenlampe

### Aufbau:

Bauen Sie die 1-Topf-Zelle gemeinsam gemäß Abb. 1 auf. Achten Sie darauf, dass die Elektroden sich nicht gegenseitig oder die Glaswand der Küvette berühren. Bevor Sie mit der Durchführung beginnen, treffen Sie aufgrund der Erkenntnisse aus der 2-Topfzelle eine Wahl, welche Taschenlampe sie verwenden.

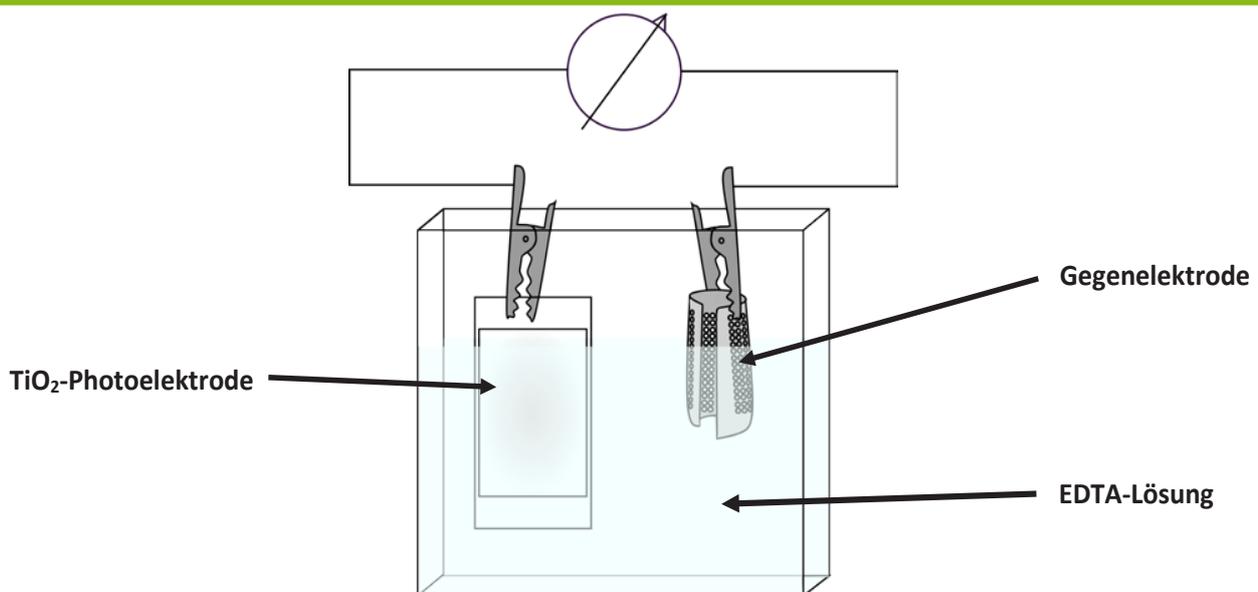


Abb.1



**Durchführung:**

1. Bestrahlen Sie die Photoelektrode mit der gewählten Taschenlampe aus einem Abstand von 15 cm und messen Sie die **Spannung U** [mV]. Entscheiden Sie sich hierbei, in welchen Zeit-Intervallen Sie die Zelle bestrahlen und nicht bestrahlen wollen. Sie können gerne zwei Intervalle miteinander vergleichen. Notieren Sie Ihre Beobachtungen!

2. Messen Sie anschließend die **Stromstärke I** [mA] der Zelle auf gleiche Weise und notieren Sie die Messergebnisse.



**Abb. 2**

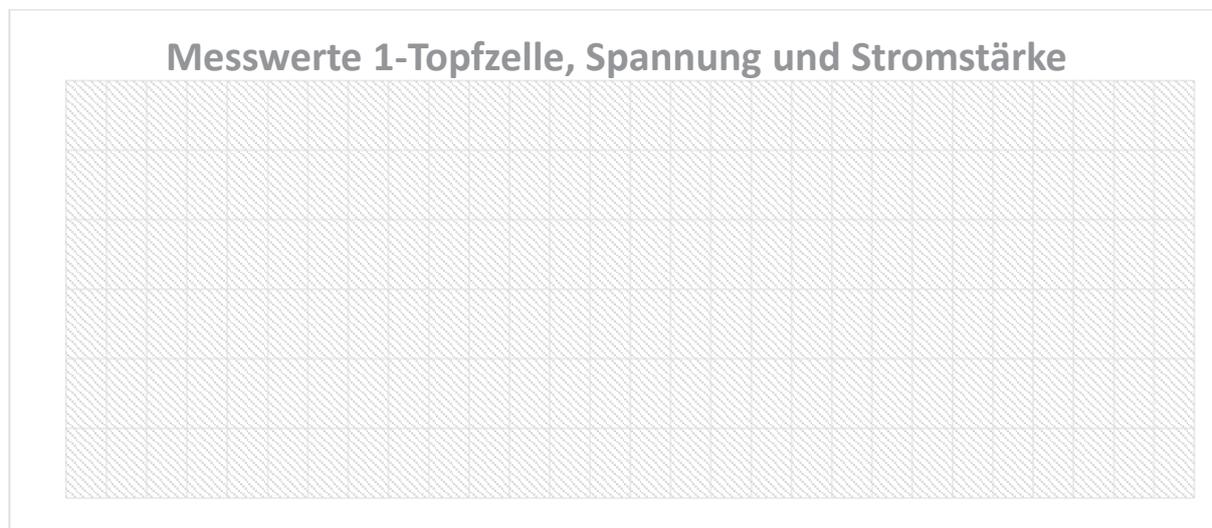
**Beobachtung:**

1. Beobachten Sie genau, ob sichtbare Veränderungen in der Zelle erkennbar sind.

2. Notieren Sie Ihre Messwerte in der Tabelle.

Zeit (t) in s														
Spannung (U) in mV														
Stromstärke (I) in mA														

3. Legen Sie dann ein Koordinatensystem in dem hinterlegten Feld an und zeichnen Sie die Verlaufskurven der Messreihen.



**Entsorgung:** Die wässrigen EDTA-Lösungen können in den Ausguss gegeben werden. Die Filterpapiere werden getrocknet und in den Feststoffabfall gegeben. Die Photoelektrode und Gegenelektroden können mit dest. Wasser abgespült und erneut verwendet werden.





