



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Michael W. Tausch

Lichtlabor Pflanze und Künstliche Photosynthese



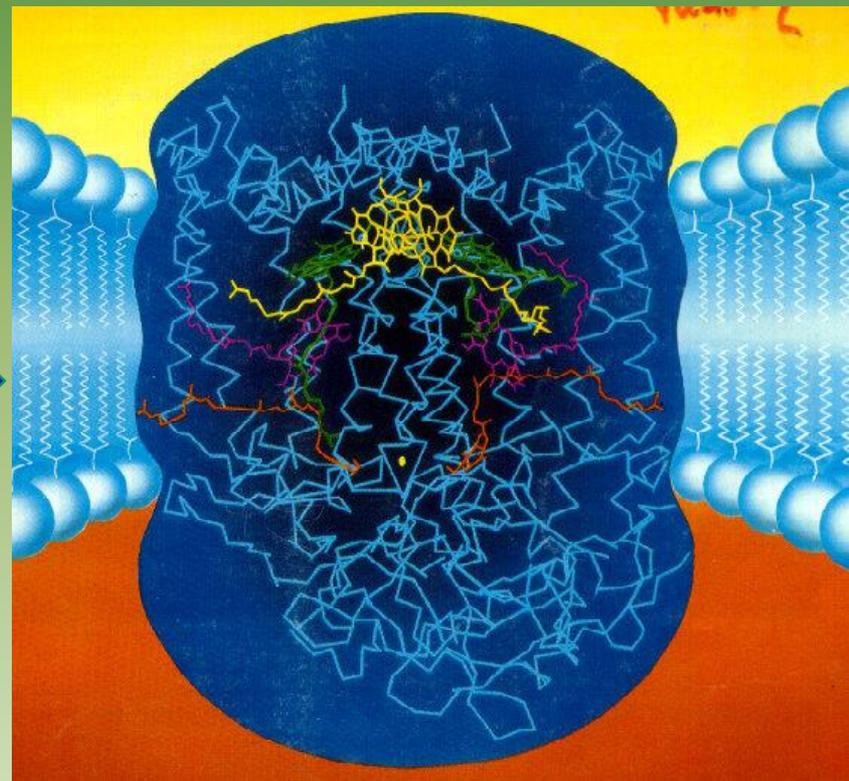
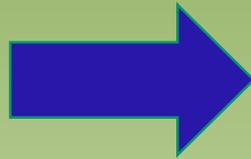
Natürliche Photosynthese in Zahlen

700.000.000.000 t Biomasse/a 3.000.000.000.000.000.000.000 J/a $\eta \approx 0,15\%$





Natürliche Photosynthese: Photoaktive Nanomaschine Reaktionszentrum mit Schlüsselfunktion



Nobelpreis für Chemie 1988

H.Michel, R.Huber, J.Deisenhofer

M. Huber, *Angew. Chem.* 107, 929 (1995)

Zeitplan (4 h)

1. **INTRO-Vortrag „CHEMIE MIT LICHT“
Experimente & KONZEPTE (60 min)**

20 min
Pause

2. **PRAKTIKUM (30 min):
Experimente E1-E3 & Auswertung Sek. I**
3. **PLENUM (30 min):
Auswertung Sek. II & Theor. Vertiefung**

10 min
Pause

4. **PRAKTIKUM (30 min):
Photo-Blue-Bottle Experimente E4-E7 & Auswertung Sek. I
Zusatz: Demo-Experiment: Photokatalytischer Wasserstoff**
5. **PLENUM (30 min)
Auswertung Sek. II & Theor. Vertiefung**

7. **Plenum (30 min)
Curriculare Integration im Chemieunterricht der Sek. I und Sek. II**





Lichtlabor Pflanze & Künstliche Photosynthese

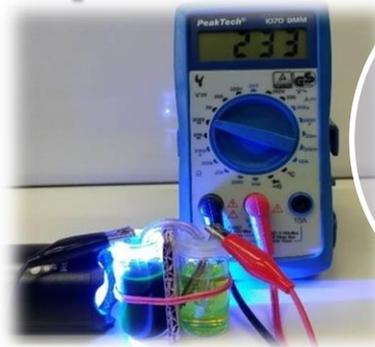
Experimente und Fachinhalte aus MINT-Fächern



Experimente E2-E3 E4-E6



Experiment E7

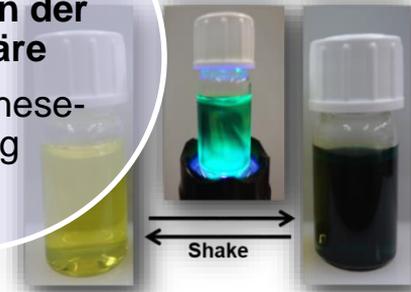


Experiment E1



Photonen & Moleküle
Relation:
Licht-Energie-
Farbe-Struktur

Experimente E4-E6



**Kohlenstoff-
kreislauf in der
Biosphäre**
Photosynthese-
Atmung

**Experimente und
Fachinhalte aus:**

- ▶ Chemie
- ▶ Biologie
- ▶ Physik
- ▶ Geographie

Elektrochemie
(Photo)Redox-
reaktionen
(Photo)Galvani-
sche Zellen

**Künstliche
Photosynthese**
„grüner“
Wasserstoff

Experiment E8





Experiment E1



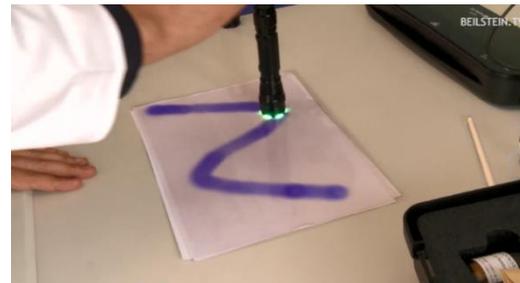
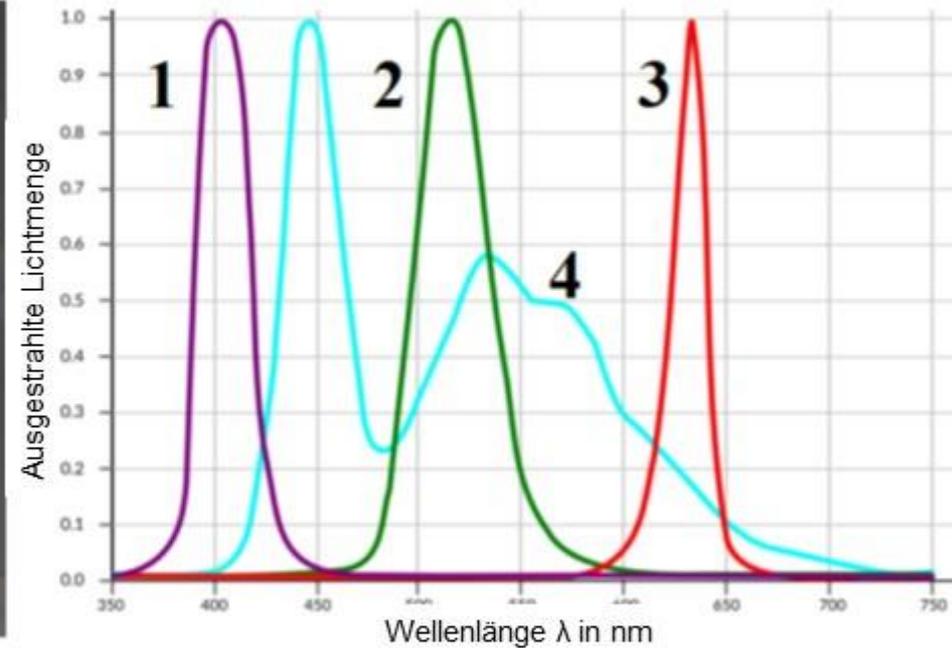
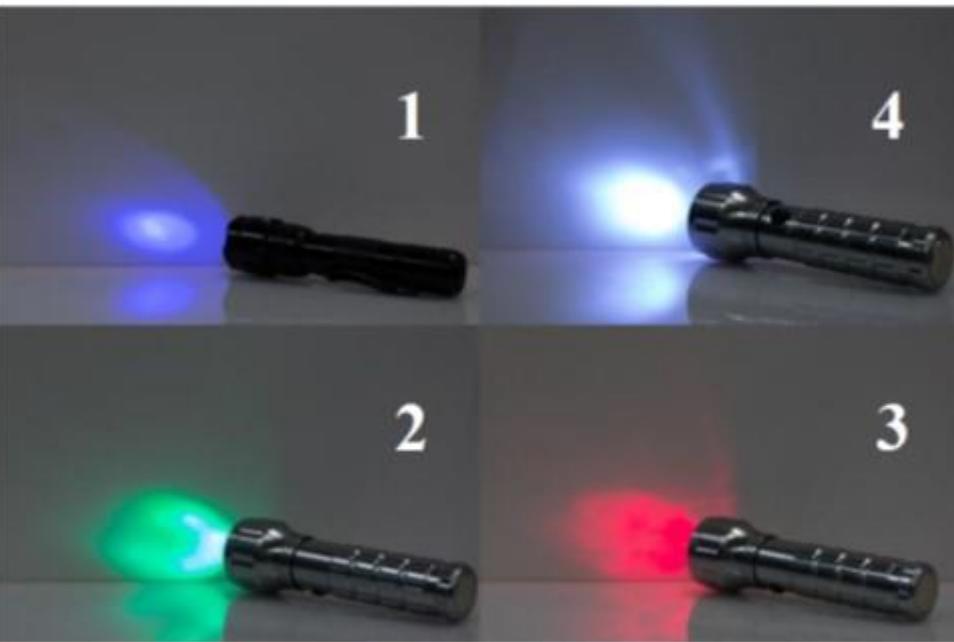
Demo-Versuch

mit LED Taschenlampen und Spiropyran aus dem **Photo-Mol Koffer** [1]

[1] <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/experimentierkoffer-materialiensets/qr-31-experimentierkoffer-photo-mol/>

Lampentest

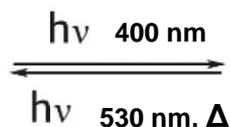
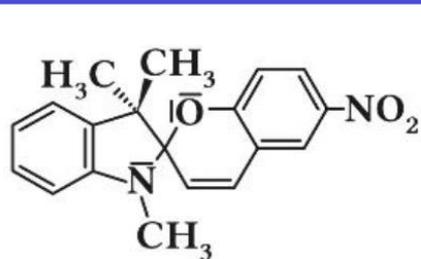
Demo-Versuche: „intelligente Folie“ und Spiropyran-Lösung





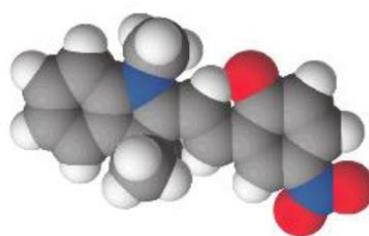
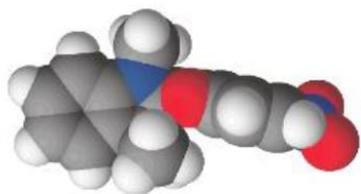
Auswertung E1 & Adressierbare Lerninhalte

Spiropyran - ein didaktisches Juwel



Spiropyran

Merocyanin



Adressierbare Lehrinhalte in der Sek. II:

- ⇒ Molekulare Schalter; ⇒ Photochromie; ⇒ Solvatochromie; ⇒ AIE;
- ⇒ Relation: Molekülstruktur / Lichtabsorption und -emission / Farbe;
- ⇒ Reaktionswege photochemischer und thermischer Reaktionen;
- ⇒ Abhängigkeit: Reaktionsgeschwindigkeit / Temperatur
- ⇒ Thermodynamisches Gleichgewicht vs. Photostationarität ... ⇒ Molekulare Logik