### Auswertung:

1. Beschriften Sie Abb.1 mit folgenden Begriffen: Minuspol – Pluspol, Anode – Kathode. Zeichnen Sie anschließend den Fluss der Elektronen mittels Pfeilen ( $\rightarrow$ ) ein.



2. Im Versuch verändert sich Titandioxid-Photoelektrode nicht. Sie ist aber für die ablaufenden Reaktionen essentiell. Bei Bestrahlung werden im Halbleiter Titandioxid Elektron-Loch-Paare gebildet. Die Elektronen können in den äußeren Stromkreis abfließen, wenn die Löcher ( $h^+$ ) durch einen Elektronendonator „gestopft“ werden. Damit liegt Titandioxid wieder wie vor der Bestrahlung vor. Formulieren Sie nun die Reaktionsgleichungen für die ablaufenden Prozesse in der 1-Topfzelle. Verwenden Sie für die EDTA-Lösung die Abkürzung „EDTA“ und „EDTA<sub>ox</sub>“ für die oxidierte Form.



An der Gegenelektrode:

---

Gesamtgleichung:

3. Nennen Sie die Unterschiede im Aufbau zwischen der 2-Topfzelle und 1-Topfzelle.



4. Begründen Sie, welche Unterschiede im Aufbau sich auf Ihre Messergebnisse ausgewirkt haben.

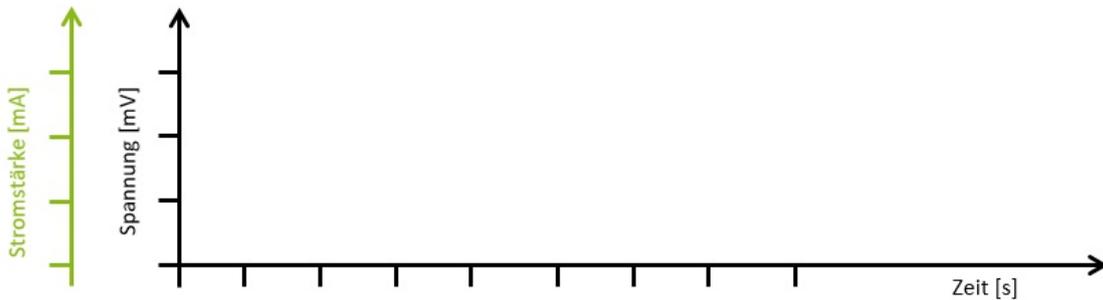


Zusatzaufgabe:

Diskutieren Sie, welche Veränderungen des Zellaufbaus der photogalvanischen Zelle höhere Spannungen und Stromstärken liefern könnten. Skizzieren Sie Ihren Vorschlag und benennen Sie wichtige Bestandteile.

## Hinweise zum Anfertigen des Koordinatensystems

Wie könnten Stromstärke und Spannung in ein Koordinatensystem gezeichnet werden?



## 2. Formulieren Sie nun die Reaktionsgleichungen für die ablaufenden Prozesse in der 1-Topfzelle.

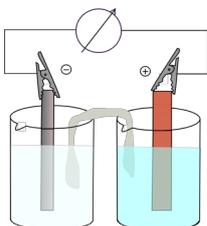
Es handelt sich um eine Redoxreaktion. Beziehen Sie Ihre Beobachtungen zur Titandioxid-Photoelektrode mit ein

Durch die ablaufenden Prozesse in der Zelle wird das EDTA irreversibel oxidiert (EDTAox) und verbleibt in der Elektrolytlösung.

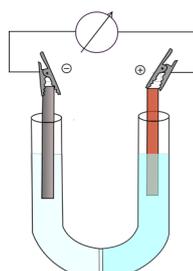
An der Rasierscherfolie findet die gleiche Reaktion wie in der 2-Topfzelle statt.

## 4. Begründen Sie, welche Unterschiede im Aufbau sich auf Ihre Messergebnisse ausgewirkt haben.

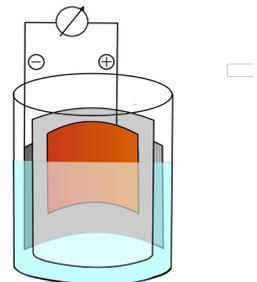
Vergleichen Sie die Aufbauten des Daniell-Elements miteinander: Von rechts nach links nimmt die Stromstärke der Zellen zu.



Daniell-Element als 2-Topfzelle



Daniell-Element als U-Rohr



Daniell-Element im Zylinder

**1TZ-Beob.**

**1TZ-2**

**1TZ-Z**



## Animation: Die photogalvanische Zelle

Erkunden Sie die Bestandteile der Animation „Die photogalvanische 2-Topf- und 1-Topfzelle“. Öffnen Sie die vorliegende .html-Datei mit dem Browser (Windows Edge, Firefox etc.); die Anhänge zu der Datei müssen dabei vorliegen. Über das Menü können Sie auf die verschiedenen Abschnitte der Animation zugreifen.

Gehen zu Kapitel **2.1 Bändermodell**. Die Darstellungen der chemischen Prozesse in der Zelle sind nicht maßstabsgerecht. Beantworten Sie während der Erkundung folgende Fragen:

- 1) Beschriften Sie die Abbildung mit den wichtigsten Elementen der Animation.

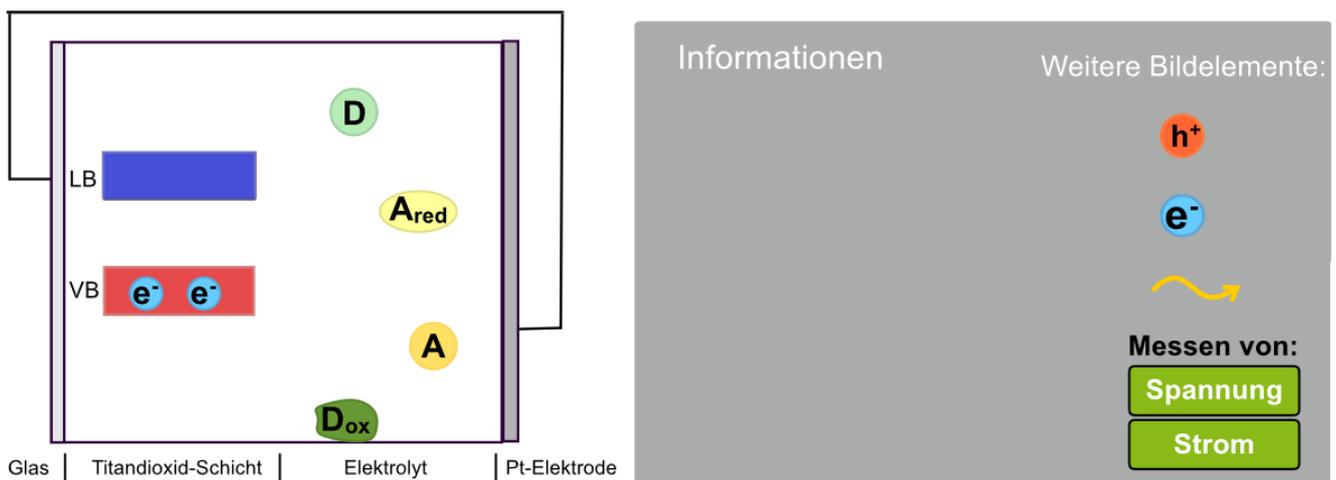


Abb. 1

- 2) Benennen Sie die Teilchen, die sich hinter den Abkürzungen D,  $D_{ox}$ , A und  $A_{red}$  in den beiden Zelltypen verbergen.



Beginnen Sie die Spannungsmessung!



- 3) Beschreiben Sie mit eigenen Worten, welche Prozesse durch die Bestrahlung mit UV-Licht ausgelöst werden. Nutzen Sie für die Untergliederung die Schritte „1. Bildung von Elektron-Loch-Paaren“ und „2. Separierung der Ladungen“.



- 4) Erläutern Sie, warum in der Animation die Spannungsmessung so dargestellt ist und an der Gegenelektrode keine Reaktionen stattfinden.

Gehen Sie zurück zu **2.1 Bändermodell** und beginnen Sie die Stromstärkemessung!

- 5) Beschreiben Sie die ergänzenden Schritte, die in der Animation der Stromstärkemessung gezeigt werden.



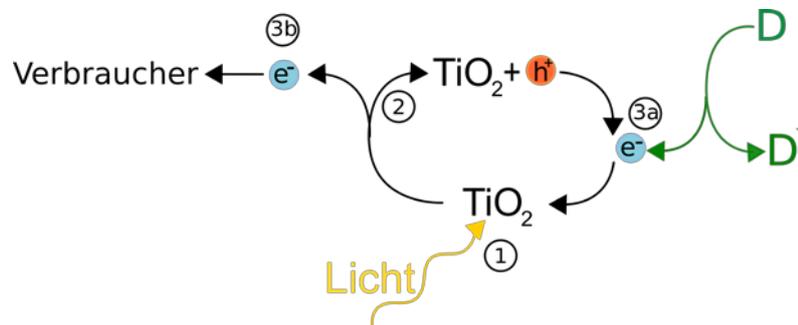
### Zusatzaufgabe



- 6) Diskutieren Sie die Vor- und Nachteile einer Darstellung, wie sie in der Animation umgesetzt ist.

**3. Beschreiben Sie mit eigenen Worten, welche Prozesse durch die Bestrahlung mit UV-Licht ausgelöst werden.**

Die beiden Schritte vollziehen sich in dieser Abbildung in 1 und 2.



*Stoffumsatz in der photogalvanischen Zelle*

**4. Erläutern Sie, warum in der Animation die Spannungsmessung so dargestellt ist und an der Gegenelektrode keine Reaktionen stattfinden.**

Die elektrische Spannung  $U$  ist die Fähigkeit einer Stromquelle Elektronen anzutreiben. Aus diesem Grund wird die Spannung auch Elektronendruck genannt. Eine Spannung ist notwendig, damit eine Stromstärke  $I$  gemessen werden kann. In einer Stromquelle wie einem galvanischen Element liegt am Minuspol meist ein Elektronenüberschuss vor.

Animation-3

Animation-4



# Leitfaden: Wie plane ich einen Versuch?

## 1.) Fragestellung

Entwickeln Sie zu dem Thema „Alternative Solarzellen mit Titandioxid“ eine Fragestellung, die durch einen passenden Versuch beziehungsweise durch eine Versuchsreihe überprüft werden kann.

## 2.) Hypothesenbildung

Formulieren Sie eine zu der Fragestellung entsprechende Hypothese. Diese darf nicht widersprüchlich sein und muss sich überprüfen sowie widerlegen lassen.

## 3.) Vorüberlegungen zur Vorbereitung

Treffen Sie mit Hilfe der folgenden Fragen Vorüberlegungen für die Versuchsdurchführung:

- Was wollen wir messen?
- Welche Messgeräte benötigen wir dafür?
- Wie muss der Aufbau für den Versuch aussehen?
- Unter welchen Bedingungen müssen die Versuche durchgeführt werden?

Denken Sie daran, dass pro Experiment nur eine Variable überprüft werden kann. Die anderen Variablen müssen in der Durchführung konstant gehalten werden.

## 4.) Recherche zur Versuchsdurchführung

Recherchieren Sie wichtige Aspekte für Ihr Experiment (z. B. Sicherheitshinweise, Chemikalien/Materialien, Entsorgung etc.).

## 5.) Vorbereitung der Versuchsdurchführung

Zur weiteren Vorbereitung fertigen Sie folgende Materialien an:

- Sicherheitsvorschriften
- Versuchsskizze
- Chemikalien- und Materialliste
- Zeitplan
- Beschreibung der Durchführung
- Vorbereitung des Messprotokolls



# 3

## Photogalvanische Kompaktzelle

Sicherheitshinweise:



### Chemikalien:

- Photoelektrode mit Titandioxid,  $\text{TiO}_2$  (s)
- Gegenelektrode: zwei Rasierscherfolien oder Graphitfolie
- Dinatriumdihydrogendiethylendiamintetraacetat-Lösung, Arbeitsbezeichnung: EDTA-Lösung, EDTA (aq),  
 $c = 0,5 \text{ mol/L}$  neutralisiert,  2

### Materialien:

- 1 Flachglas
- 1 Filterpapier
- 1 Tropfpipette
- 2 Foldbackklammern
- 2 Kabel
- 2 Krokodilklemmen
- 1 Multimeter
- 1 empfindlicher Motor
- 2 UV-Taschenlampen
- 1 Taschenlampe mit mehreren Lichtfarben
- Schere

### Aufbau – Planung des Versuchs:

Die photogalvanische Kompaktzelle ist eine „Sandwich“-Variante der bereits bekannten photogalvanischen 1-Topfzelle.