Photochemie vs. Thermochemie Reaktionswege & Photostationarität

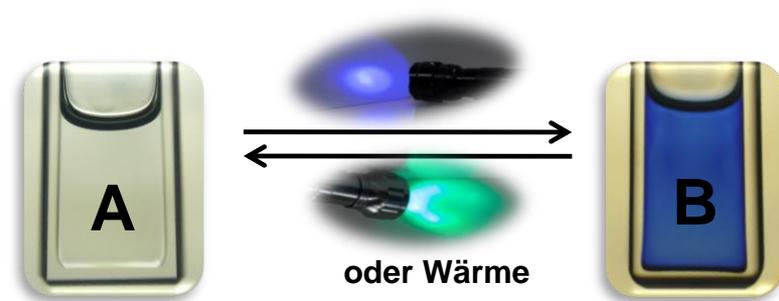
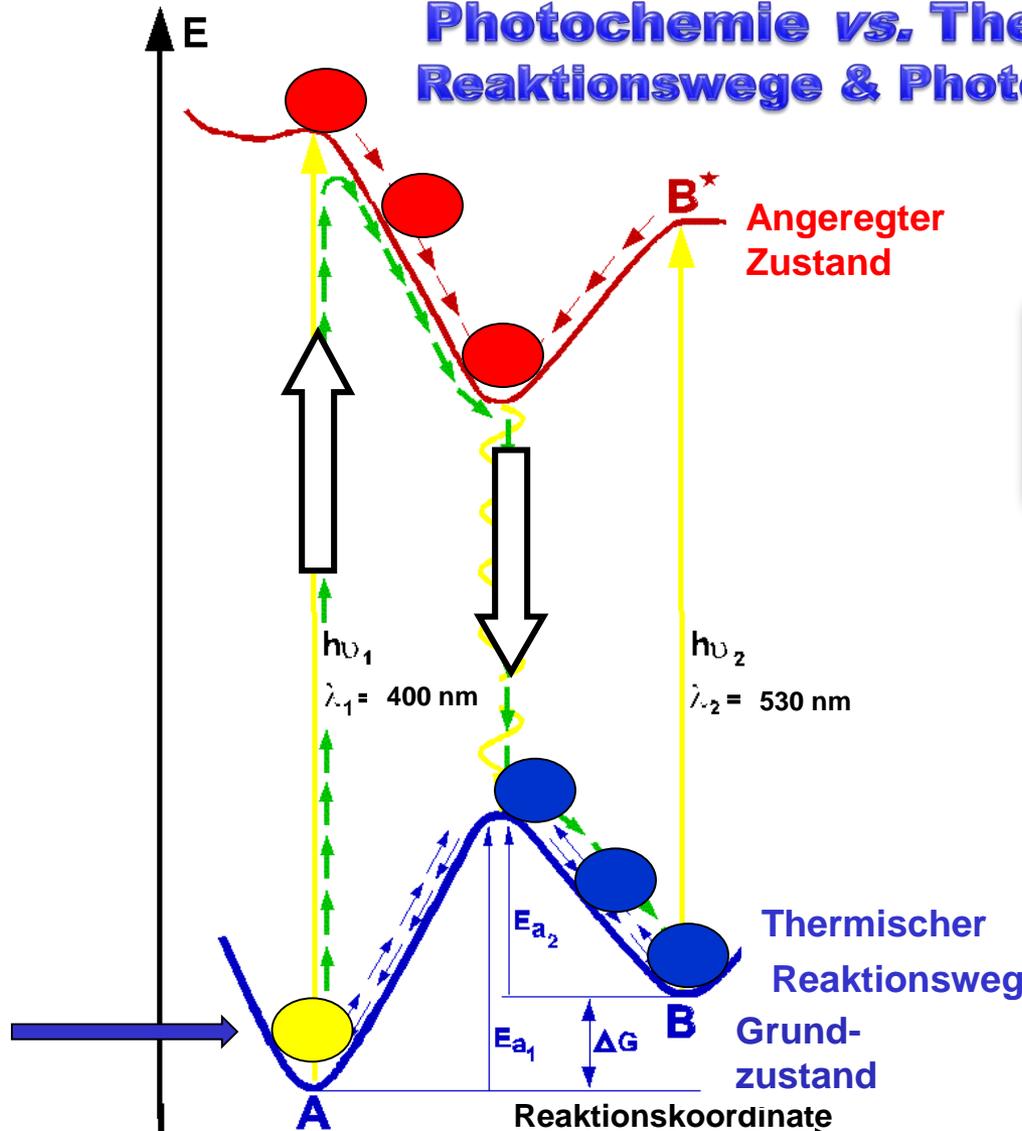
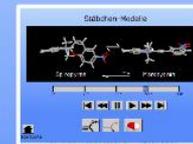


Photo-steady state

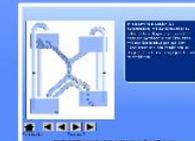
Exploration
of the concept
with the
substance
spiropyrane



Molecular structures
of spiropyrane/merocyanine



Energy profile
of the reaction



Simulation based on
discrete particle model



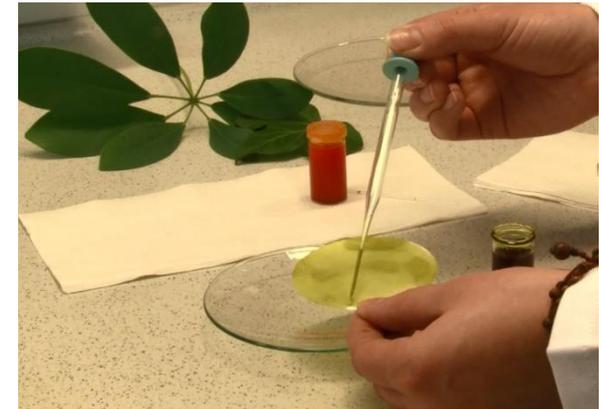
Simulation based on
continuous matter model



Bergische Universität Wuppertal - Chemie und ihre Didaktik © 2010 S. Krees, M. Tausch



Experimente E2-E3



Materialien für die Experimente mit Chlorophyll und β -Carotin [1]:

- Grünes Kürbiskernöl, verdünnt mit Aceton (1:1) *oder*
- Blattgrünextrakt z.B. in Ethanol
- Carotin-Kapseln, angestochen und gelöst in Cyclohexan, Heptan oder Toluol
- LED Taschenlampe (violett oder UV)

[1] <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/filme-videos/photoredoxreaktionen/photosynthese-ein-fall-fuer-zwei-teil-2-von-2/>

E3 β -Carotin als Fluoreszenzlöcher und Photoprotektor für Chlorophyll:

Für diesen Versuch werden die beiden Lösungen aus E2 benötigt:

Lösung 1: Blattgrünextrakt im Schnappdeckelglas aus Experiment E2.

Lösung 2: β -Carotin-Lösung im braunen Schraubdeckelglas aus Experiment E2.

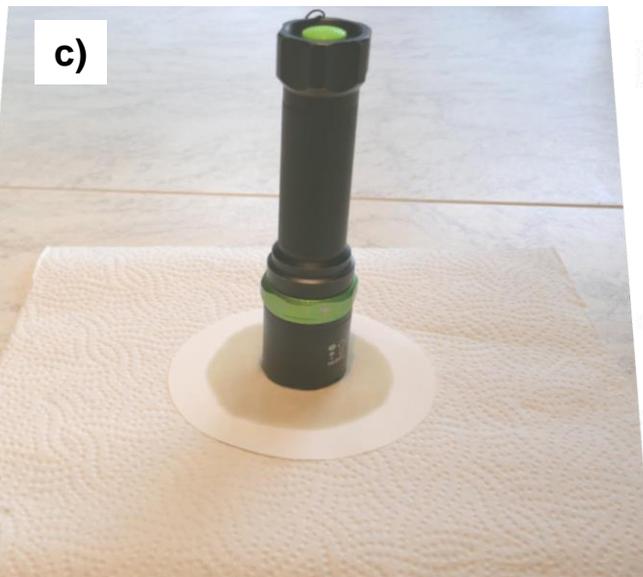


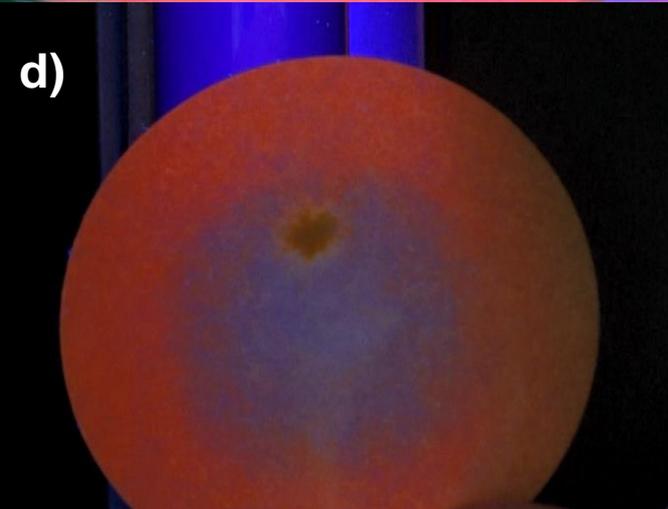
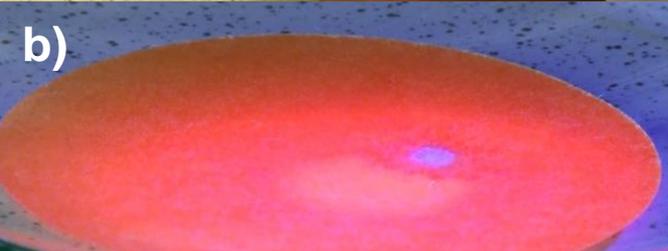
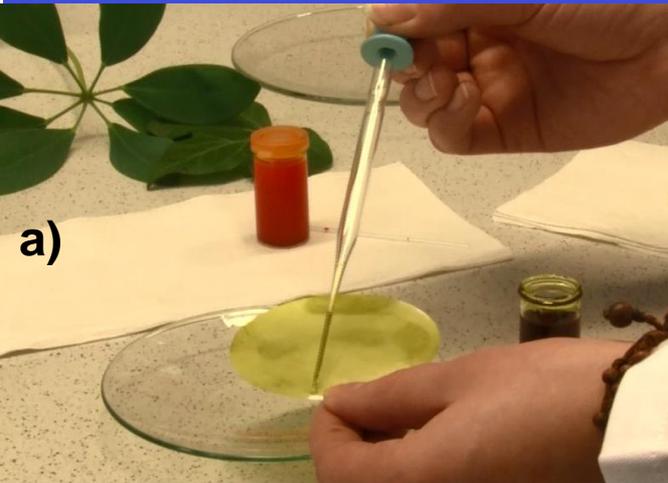
a) Tränke einen Rundfilter ($d \approx 11$ cm) wie im oberen Bild mithilfe einer Pipette mit Lösung 1. Betrachte nach dem Trocknen das so präparierte Filterpapier im Licht UV-LED-Taschenlampe.

b) Trage mit einem Kapillarröhrchen in die Mitte des mit Blattgrün präparierten Filterpapiers aus a) einen Rundfleck ($d \approx 0,5$ cm) aus Lösung 2 auf (ein Tupfer reicht). Betrachte nach Verdunsten des Lösemittels erneut im Licht der UV-LED-Taschenlampe.

c) Stelle die eingeschaltete UV-LED-Taschenlampe mittig auf das Filterpapier und bestrahle 4 min lang.

d) Betrachte danach die gesamte Fläche des Rundfilters bei Tageslicht und im Licht der UV-LED-Taschenlampe. Stelle die Unterschiede zwischen den verschiedenen behandelten Teilflächen fest.





β -Carotin als Fluoreszenzlöcher und Photoprotektor für Chlorophyll:

Für diesen Versuch werden die beiden Lösungen aus E2 benötigt:

Lösung 1: Blattgrünextrakt im Schnappdeckelglas aus Experiment E2.

Lösung 2: β -Carotin-Lösung im braunen Schraubdeckelglas aus Experiment E2.

- Tränke einen Rundfilter ($d \approx 11$ cm) auf der ganzen Fläche mithilfe einer Pipette mit Lösung 1. Betrachte nach dem Trocknen das so präparierte Filterpapier im Licht UV-LED-Taschenlampe.
- Trage mit einem Kapillarröhrchen in die Mitte des mit Blattgrün präparierten Filterpapiers aus a) einen Rundfleck ($d \approx 0,5$ cm) aus Lösung 2 auf (ein Tupfer reicht). Betrachte nach Verdunsten des Lösemittels erneut im Licht der UV-LED-Taschenlampe.
- Stelle die eingeschaltete UV-LED-Taschenlampe mittig auf das Filterpapier und bestrahle 4 min lang.
- Betrachte danach die gesamte Fläche des Rundfilters bei Tageslicht und im Licht der UV-LED-Taschenlampe. Stelle die Unterschiede zwischen den verschiedenen behandelten Teilflächen fest.



Auswertung Sek. I

Farben und Leuchtfarben

Lumineszenz = Emission von Licht



**Kastanien-
zweig**

Farben und Leuchtfarben Aufgabe A1



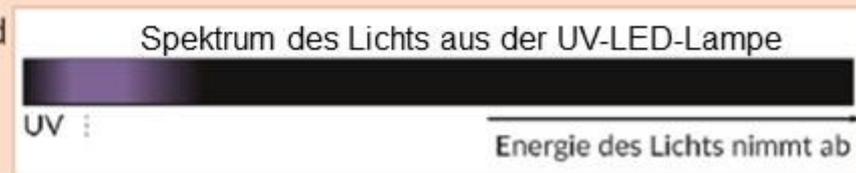
A1 Ergänze den Lückentext mit folgenden Begriffen:

Weißes Licht, grünes, rotes, Rotes Licht, Violett, Farben, Prismas, Regenbogens, Energieform, energiereicher, energieärmer, Spektralfarben, Spektrum, UV-LED-Lampe

..... lässt sich mithilfe eines in
alle des, zerlegen. Die
..... des weißen Lichts setzen sich wie rechts
dargestellt zusammen. Licht ist eine



Violettes Licht ist als Licht und
..... Licht.



..... ist als grünes.
Die strahlt Licht aus, in dessen
..... alle Farben außer fehlen.

Farben und Leuchtfarben

Aufgabe A2



A2 Bezeichne die Aussagen mit wahr oder falsch und begründe mit deinen Beobachtungen:

- Die Farbe, in der wir einen Stoff sehen, hängt nicht von dem Licht ab, das auf den Stoff fällt.
- Im Sonnenlicht zeigen Stoffe durch **Absorption** von Licht nur **Farben** die im Sonnenlicht enthalten sind.
- Im Licht der UV-LED-Lampe erzeugen Stoffe durch **Emission** von Licht nur **Leuchtfarben (Fluoreszenz)**, die im Licht der UV-LED-Lampe enthalten sind.
- Leuchtfarben entstehen, indem Stoffe energiereicheres Licht in energieärmeres umwandeln.