1. Überlegen Sie sich im Vorfeld und mit Bezug auf die oben aufgeführten Chemikalien und Materialien, wie die 1-Topfzelle als „Sandwich“-Variante aussehen könnte.

2. Bauen Sie mit den vorhandenen Materialien eine Kompaktzelle zusammen.

3. Beantworten Sie in der Gruppe zunächst folgende Fragen:



- Welche Materialien agieren als Kathode/Anode?
- Wie müssen die Kabel angeschlossen sein, damit die entstehende elektrische Energie gemessen werden kann?

Schließen Sie dann die Zelle mit Krokodilklemmen über zwei Kabel an ein Multimeter an.

4. Skizzieren Sie ihren Versuchsaufbau und beschriften Sie ihn.



### Durchführung – Messungen mit der Kompaktzelle:

Planen Sie gemeinsam die Durchführung so, dass Sie überprüfen können, ob die Kompaktzelle photosensibel für verschiedene Lichtsorten (UV-Licht, verschiedenfarbiges sichtbares Licht) ist. Halten Sie Ihre Messergebnisse in geeigneter Form fest.

### Notizen zur Durchführung des Versuchs

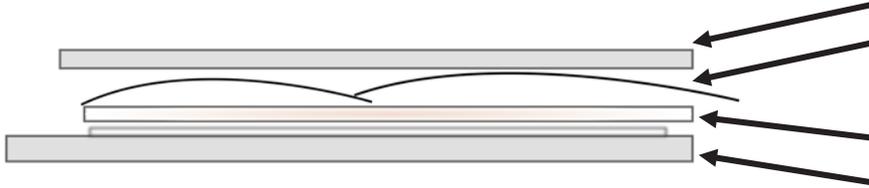
### Beobachtung:

**Entsorgung:** Die wässrigen EDTA-Lösungen können in den Abfluss gegeben werden. Die Filterpapiere werden getrocknet und in den Feststoffabfall gegeben. Die Photoelektrode und Gegenelektrode können mit dest. Wasser abgespült und erneut verwendet werden.



### Auswertung:

1. Beschriften Sie die Bestandteile der photogalvanischen Kompaktzelle sowie Plus- und Minuspol und markieren Sie, wo die Krokodilklemmen befestigt werden.



2. Stellen Sie die Reaktionsgleichungen (Oxidation/Reduktion/Gesamtgleichung) für den Stoffumsatz in der Zelle auf. Verwenden Sie dafür die bereits bekannte Abkürzung EDTA.

3. Beschreiben Sie unter Verwendung der Fachsprache, welche Prozesse im Halbleiter und in der Elektrolyt-Lösung ablaufen.

4. Abb. 1 zeigt die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche. Diskutieren Sie mit Hilfe Ihrer Versuchsergebnisse und mit Abb. 1, warum die photogalvanische Kompaktzelle nicht mit einer herkömmlichen Solarzelle konkurrieren kann.

## Intensität der Sonnenstrahlung

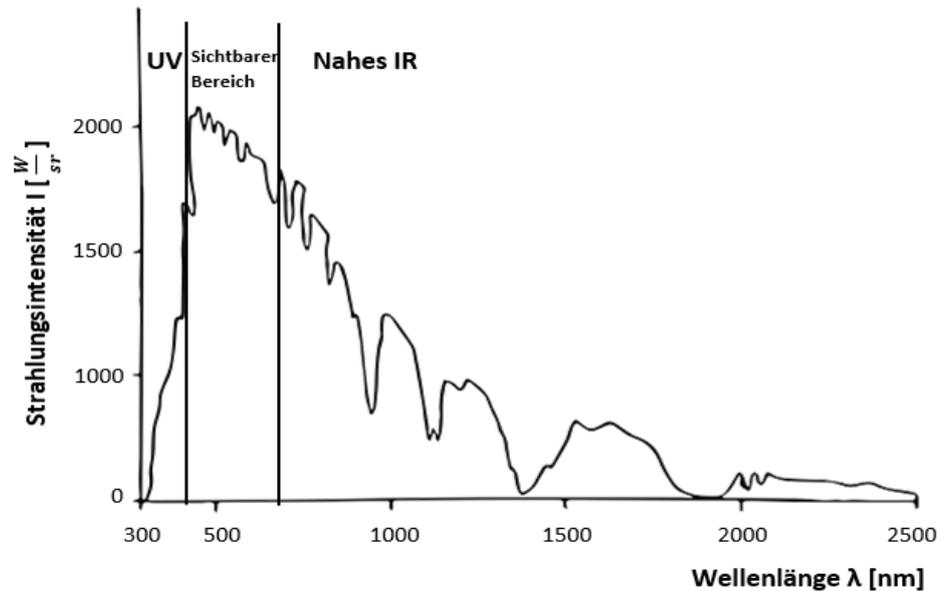


Abb. 1

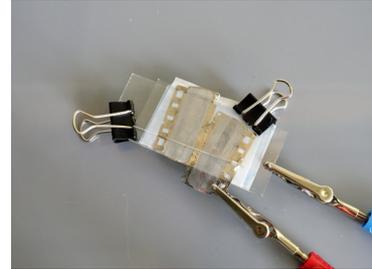


Zusatzaufgabe:

Recherchieren Sie den Begriff „Grätzel-Zelle“ und vergleichen Sie den Aufbau mit der photogalvanischen Kompaktzelle. Erklären Sie, welche Funktion der Farbstoff in der Zelle übernimmt.

## Hinweise zum Aufbau der photogalvanischen Kompaktzelle

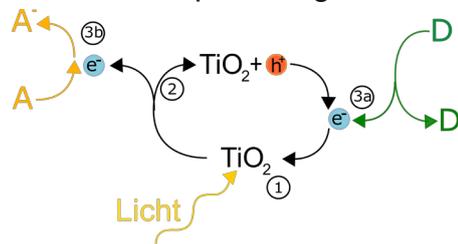
- Die beiden Rasierscherfolien müssen sich überlappen.
- Der Objektträger wird so aufgelegt, dass an der Photoelektrode noch Platz ist, um ein Kabel anzuschließen.
- Die Kabel werden folgendermaßen angeschlossen:



Anschlüsse an der Kompaktzelle

## 2. Stellen Sie die Reaktionsgleichungen (Oxidation/Reduktion/Gesamtgleichung) für den Stoffumsatz in der Zelle auf. Verwenden Sie dafür die bereits bekannte Abkürzung EDTA.

Beziehen Sie sich auf folgende Abbildung und überlegen Sie, welche Teilchen als Elektronendonatoren, welche als -akzeptoren agieren.



Stoffumsatz in der photogalvanischen Zelle

**KomZ-Aufbau**

**KomZ-2**



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

Baustein 3

**Mit Früchten**

**zum**

**elektrischen**

**Strom**

Diana Zeller/ Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde



# Ansetzen der Farbstofflösungen

Sicherheitshinweise:



## 1. Himbeersaft-Lösung:

### Chemikalien:

- Tiefgefrorene Himbeeren
- Dest. Wasser, H<sub>2</sub>O (l)

### Materialien:

- Luftdichtes Gefäß, z.B. Schraubdeckelglas
- eventuell Heizplatte

### Durchführung:

1. Wiegen Sie ca. 50g gefrorene Himbeeren ab und warten Sie, bis die Himbeeren angetaut sind oder erhitzen Sie diese vorsichtig.
2. Zerdrücken Sie die Himbeeren mit einem Glasstab und geben Sie 100mL destilliertes Wasser dazu.
3. Nach einigen Minuten sinken die Sedimente ab und die Himbeersaft-Lösung kann abdekantiert werden.
4. Bewahren Sie die Himbeersaft-Lösung in kleineren Portionen im Gefrierschrank auf. Bei erneuter Verwendung können diese in kurzer Zeit aufgetaut werden.

**Hinweis:** Der beschriebene Ansatz eignet sich für 2 Klassen à 30 Personen. Die Lösung kann für mehrere Photoelektroden verwendet werden. Die Haltbarkeit der Lösung wird durch Zugabe einiger Tropfen verdünnter Salzsäure erhöht.

## 2. Crocin-Lösung:

### Chemikalien:

- Crocin, Farbstoff des Safrans (muss im Kühlschrank aufbewahrt werden)
- Dest. Wasser, H<sub>2</sub>O (l)

### Materialien:

- Luftdichtes Gefäß, z.B. Schraubdeckelglas

### Durchführung:

1. Wiegen Sie 0,2g Crocin ab.
2. Geben Sie 80mL destilliertes Wasser dazu und rühren Sie bis, sich das Crocin vollständig gelöst hat.



- Die Lösung sollte in einem luftdichten Gefäß oder mit Parafilm umwickelt gekühlt im Dunkeln aufbewahrt werden. So verpackt ist die Lösung mindestens drei Monate haltbar.

**Hinweis:** Dieser Ansatz dient als Klassenansatz, wobei nach dem Sensibilisieren die Lösungen für den nächsten Durchlauf wiederverwendet werden können. Empfohlen wird, den Reinstoff Crocin der Firma Sigma Aldrich 15,46€/g zu kaufen, da Safran als Naturstoff nicht ergiebig und teuer ist.

### 3. Spinat-Lösung:

#### Chemikalien:

- Tiefkühl-Blattspinat

- Aceton,  $C_3H_6O$  (l)  

#### Materialien:

- Luftdichtes Gefäß, z. B. Schraubdeckelglas
- eventuell Heizplatte

#### Durchführung:

- Wiegen Sie ca. 50g gefrorenen Spinat ab und warten Sie, bis er angetaut ist oder erhitzen Sie ihn vorsichtig.
- Zerdrücken Sie die den Spinat mit einem Glasstab und geben Sie 100mL Aceton dazu. Lassen Sie den Spinat mit dem Aceton 10 Minuten ziehen.
- Die Spinat-Lösung kann anschließend abdekantiert werden.

Bewahren Sie die Spinat-Lösung in kleineren Portionen in einem geschlossenen Gefäß im Kühlschrank auf.

### 4. Spirulina-Lösung:

#### Chemikalien:

- Spirulina-Tablette

- Aceton,  $C_3H_6O$  (l)  

#### Materialien:

- Luftdichtes Gefäß, z. B. Schraubdeckelglas
- Heizplatte

#### Durchführung:

- Wiegen Sie ca. 8g Spirulina-Tabletten ab und mörsern Sie diese zu einem Pulver.
- Geben Sie 100mL Aceton dazu und bringen sie die Lösung für 15 Minuten zum Sieden. Hier empfiehlt es sich, einen Erlenmeyerkolben zu verwenden und diesen mit einem Uhrglas abzudecken.

Bewahren Sie die Spirulina-Lösung in einem geschlossenen Gefäß im Kühlschrank auf.



# 4 Photosensibilisierte Kompaktzelle

Sicherheitshinweise:



## Chemikalien:

- Photoelektrode mit Titandioxid,  $\text{TiO}_2$  (s)
- Gegenelektrode: zwei Rasierscherfolien oder Graphitfolie
- Dinatriumdihydrogendiethylendiamintetraacetat-Lösung, Arbeitsbezeichnung: EDTA-Lösung, EDTA (aq),  
 $c = 0,5 \text{ mol/L}$  neutralisiert 
- Farbstoff-Lösungen (z.B. Himbeersaft, Crocin-Lösung)

## Materialien:

- 1 Flachglas
- 1 Filterpapier
- 1 Tropfpipette
- 2 Foldbackklammern
- 2 Kabel
- 2 Krokodilklemmen
- 1 Multimeter
- 1 empfindlicher Motor
- 1 Taschenlampe (sichtbares Licht mit mehreren Lichtfarben)
- Fön
- Petrischale
- Pinzette
- Schere

Zeichnen Sie hier den Aufbau Ihrer Zelle.