Chlorophyll und β -Carotin Aufgabe A4

A4: Bewerten Sie die folgenden Aussagen mit **w**(ahr) oder **f**(alsch) und **begründen** Sie mündlich mithilfe der experimentellen Beobachtungen aus E3:

- grünes Chlorophyll erzeugt rote Fluoreszenz.
- β -Carotin löscht die Fluoreszenz von Chlorophyll.
- gelbes β -Carotin fluoresziert blau.
- Chlorophyll wird im starken Licht an der Luft zerstört (abgebaut).
- Chlorophyll erzeugt Fluoreszenz wenn es mit grünem Licht bestrahlt wird.
- β -Carotin beschleunigt den Abbau von Chlorophyll bei starkem Licht.
- β -Carotin hemmt den Abbau von Chlorophyll bei starkem Licht

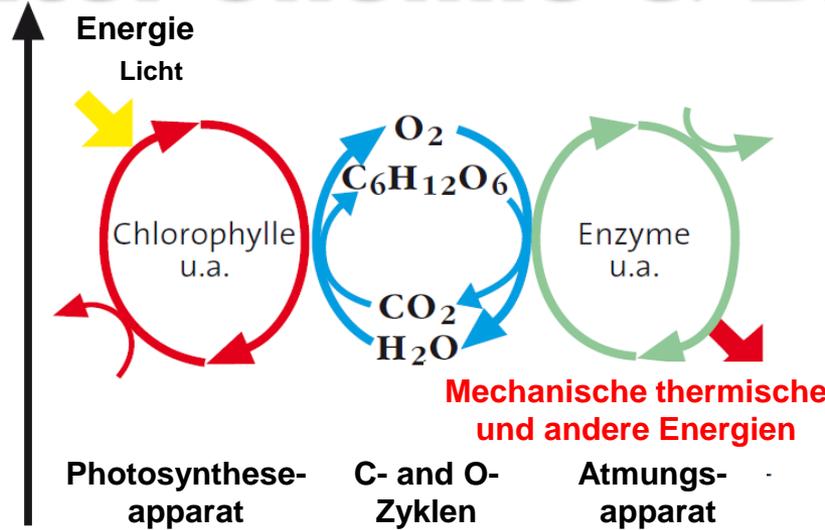




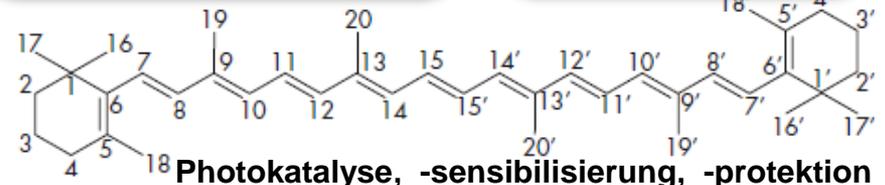
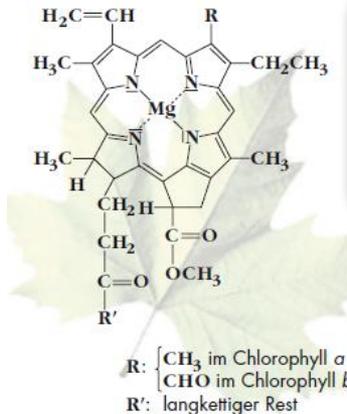
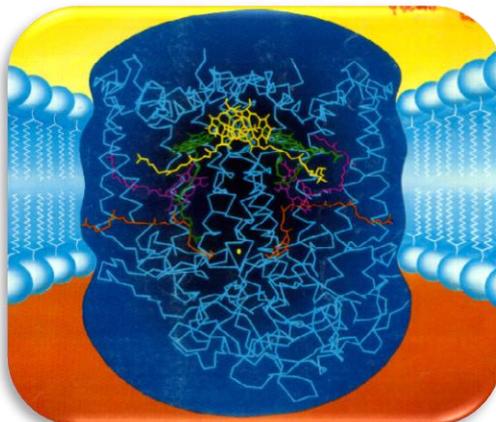
Auswertung E2-E3 & Theor. Vertiefung



Fachinhalte: Chemie & Biologie

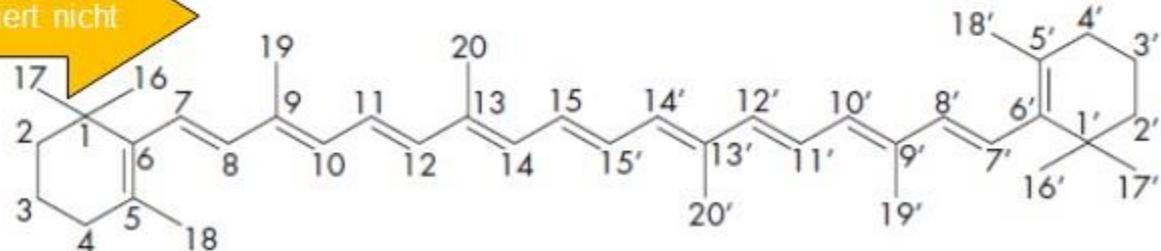
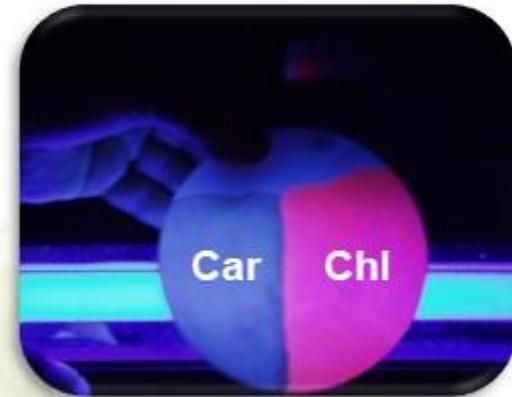
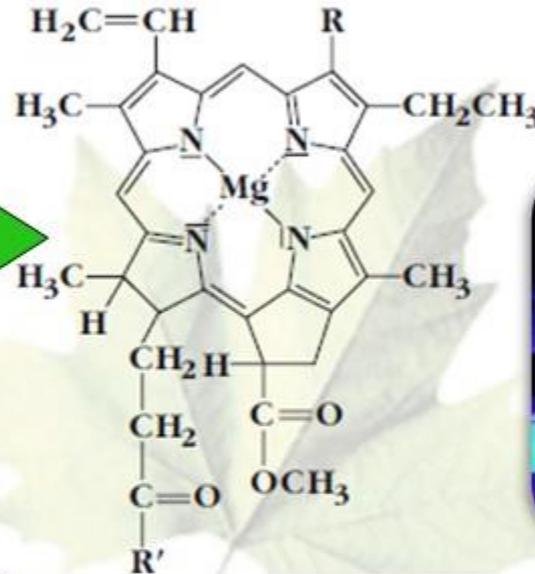
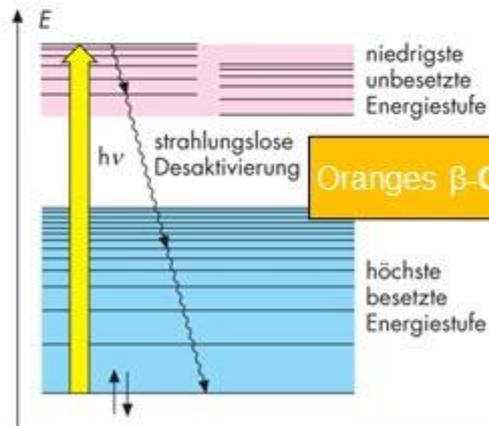
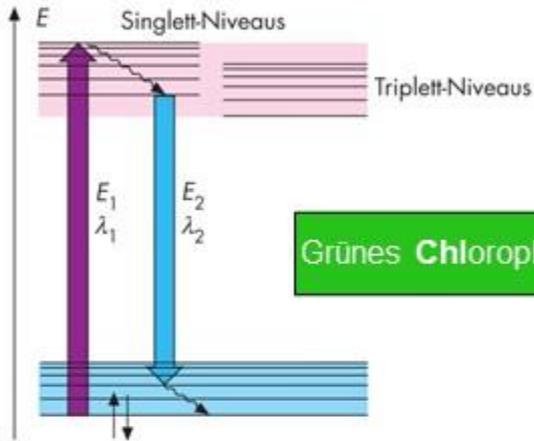


Stoffkreislauf Photosynthese-Zellatmung in der Biosphäre



Funktionen von Chlorophyll und β -Carotin bei der Photosynthese

Fluoreszenz: Energiestufenmodell und Relation Struktur/Eigenschaften

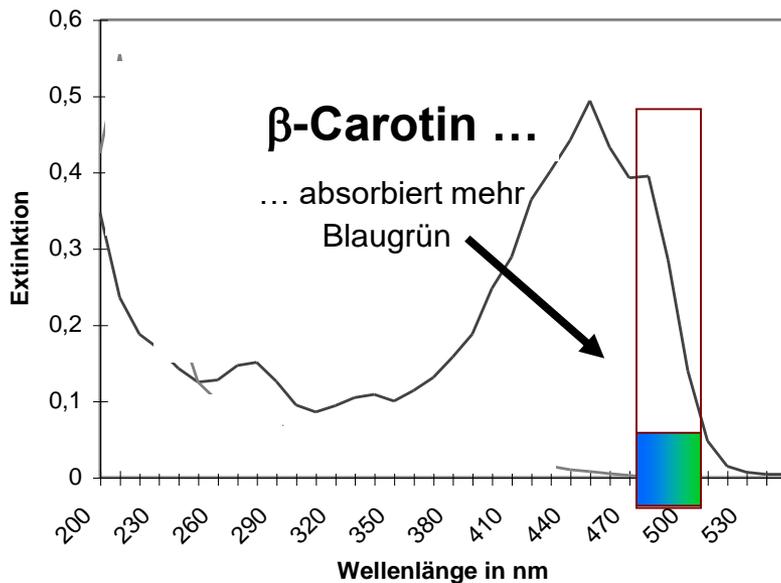
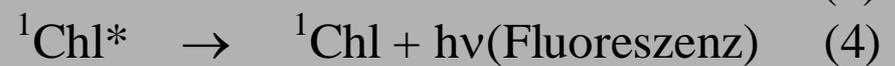
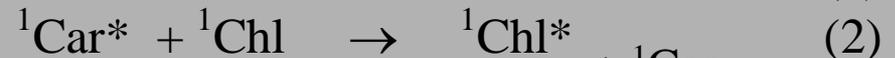


A10: Fluoreszenz kommt zustande, wenn Moleküle nur eingeschränkt schwingen können. *Erläutern* Sie, wie die Schwingungsmöglichkeiten im **Chl**- und **Car**-Molekül in den Diagrammen dargestellt sind. **A11:** *Vergleichen* Sie die Chromophore (konjugierte Doppelbindungen) im **Chl**- und **Car**-Molekül. *Leiten* Sie daraus und aus A1 zwei strukturelle Voraussetzungen für Fluoreszenz ab.

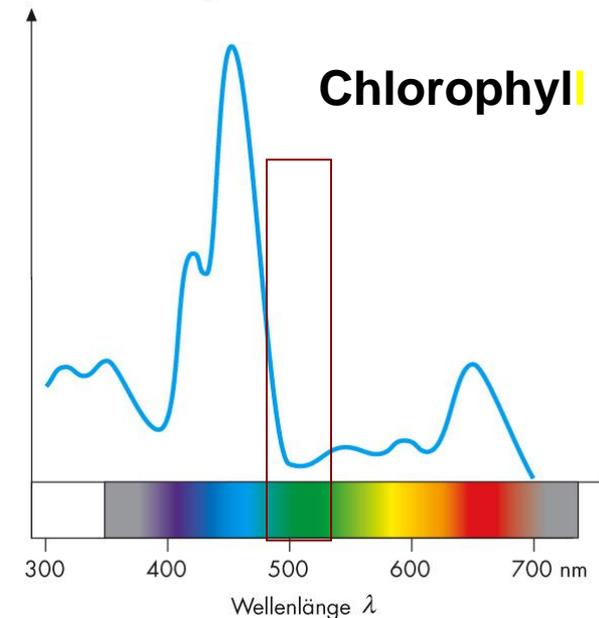


β-Carotin – Akzessorisches Pigment

Bei wenig
Licht



absorbierter Strahlungsanteil





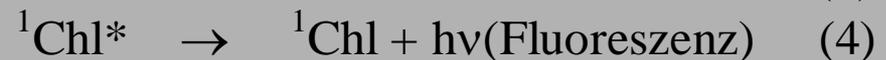
β -Carotin – Biochemisches Multitalent



Bei (zu) wenig
Licht

Bei (zu) viel
Licht

β -Carotin als Photosensibilisator



Phototoxizität von Sauerstoff



β -Carotin als Photoprotektor



<https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/>

Photosynthese – ein Fall für zwei

Teil 2: Funktionen von Chlorophyll und β -Carotin

Lehrfilm

Photosynthese – ein Fall für Zwei; Teil 2

A1 *Erschließen* Sie den Lehrfilm auf der Seite chemiemitlicht.uni-wuppertal.de und achten Sie dabei besonders auf die Umwandlung der Photonen bei der Fluoreszenz.

A2 *Präsentieren* Sie den Filmausschnitt*, in dem die Eigenschaft des β -Carotins als Photoprotektor für Chlorophyll erläutert wird, und *verknüpfen* Sie die Erklärung mit Ihren Beobachtungen in dem durchgeführten Experiment.

*ab 3:24

<https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/filme-videos/photoredoxreaktionen/photosynthese-ein-fall-fuer-zwei-teil-2-von-2.html>





Experimente E4-E7



Photo-Cat Basis-Set

Herstellung der Photo-Blue-Bottle Lösung [1]:

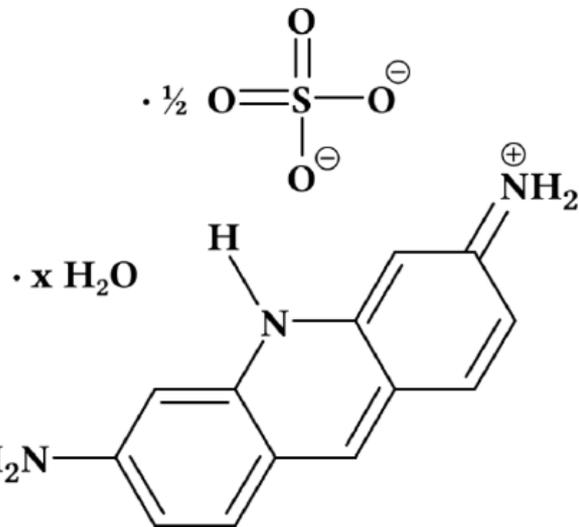
1 g EDTA, 561 mg Ethylviologen und 15 mg Proflavin werden in einem Becherglas unter Rührung in 500 mL dest. Wasser gelöst. Die gelbe, schwach fluoreszierende Lösung wird in eine braune 500 mL Flasche gefüllt. Falls keine braune Flasche vorhanden ist, kann auch eine aus farblosem Glas genutzt werden, wenn sie in Alufolie lichtdicht verpackt wird. So ist sie unter Lichtausschluss mehrere Monate haltbar.

[1] <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/experimentierkoffer-materialiensets/qr-33-experimentierset-photo-cat/basisversion/>

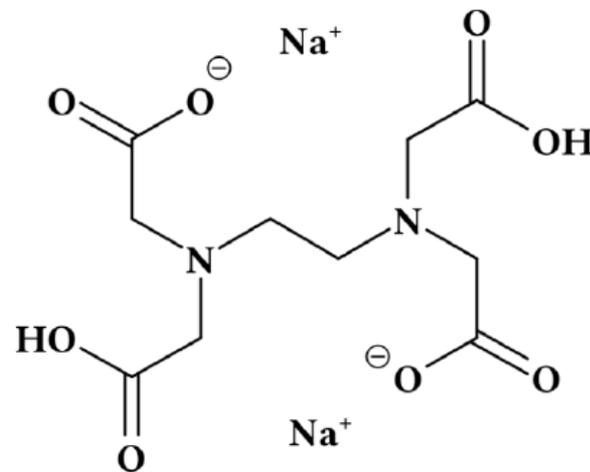


Photo-Blue-Bottle

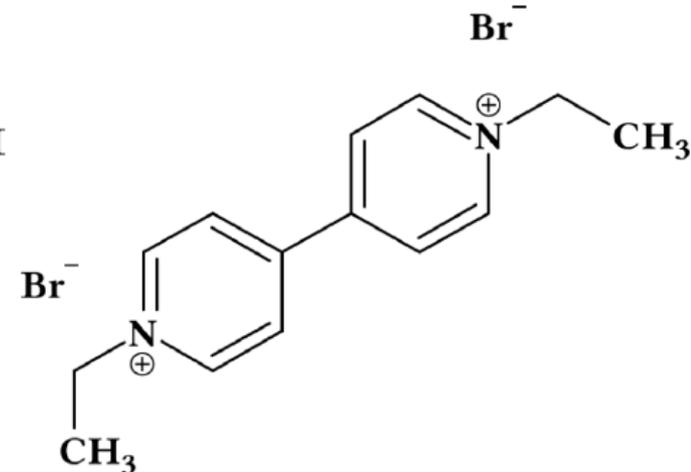
Drei Chemikalien - viele Versuche



Photokatalysator
Proflavin PF⁺
Diaminoacridin-hemisulfat

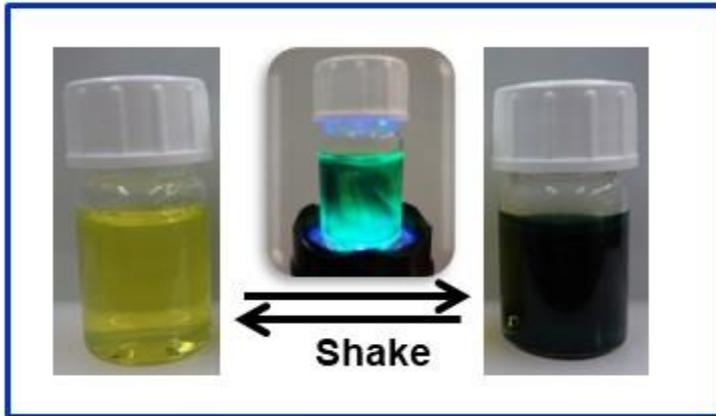


Opferdonor
EDTA
Ethyldiaminetetraessigsäure-dinatriumsalz



Substrat
Ethylviologen EV²⁺
1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridiniumdibromid

E4 Photo-Blue-Bottle Basisexperiment



Basisexperiment

- Gib in ein 5 mL-Schraubdeckelgläschen mithilfe der Plastikpipette 4 mL PBB-Lösung. Verschließe das Gläschen mit der Schraubkappe und bestrahle die Lösung mit einer **blauen** UV-LED-Taschenlampe*, indem du die Lampe direkt an das Glas hältst. Du kannst entweder von der Seite oder vom Boden des Gläschens bestrahlen. Beobachte die Veränderungen in der Lösung.
- Schalte die LED-Lampe aus, wenn sich an der Lösung nichts mehr ändert. Lasse das Gläschen auf dem Tisch stehen und beobachte die Lösung 20 sec lang. Nimm das Gläschen dann in die Hand und schüttele es kräftig durch. Beobachte, ob und was sich dabei ändert.
- Wiederhole die Folge a) und b) noch einmal. **Blaufärbung-Gelbfärbung**

* die Bestrahlung kann auch im Freien mit Sonnenlicht durchgeführt werden

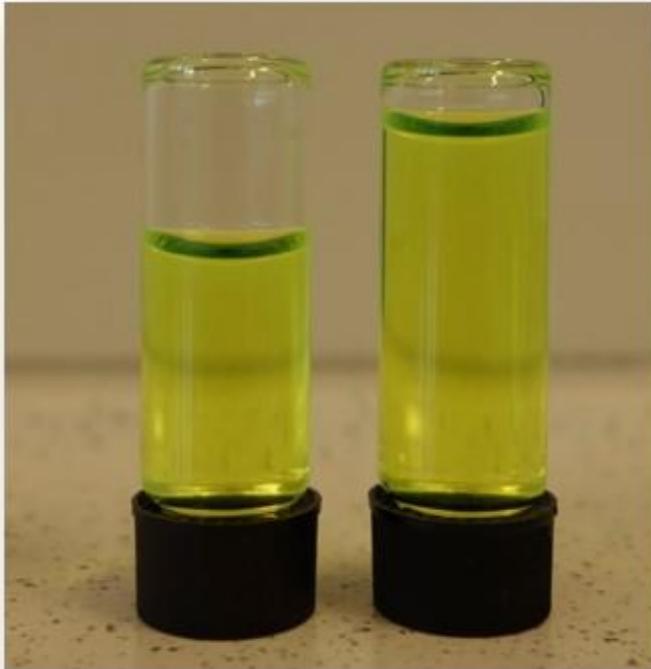


Photo-Blue-Bottle

Forschung zu den Versuchsparametern

Gas, Lichtfarbe, Energieform für die Blaufärbung

- E5** Führe den Zyklus Blaufärbung-Gelbfärbung ca. 5 mal durch und finde dabei heraus, wie sich die Dauer der Bestrahlung bis zur Blaufärbung und die Dauer des Schüttelns bis zur Gelbfärbung verändern („wird länger“ bzw. „wird kürzer“).

Tipps:

- Fülle das Rollrandgläschen so mit PBB-Lösung, dass nach Zuschrauben und Umkippen nur eine kleine Luftblase übrig bleibt (etwa so groß wie eine Erbse).
- Bestrahle mit einer Lichtquelle (Sonne bzw. violette LED) bis zur vollständigen Blaufärbung. Schüttle dann kräftig bis sich die Lösung gelb gefärbt hat.

E6 Untersuche:

- mit welchen Lichtfarben aus LED-Taschenlampen die Blaufärbung funktioniert und mit welchen nicht;
- ob die Blaufärbung auch durch Wärmezufuhr angetrieben werden kann.

Parameter: λ , T, O₂



Auswertung E4-E7 Sek. I

benötigtes Vorwissen

Oxidation als Sauerstoffaufnahme (und Reduktion)

Luftzusammensetzung

Reaktionsschemata

Photosynthese (Biologie)

Photo-Blue-Bottle-Experiment

www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de

E1 Untersuche mit den dir bereitgestellten Geräten (Heizplatte, Taschenlampe mit Farbwechsel, UV-Taschenlampe), mit welchen Energieformen (Wärme, Licht) du eine Stoffumwandlung (chemische Reaktion) in dem Schraubdeckelglas antreiben kannst. Dabei solltest du die Bildung eines blauen Stoffes in der gelben Lösung beobachten. Dokumentiere deine Beobachtungen mithilfe der Tabelle.

Hinweis: Lichtfarben des sichtbaren Spektrums



Energieform	Farbe/Temperatur	Beobachtung

Photo-Blue-Bottle: G → B

Photo-Blue-Bottle: B → G

E2 Bewerte die folgenden Aussagen mit **w**(ahr), **f**(alsch) oder **u**(nsicher). Begründe mit Hilfe von experimentellen Beobachtungen. Plane Experimente mit denen ist möglich ist die mit **u** bewerteten Aufgaben zu klären.

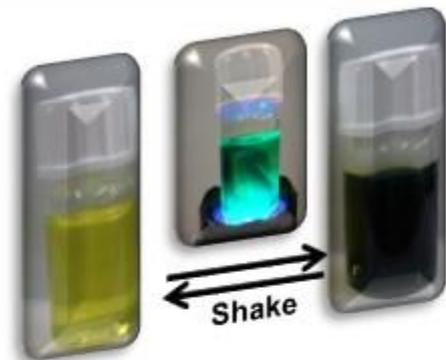
Die Reaktion Gelb(e Lösung) → Blau(e Lösung) ...

- ... benötigt Energiezufuhr.
- ... funktioniert mit jeder Farbe aus dem sichtbaren Licht.
- ... findet nicht statt, wenn keine Luft über der Lösung ist.
- ... läuft nur bei Temperaturen über 5 °C ab.
- ... verläuft unter Freisetzung von Energie.
- ... benötigt keine Luft.

Die Reaktion Blau(e Lösung) → Gelb(e Lösung) ...

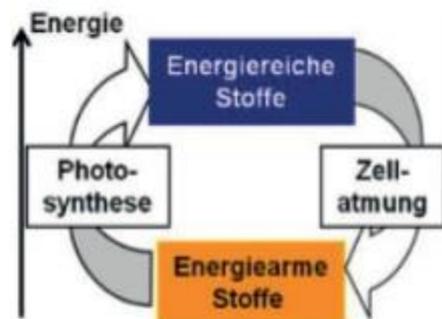
- ... verläuft durch einfaches Schütteln.
- ... verläuft auch, wenn keine Luft über der Lösung ist.
- ... läuft **nicht** bei Energiezufuhr in Form von Licht ab.
- ... benötigt Luft.
- ... verläuft unter Freisetzung von Energie
- ... benötigt nur den Sauerstoff aus der Luft.

Photo-Blue-Bottle Aufgabe A5



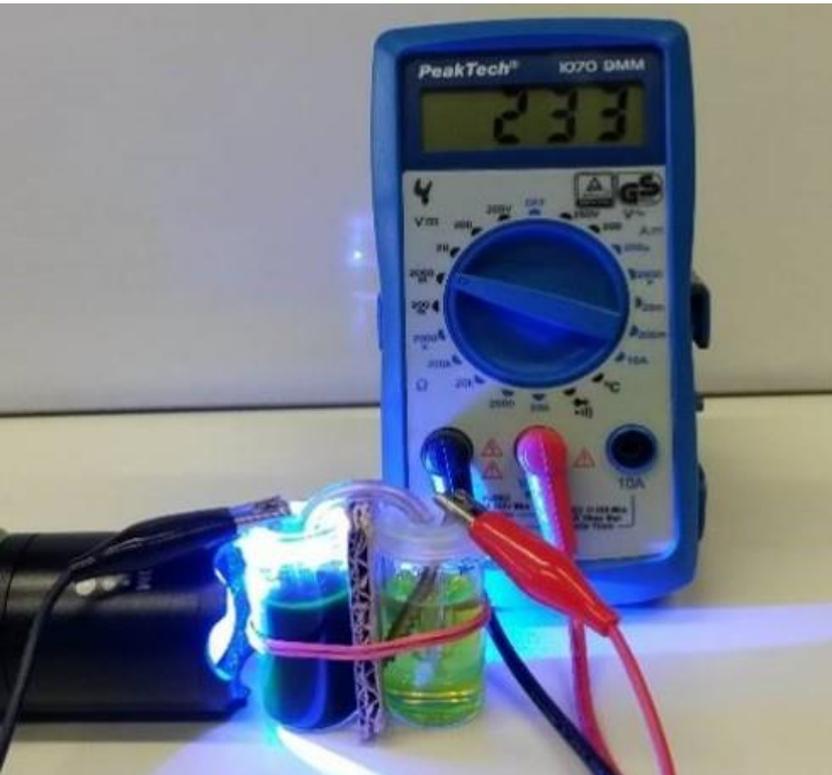
A5: Bewerten Sie die folgenden Aussagen mit **w**(ahr), **f**(alsch) oder **?**(unsicher). **Begründen** Sie mündlich mithilfe der experimentellen Beobachtungen aus E4, E5 und E6. **Planen** Sie Versuche, mit denen es möglich ist, die mit **?**(unsicher) bewerteten Aussagen zu klären, d.h. auch hier **w**(ahr), **f**(alsch) mit zu bewerten.