## Aufbau:

1. Sensibilisieren Sie die Photoelektrode, indem Sie die Photoelektrode für 5 Min. in eine Petrischale mit einer Farbstofflösung einlegen. Nehmen Sie die Photoelektrode mit einer Pinzette heraus. Spülen Sie sie vorsichtig mit destilliertem Wasser ab und trocknen Sie sie mit einem Fön (Kaltluftstufe). Notieren Sie Ihre Beobachtungen vor und nach dem Trocknen der Photoelektrode.
2. Bauen Sie die sensibilisierte Kompaktzelle wie die photogalvanische Kompaktzelle aus Versuch 3 zusammen.



Planen Sie gemeinsam die Durchführung und verwenden Sie verschiedene Lichtfarben. Beobachten Sie nach längerer Laufzeit, ob Sie Veränderungen an der Photoelektrode erkennen können.

### Notizen für die Durchführung des Versuchs

### Beobachtung:

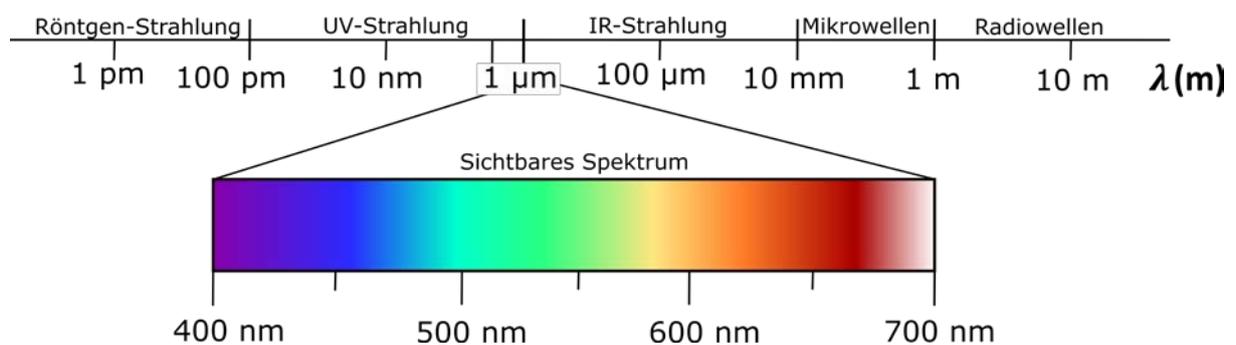
**Entsorgung:** Die wässrigen EDTA-Lösungen können in den Abguss gegeben werden. Die Filterpapiere werden getrocknet und in den Feststoffabfall gegeben. Die Photoelektrode und Gegenelektrode können mit dest. Wasser abgespült und erneut verwendet werden. Die Farbstofflösungen können ebenso in den Abguss gegeben werden.



### Auswertung:

1. Erklären Sie, warum die Farbstoffe als „Photosensibilisatoren“ bezeichnet werden.

2. Begründen Sie mit Hilfe des Spektrums der elektromagnetischen Strahlung, dass Sie mit den verschiedenen Lichtfarben unterschiedliche Messergebnisse erzielt haben.

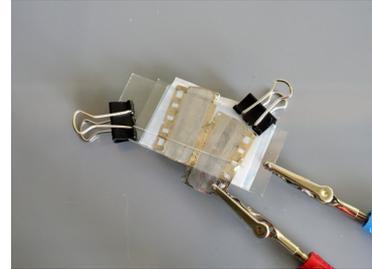


Zusatzaufgabe:

Diskutieren Sie die Vor- und Nachteile der photosensibilisierten Zelle als alternative Solarzelle.

### Hinweise zum Aufbau der photosensibilisierten Kompaktzelle

- Die beiden Rasierscherfolien müssen sich überlappen.
- Der Objektträger wird so aufgelegt, dass an der Photoelektrode noch Platz ist, um ein Kabel anzuschließen.
- Die Kabel werden folgendermaßen angeschlossen:



*Anschlüsse an der Kompaktzelle*

### Zusatzaufgabe: Diskutieren Sie die Vor- und Nachteile der sensibilisierten Zelle.

Welche Vorteile ergeben sich aus den verwendeten Materialien?

Welche Beobachtungen konnten Sie nach einer längeren Laufzeit der Zelle machen?

- 1) Veränderungen im Farbstoff?
- 2) Veränderungen im Elektrolyt?
- 3) Erhaltene Messwerte?

**SZ-Aufbau**

**SZ-Z**

## Farbstoffe als Photosensibilisatoren

Um das Titandioxid auch für das sichtbare Lichtspektrum empfänglich zu machen, können organische Farbstoffe, sogenannte Photosensibilisatoren, als „Lichtantennen“ für das Titandioxid dienen. Dass Farbstoffe als „Lichtantennen“ agieren können, ist von der Photosynthese bekannt. Hier absorbiert das Chlorophyll im Bereich des sichtbaren Lichts.

### Die Photosensibilisatoren

In Himbeeren ist das **Cyanidin** der farbgebende Farbstoff. Er gehört zu der Klasse der Anthocyane, die sich in vielen farbigen Verbindungen von Blumen und Früchten finden lassen. In der Natur sind die knalligen roten, blauen oder violetten Früchte ein Lockmittel für Insekten, um sie zur Bestäubung der Pflanzen anzuziehen.

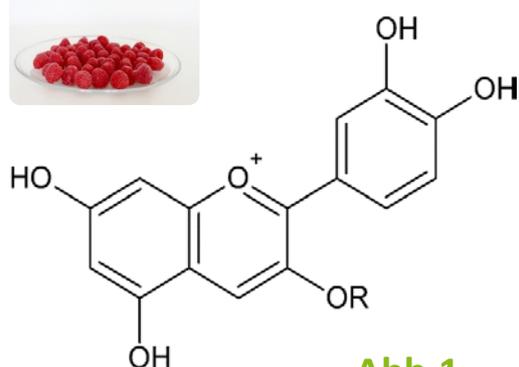


Abb.1

Das Cyanidin-Molekül (Abb.1) eignet sich ausgezeichnet, um aufzuzeigen, warum sich einige Farbstoff-Moleküle als Photosensibilisatoren eignen und andere nicht. Das Grundgerüst der Anthocyane ist das Anthocyanidin-Gerüst. Um als Photosensibilisator eingesetzt werden zu können, muss das Farbstoff-Molekül ein *delokalisiertes  $\pi$ -Elektronensystem* besitzen, das sich durch Mesomerie über das ganze Molekül erstrecken kann. Zweitens sollten *polare funktionelle Gruppen* für eine Wasserlöslichkeit des

Moleküls vorliegen. Drittens werden *benachbarte Hydroxy-Gruppen* benötigt, über die die Farbstoff-Moleküle an die Oberfläche des Titandioxids „andocken“ können.