- Die Reaktion Gelb→Blau benötigt Energiezufuhr, die Reaktion Blau→Gelb benötigt Luft.
- Die Reaktionszyklen Gelb→Blau→Gelb in E4 sind mindestens 10 mal wiederholbar.
- Die Reaktion Gelb→Blau funktioniert mit Licht jeder Farbe aus dem sichtbaren Spektrum.
- Die Reaktion Blau→Gelb findet nicht statt, wenn keine Luft über der Lösung vorhanden ist.
- Die Reaktion Gelb→Blau verläuft bei Energiezufuhr in Form von Licht oder Wärme.
- Die Reaktion Blau→Gelb benötigt Sauerstoff.
- Die Reaktion Blau→Gelb verläuft unter Freisetzung von Energie.
- Die Reaktionszyklen im Photo-Blue-Bottle Experiment entsprechen dem natürlichen Kreislauf Photosynthese/Zellatmung.



E7 Photo-Blue-Bottle

Forschung zur
Energieumwandlung und -speicherung

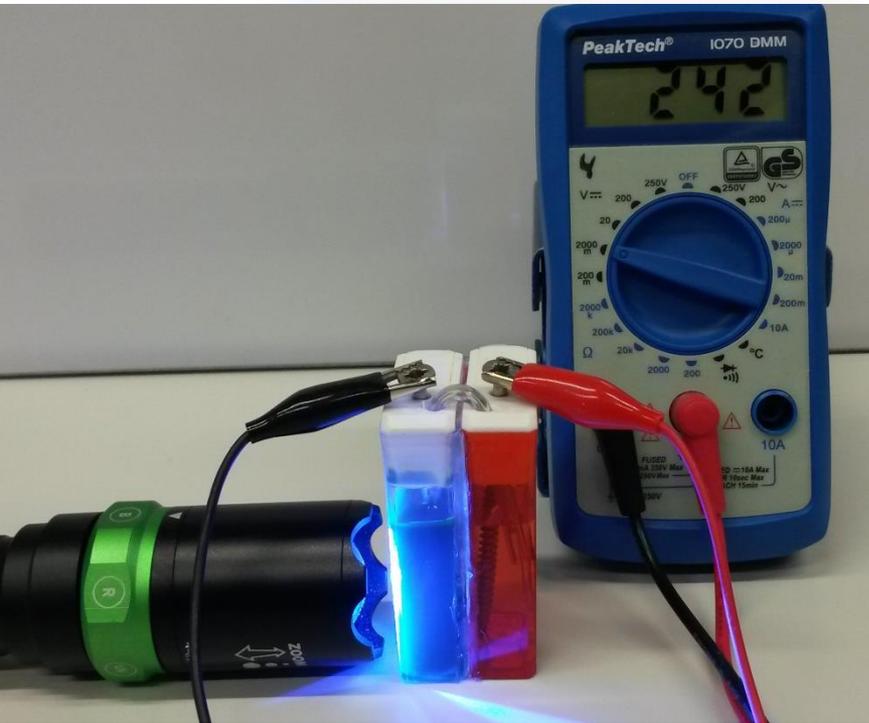


Station 5
Konzentrationszelle
mit Schnappdeckelgläsern

- Baue die photoelektrochemische Konzentrationszelle nach Anweisung durch die Betreuungsperson zusammen und schließe die zu bestrahlende Halbzelle an den Minuspol des Digitalvoltmeters an. Die Schnappdeckelgläschen sollen zu etwa 2/3 mit PBB-Lösung gefüllt sein.
- Schalte die Bestrahlung ein. Beobachte und notiere den Spannungsverlauf während der Blaufärbung in der linken Halbzelle.
- Schalte das Licht aus, wenn die Lösung in der linken Halbzelle komplett blau ist und beobachte die Spannung und die Farbe noch ca. 2 min.
- Bewege dann die Konzentrationszelle auf der Tischfläche hin und her, damit Luft in die Lösung eingetragen wird. Beobachte dabei die Farbe der Lösung und den Spannungsverlauf.

E7 Photo-Blue-Bottle

Forschung zur Energieumwandlung und -speicherung



Station 5
Konzentrationszelle
mit Tic-Tac[®]-Dosen

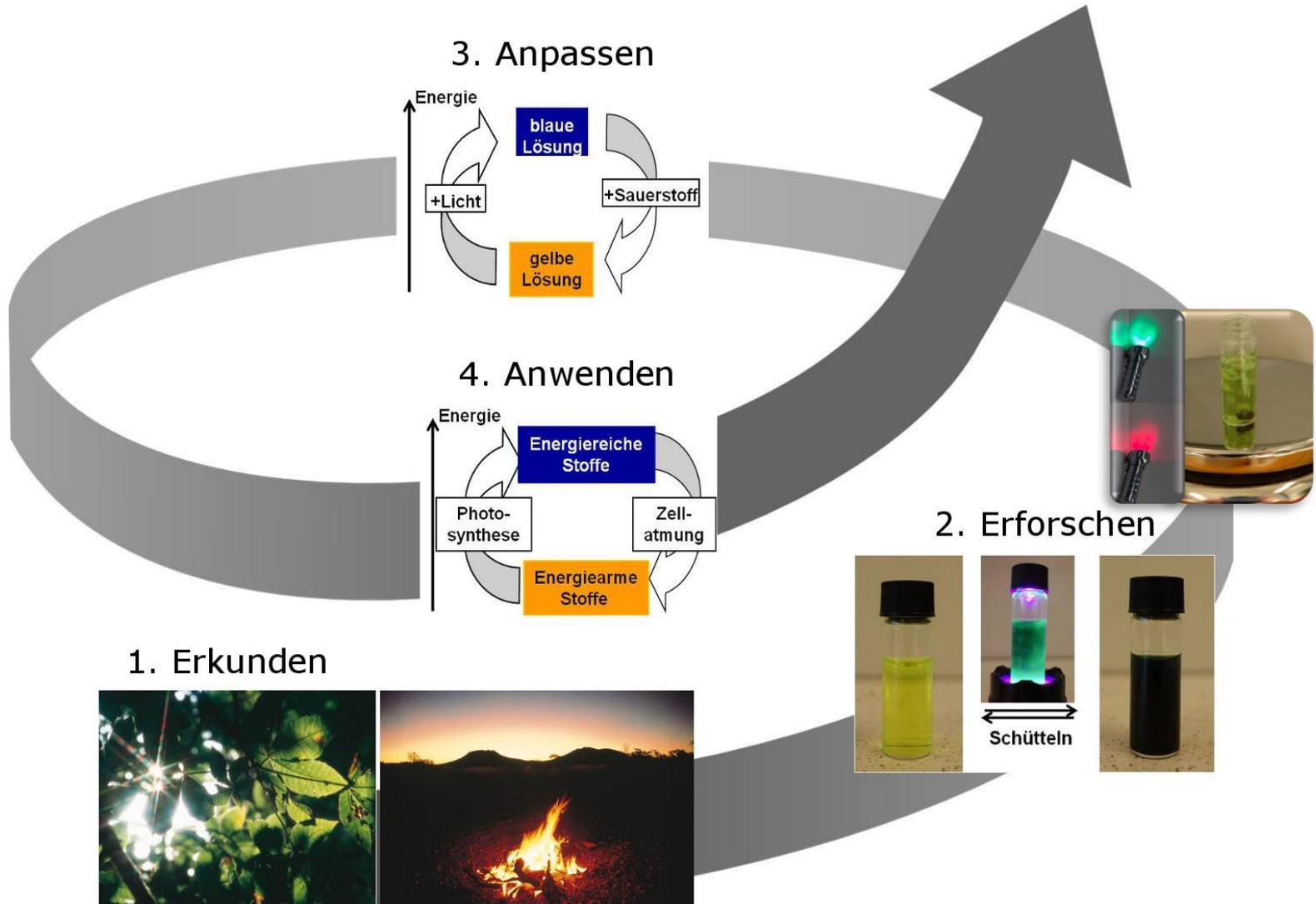
- Baue die photoelektrochemische Konzentrationszelle nach Anweisung durch die Betreuungsperson zusammen und schlieÙe die zu bestrahlende Halbzelle an den Minuspol des Digitalvoltmeters an. Die Schnappdeckelgläschen sollen zu etwa 2/3 mit PBB-Lösung gefüllt sein.
- Schalte die Bestrahlung ein. Beobachte und notiere den Spannungsverlauf während der Blaufärbung in der linken Halbzelle.
- Schalte das Licht aus, wenn die Lösung in der linken Halbzelle komplett blau ist und beobachte die Spannung und die Farbe noch ca. 2 min.
- Bewege dann die Konzentrationszelle auf der Tischfläche hin und her, damit Luft in die Lösung eingetragen wird. Beobachte dabei die Farbe der Lösung und den Spannungsverlauf.

Unterrichtsdesign - Beispiel für die Sek. I

Konstruktivistische Lernschleife zum Kontext „Kreislauf Photosynthese/Zellatmung“

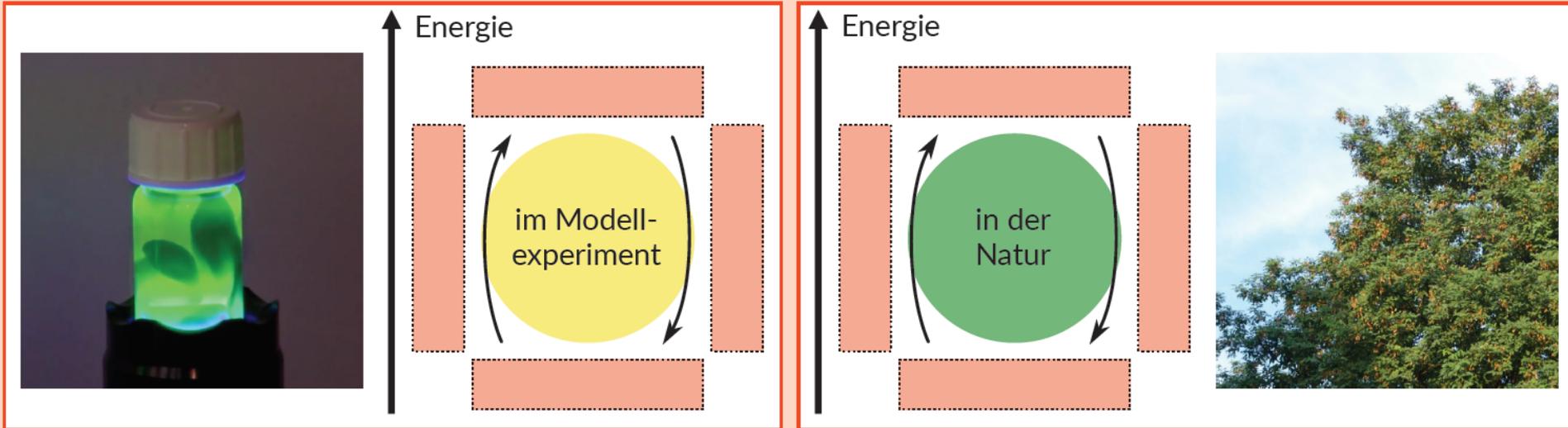


„Photosynthese und Atmung *en miniature*“



Auswertung: Von Photo-Blue-Bottle zur Photosynthese

A1 Die Reaktionszyklen Gelb → Blau → Gelb im Photo-Blue-Bottle Experiment sind ein Modell für den natürlichen Kreislauf Photosynthese/Zellatmung. Ergänze die Rechtecke in der Abbildung mit folgenden Begriffen: *gelbe Lösung*, *Zellatmung*, *Photosynthese*, *blaue Lösung*, *+ Sauerstoff*, *+ Licht*, *energiereiche Stoffe*, *energiearme Stoffe*



A2 Entscheide und begründe, welche der Pfeile in den Abbildungen von A1 eine Oxidation und welche eine Reduktion darstellen.

A3 Gib Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Modellexperiment und dem natürlichen Kreislauf Photosynthese/Zellatmung an.

A4 Beurteile das Modellexperiment, indem du Vor- und Nachteile nennst.

Für besonders Schnelle:

A5 „Ich verbrenne (beim Atmen) Kalorien.“ Nimm Stellung dazu, indem du dein Wissen über die Verbrennung (Oxidation) nutzt.

A6 Nenne alle Energieformen, die du bisher in den naturwissenschaftlichen Fächern kennengelernt hast. Gib eine Einsatzmöglichkeit und die Funktion der jeweiligen Energieform an.

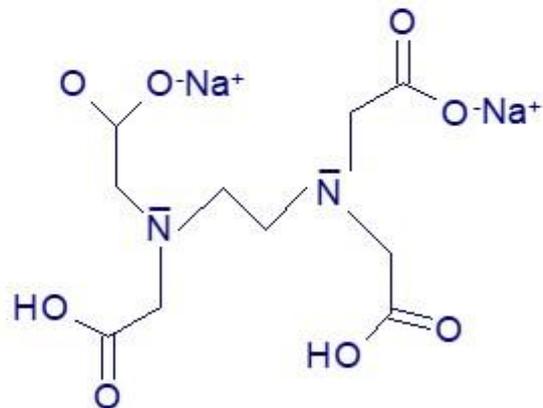


Auswertung E4-E7 & Theor. Vertiefung

Chemikalien im PBB Experiment



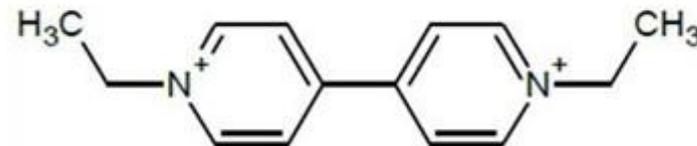
Proflavin PF⁺
(Diaminoacridinhemisulfat)



Opferdonor

EDTA

Ethylendiaminotetraessigsäure-
dinatriumsalz



Substrat

Ethylviologen EV⁺⁺

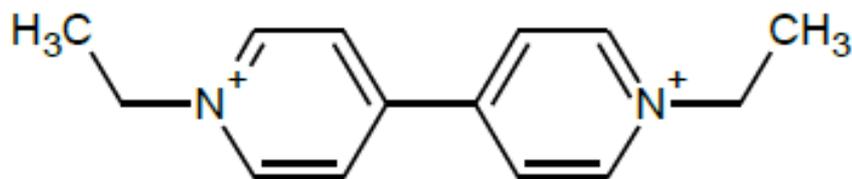
(1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridiniumdibromid)

- **3 Chemikalien**
- **+ Luft**
- **+ Wasser**

A18: Erklären Sie, warum die Chemikalien Proflavin, Ethylviologen und EDTA wasserlöslich sind.

Ethylviologen statt Methylviologen

Ethylviologen



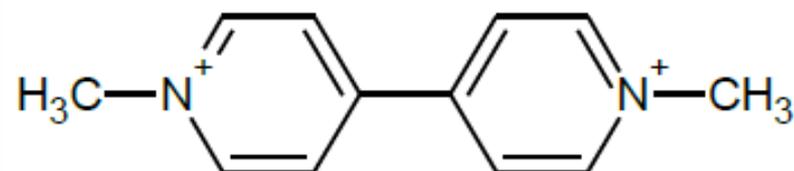
Gefahrstoffkennzeichnung

EU: Xn

GHS: 

Für den Einsatz in der Schule ab der 5. Jahrgangsstufe unter Einhaltung der TRGS500 gestattet.)

Methylviologen



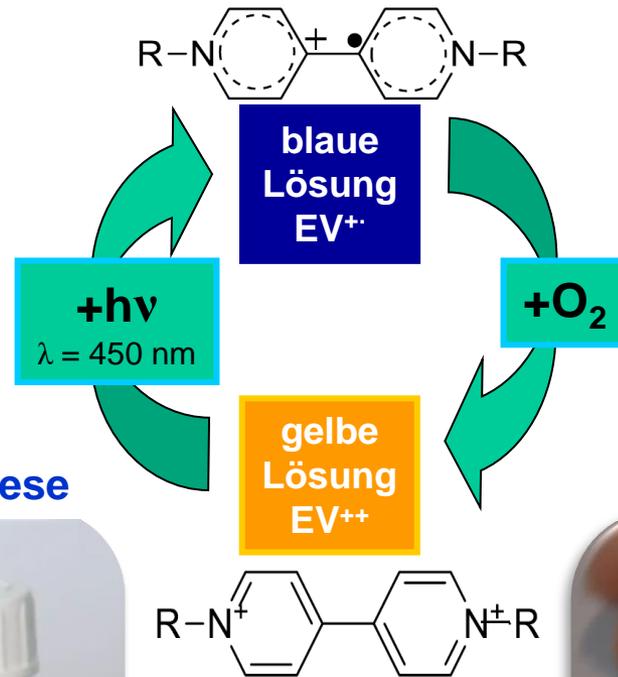
Gefahrstoffkennzeichnung

EU (bis 2015): T⁺; N

GHS: 

H372: „Schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition.“
Nach RISU-NRW: „Hohe Gefährdung.“
=> Für den Einsatz in der Schule *nur bedingt geeignet*.

Photo-Blue-Bottle



Simulation der Photosynthese



Simulation der Zellatmung

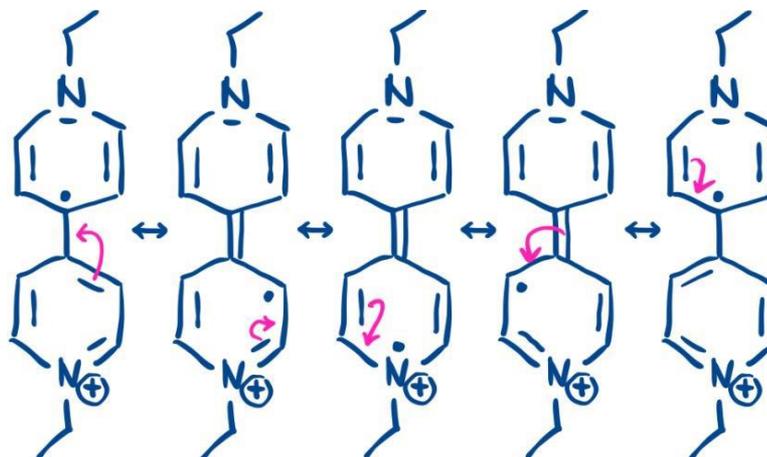
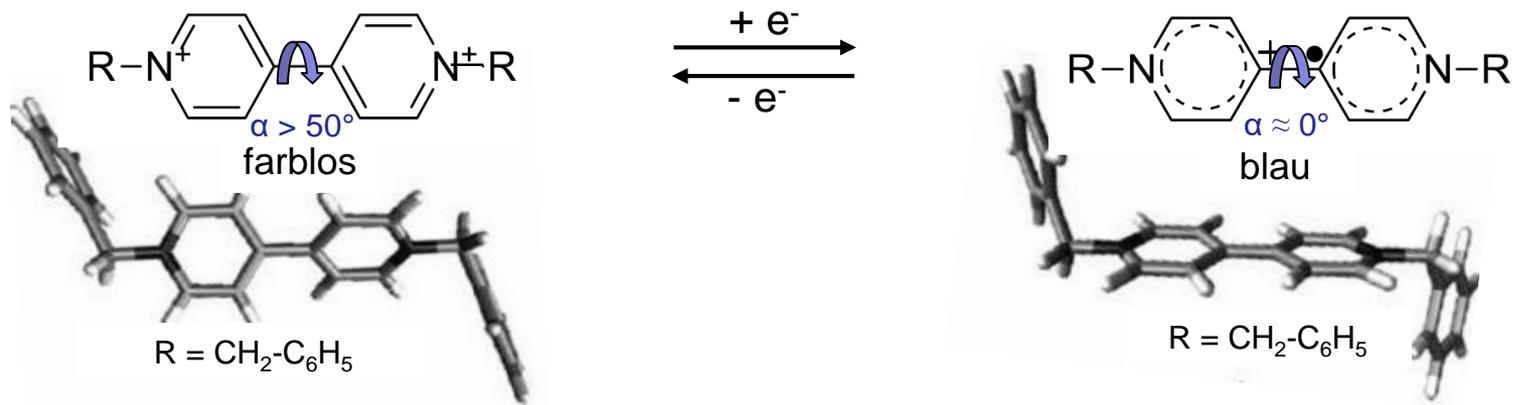


A18b: Entwickeln Sie eine Hypothese zur Erklärung des Farbunterschieds zwischen EV⁺⁺ und EV^{•+}

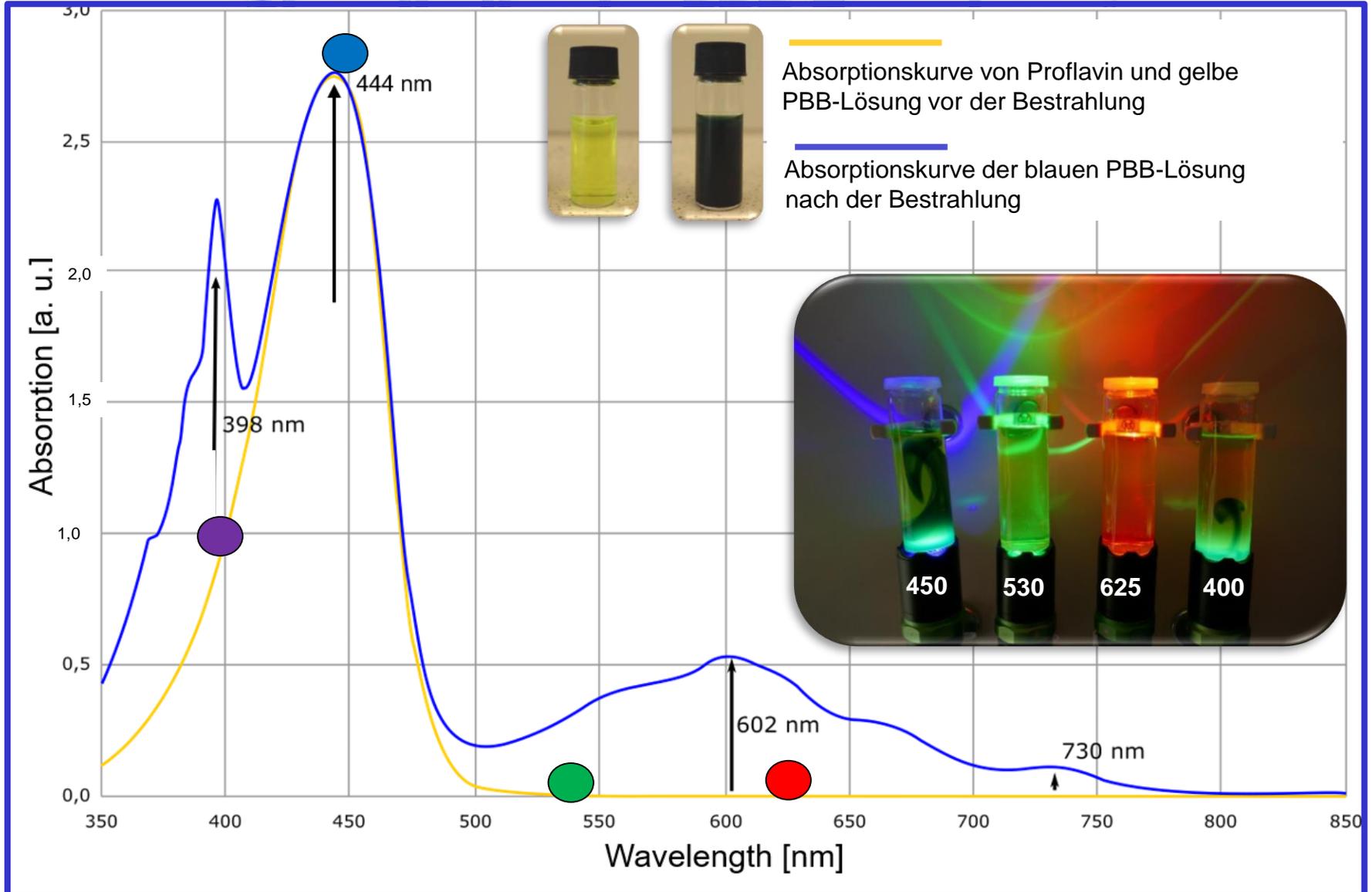


Photo-Blue-Bottle

Relation Molekülstruktur/Farbe bei EV^{++} und $EV^{\bullet+}$



A18c: Nennen Sie den wesentlichen Unterschied in der Geometrie von EV^{++} und $EV^{\bullet+}$, erklären Sie ihn mithilfe der angegebenen Grenzstrukturen und formulieren Sie noch drei weitere Grenzstrukturen.