Im Safran ist das **Crocin** einer der farbgebenden Farbstoffe. Anhand der Strukturformel von Crocin (Abb.2) lässt sich erkennen, dass es eigentlich ein Carotinderivat ist, die Crocetinsäure. Dieses ist eigentlich wasserunlöslich. Die über Ester an das Derivat gebundenen Zuckerreste sorgen durch ihre polaren Gruppen für die nötige Wasserlöslichkeit. Wie beim Cyanidin-Moleküle liegen einige benachbarten Hydroxy-Gruppen vor.

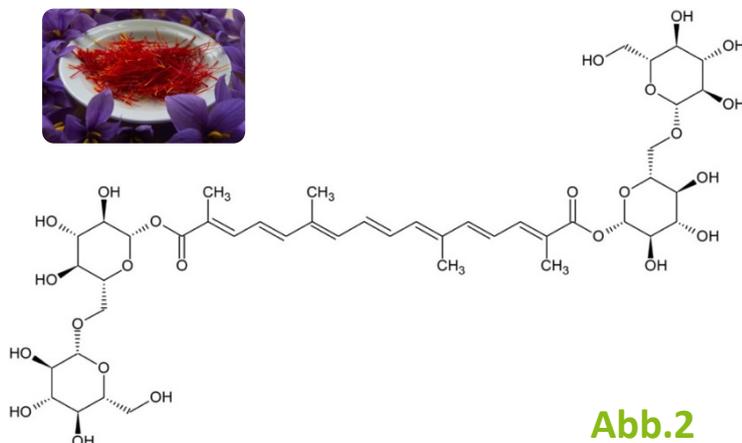


Abb.2

### Bindung an die Titandioxid-Oberfläche

Die benachbarten Hydroxy-Gruppen beider Moleküle sind entscheidend, um zur Titandioxid-Oberfläche auszubilden. Die Oberfläche von Titandioxid ist aus Herstellungsgründen mit Hydroxygruppen belegt. In Abb.3 wird die Verknüpfung zwischen dem Titandioxid und den Farbstoffen auf struktureller Ebene gezeigt. Über die benachbarten Hydroxy-Gruppen werden in einer **Kondensationsreaktion** die Farbstoff-Moleküle an die Titandioxid-

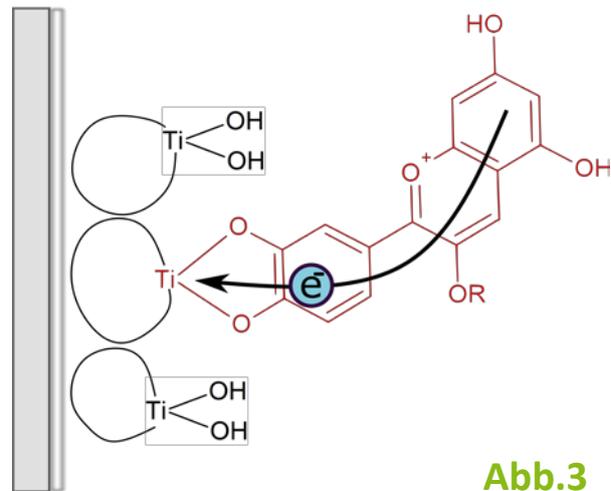


Abb.3

Oberfläche gebunden. Bei der Kondensationsreaktion werden **Wasser-Moleküle** abgespalten und zwischen Farbstoff-Molekül und Titandioxid **Sauerstoffbrücken** ausgebildet. Dadurch sind die Lichtantennen fest „installiert“ und es kann ein Elektronentransfer vom Sensibilisator auf das Titandioxid erfolgen. Als eine mögliche Alternative eignen sich Carboxy-Gruppen, die ebenso in einer Kondensationsreaktion Esterbrücken zur Titandioxid-Oberfläche ausbilden.

### Auswertungsfragen

- 1) Erläutern Sie die Eigenschaft Wasserlöslichkeit mit der Struktur der beiden Farbstoff-Moleküle (Cyanidin und Crocin).
- 2) In Abb.4 sehen Sie die Absorptionsspektren von Himbeersaft und Crocin-Lösung. Erläutern Sie, in welchen Bereichen des sichtbaren Lichts die Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie am erfolgreichsten sein sollten.

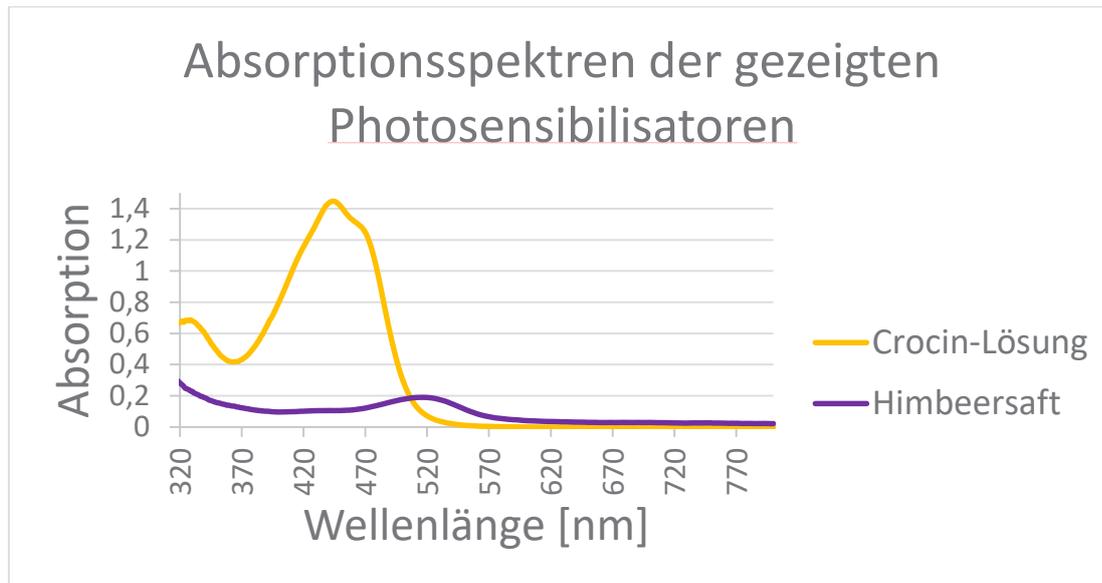


Abb.4



Zusatzaufgabe:

Recherchieren Sie, welche weiteren natürlichen Farbstoffe sich als Photosensibilisatoren eignen würden. Begründen Sie an einem ausgewählten Beispiel, welche strukturellen Voraussetzungen entscheidend sind.

## Die Photosensibilisierung

Geeignete organische Farbstoffe können als Sensibilisatoren für Titandioxid verwendet werden. Sie wirken wie „Lichtantennen“ für den Halbleiter, da organische Farbstoffe einen Teil der Spektralfarben des sichtbaren Lichts absorbieren. Wie zur Beschreibung von Energiezuständen in Halbleitern wie Titandioxid das Bändermodell verwendet wird, eignet sich für organische Moleküle das Energiestufenmodell. Von der **höchsten besetzten Energiestufe (HBE)** können durch Zufuhr von Energie Elektronen in die **niedrigste unbesetzte Energiestufe (NUE)** angehoben werden. Äquivalent zur photogalvanischen Zelle entstehen im ersten Schritt durch die Anregung von Elektronen ( $e^-$ ) Elektronendefizite („Löcher“) ( $h^+$ ) im HBE der Farbstoffmoleküle.

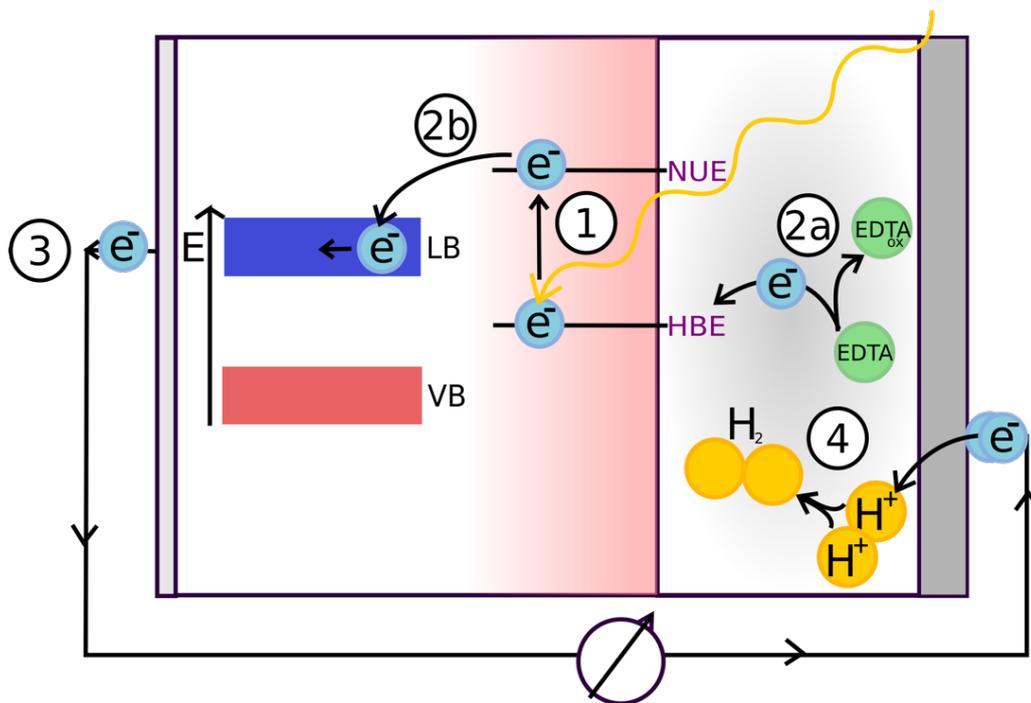


Abb.1

- 1) Beschriften Sie in Abb.1 die wichtigsten Bestandteile der Zelle und die an den Prozessen beteiligten Teilchen.



- 2) Geben Sie den dargestellten Schritten Bildüberschriften und beschreiben Sie die Vorgänge in Schritt 2, 3 und 4.



- 3) Erläutern Sie die Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den chemischen Prozessen der photogalvanischen und photosensibilisierten Zelle.



**Zusatzaufgabe:**

Diskutieren Sie, unter welchen energetischen Bedingungen die Photosensibilisierung erfolgreich ist.

**2. Geben Sie den dargestellten Schritten Bildüberschriften und beschreiben Sie die Vorgänge in Schritt 2, 3 und 4.**

Orientieren Sie sich bei Ihrer Beschreibung an den Prozessen in der photogalvanischen Zelle. Wie auch in der photogalvanischen Zelle sind die Elektronendonator und -akzeptorprozesse bei der Photosensibilisierung entscheidend. Überlegen Sie, welcher Stoff oxidiert, welcher reduziert wird?

**3. Erläutern Sie die Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den chemischen Prozessen in den photogalvanischen und photosensibilisierten Zellen.**

Schauen Sie sich für eine Wiederholung die Animation „Photogalvanische Zellen“ an und gliedern Sie die Animation wie die Abbildung in einzelne Schritte.

**Zusatzaufgabe: Diskutieren Sie, unter welchen energetischen Bedingungen die Photosensibilisierung erfolgreich ist.**

Bei Halbleitern gibt die Bandlücke vor, welche Energie benötigt wird, um Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband anzuheben. Zwischen HBE und NUE liegt ebenso ein Energieabstand vor. Überlegen Sie ebenso wie sich HBE und NUE energetisch zu den Bändern des Titandioxids liegen müssen.

**Photos.-2**

**Photos.-3**

**Photos.-Z**