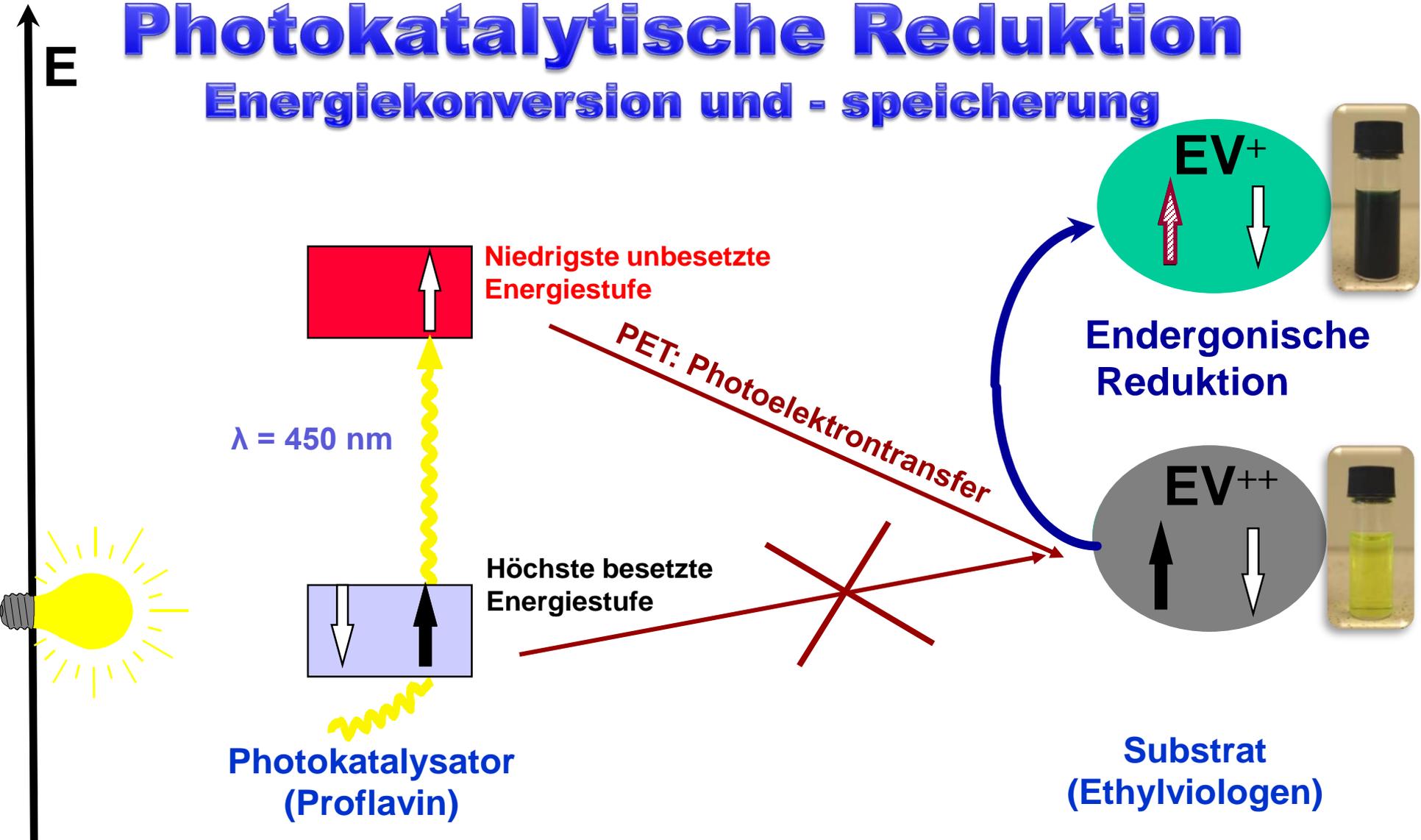


A: Begründen Sie, warum die Blaufärbung der PBB-Lösung mit blauem Licht schneller erfolgt als mit violetterm



Photokatalytische Reduktion

Energiekonversion und -speicherung

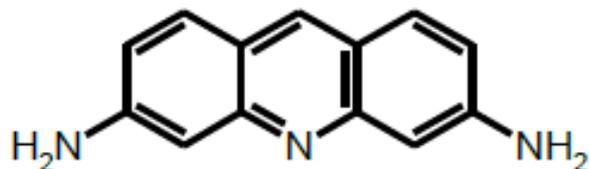


A: Erläutern Sie die endergonische Reduktion $\text{EV}^{++} \rightarrow \text{EV}^+$ und benennen Sie die antreibende Energieform



Angeregter Zustand dramatische Änderung des Redoxpotentials

Proflavin



*1/2 H₂SO₄

3,6-Diaminoacridin-hemisulfat

$$E^{\circ}(\text{PF}^+/\text{PF}^{++}) = + 1,1 \text{ V}$$

$$E^{\circ}(\text{PF}^+/\text{PF}^{++})^* = - 0,6 \text{ V}$$

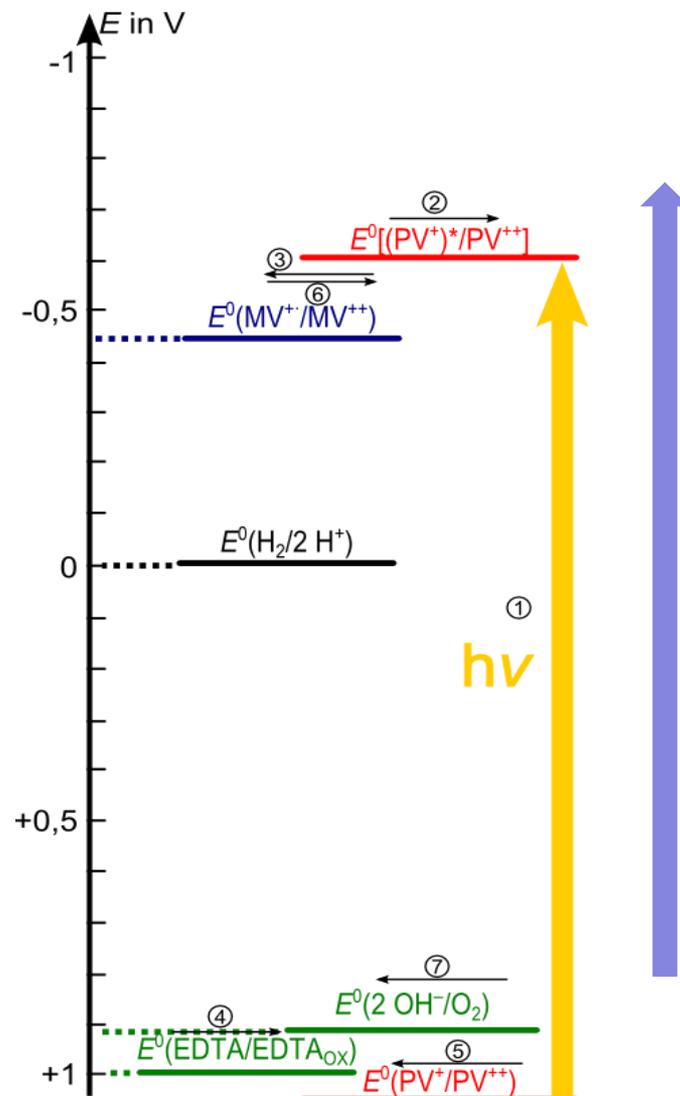
Photo-Cat im Photo-Blue-Bottle Experiment

$$E^{\circ}(\text{Ag}/\text{Ag}^+) = + 0,8 \text{ V}$$

$$E^{\circ}(\text{Zn}/\text{Zn}^{++}) = - 0,76 \text{ V}$$

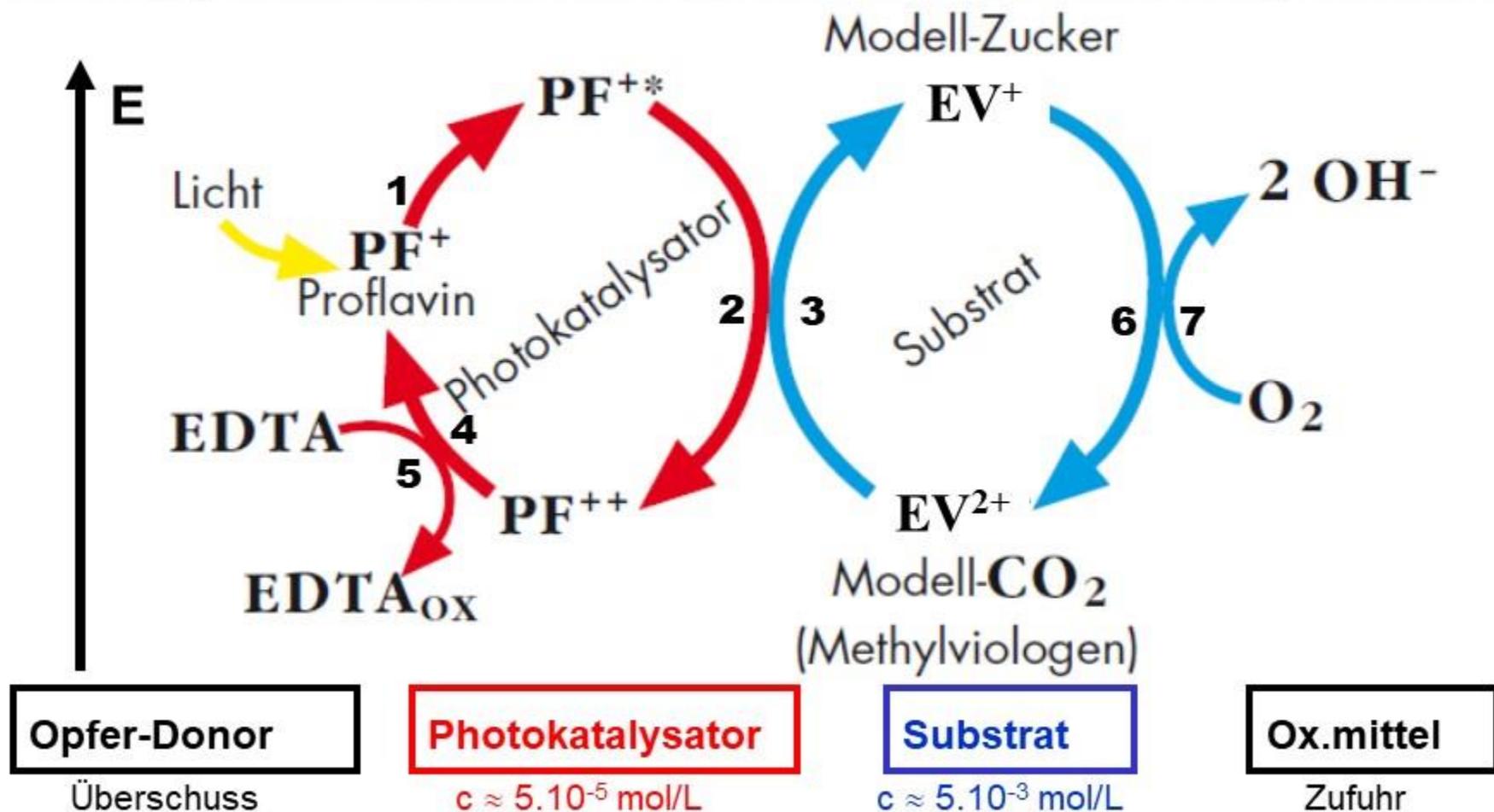
Bekannt aus Elektrochemie-Versuchen

Redoxpotentiale



A: Vergleichen Sie die Änderungen der Redoxpotentiale bei den Paaren aus dem gelben und blauen Feld.

Gekoppelte Reaktionszyklen beim PBB Experiment



A19: Ordnen Sie die folgende Begriffe den passenden Zahlen auf den Pfeilen zu: •Reduktion des Substrats EV^{2+} , •elektronische Anregung des Photokatalysators, •Oxidation des reduzierten Substrats EV^+ , •Elektronenübergang vom angeregten Photokatalysator auf das Substrat.

E
X
P
E
R
I
M
E
N
T

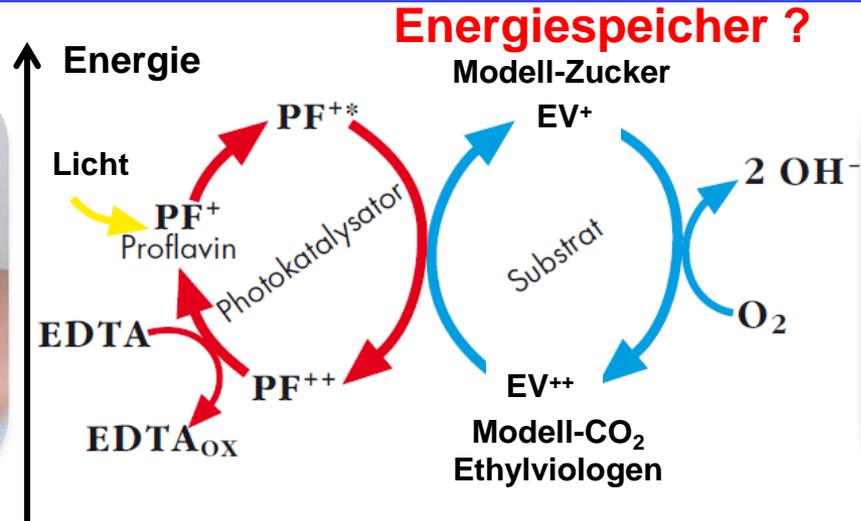
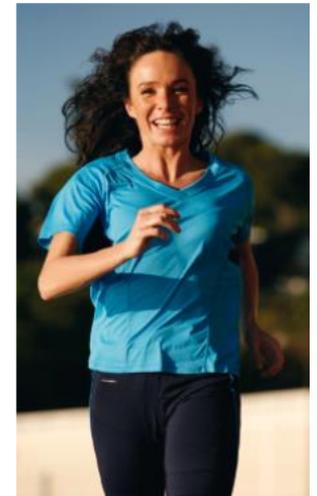
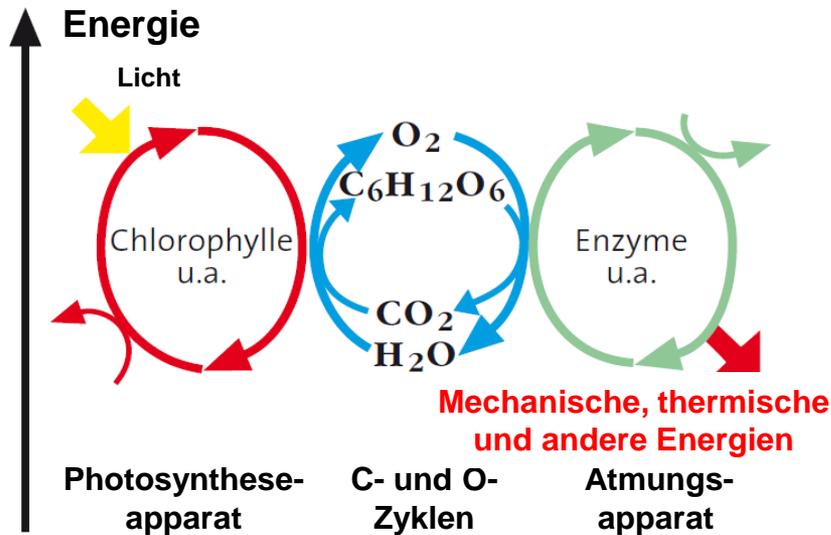


Photo-Blue-Bottle – Modellexperiment für Photosynthese/Atmung

N
a
t
u
r

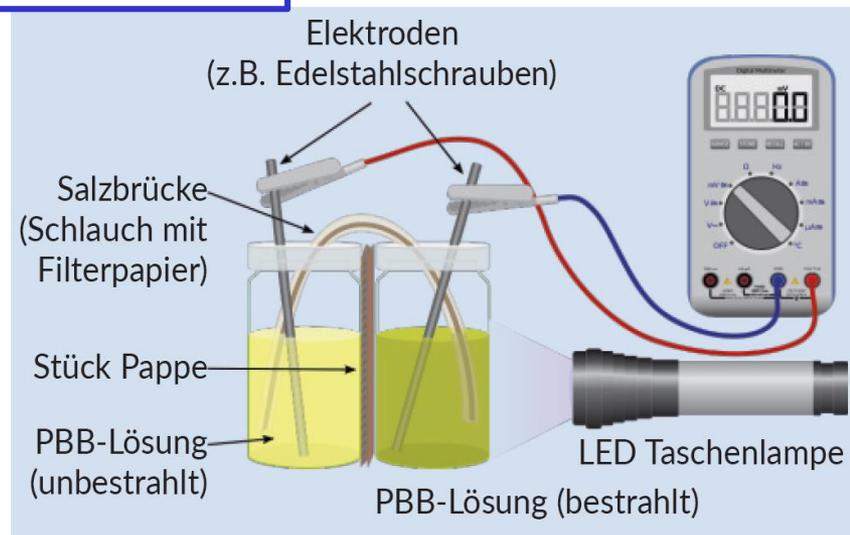
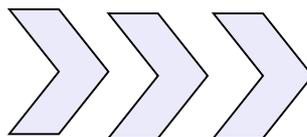
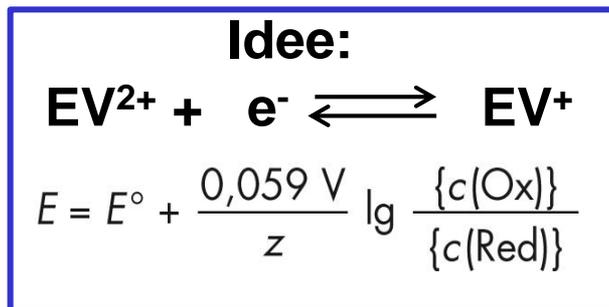
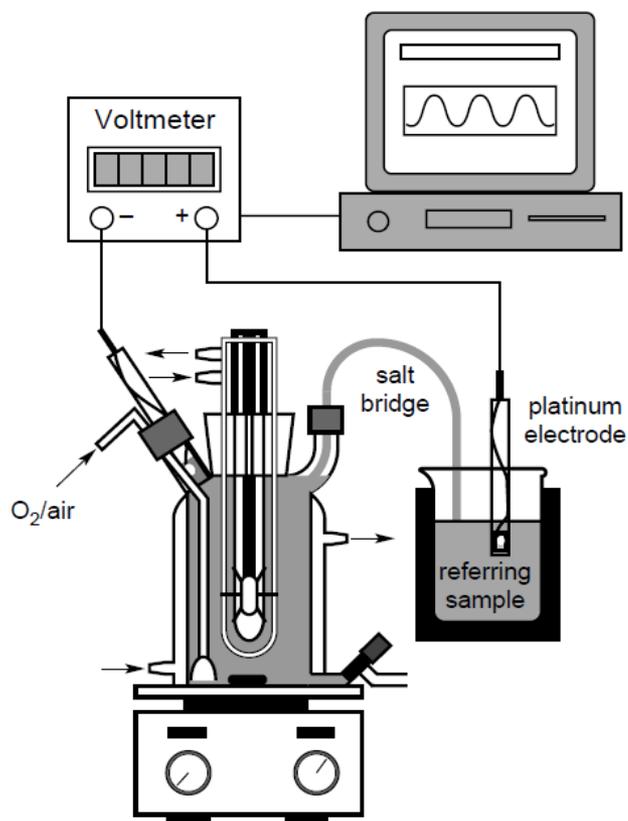


A: Beurteilen Sie die Anordnung von EV⁺⁺ und EV⁺ bzw. CO₂ und C₆H₁₂O₆ bezüglich der Energie-Achse.



Photo-Blue-Bottle

Energiekonversion- und speicherung?



Hightech-Tauchlampenreaktor (500 mL)

Lowcost-Microscale-Konzentrationszelle (3 mL)

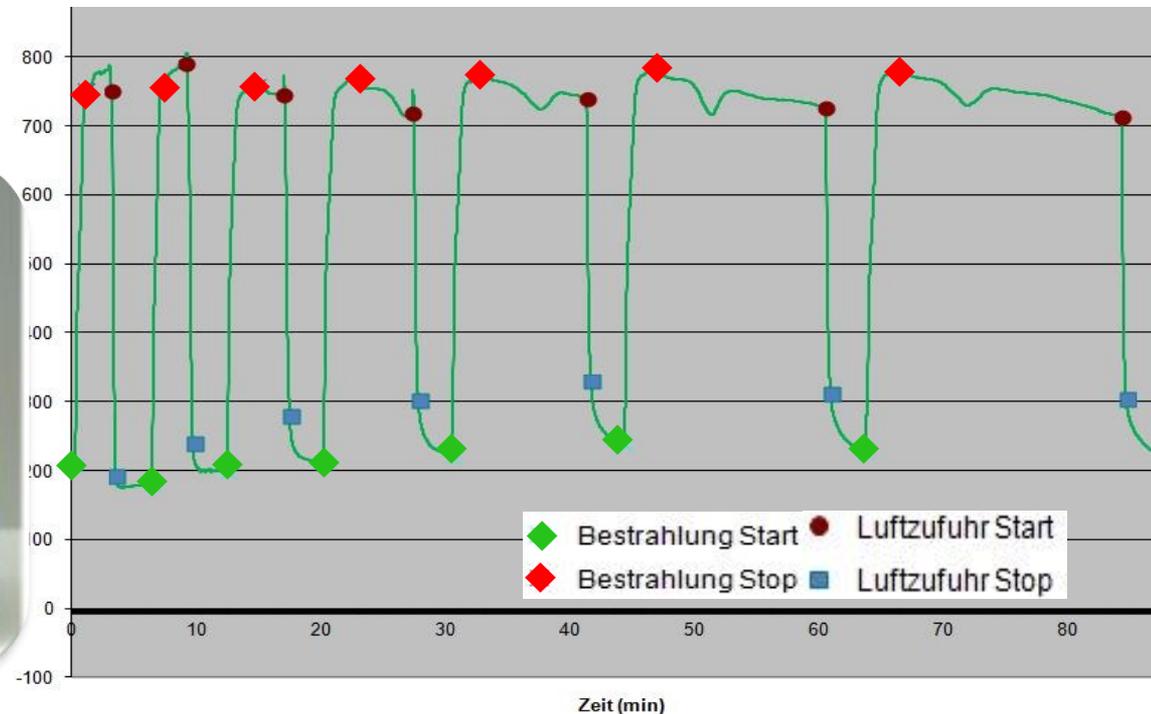
Photo-Blue-Bottle als Konzentrationszelle

Fazit:

Licht wird in chemische Energie umgewandelt
und im reduzierten Substrat gespeichert.

→ **PBB ist ein „Solaraku“**

Spannungsverlauf bei mehreren Zyklen



Energiekonversion und -speicherung beim Photo-Blue-Bottle Experiment

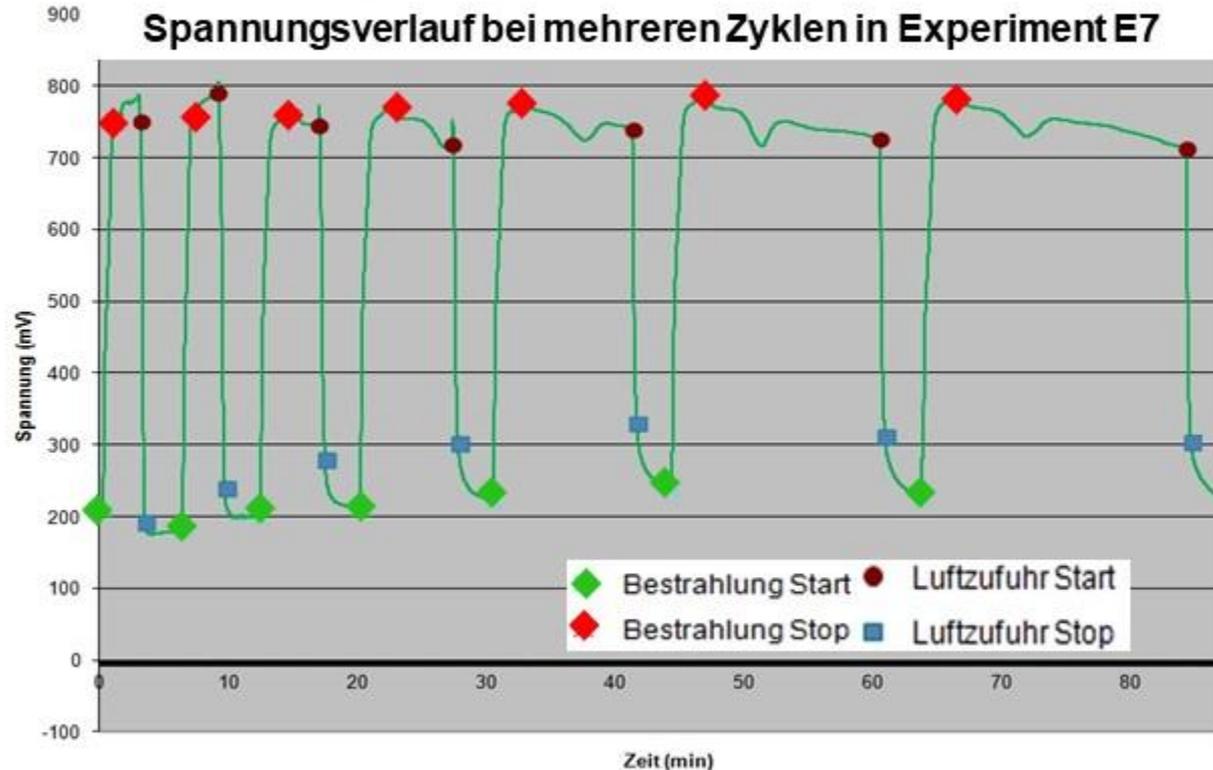


E7



$$E = E^\circ + \frac{0,059 \text{ V}}{z} \lg \frac{\{c(\text{Ox})\}}{\{c(\text{Red})\}}$$

Spannungsverlauf bei mehreren Zyklen in Experiment E7



A21: Begründen Sie mithilfe der NERNST-Gleichung, warum die bestrahlte Halbzelle an den Minuspol des Digitalvoltmeters angeschlossen wird.

A22: Erläutern Sie, warum die PBB-Konzentrationszelle als „Solarakku“ bezeichnet werden kann.

A23: Berechnen Sie das Verhältnis $c(\text{Red})/c(\text{Ox})$ im PBB-Experiment, wenn in der Konzentrationszelle eine Spannung von $U = 300 \text{ mV}$ gemessen wird.



Analogien



Photosynthese/Atmung

Phänomene Beteiligung von:

- a) farbigen Stoffen (Chl, Car u.a.)
- b) Gasen und gelösten Stoffen
- c) Licht u.a. Energieformen

Stoffkreisläufe, Stoffe:

- a) Kreisläufe von C, O, Chl...
- b) Sauerstoffverbrauch bei der Ox.

Reaktionstypen, Energiekonversion:

- a) Reduktion - enderg. / Licht
- b) Oxidation - exerg. / Wärme, Arbeit..
- c) Anregung, Photoelektronentransfer

Photo-Blue-Bottle

Phänomene Beteiligung von:

- a) farbigen Stoffen (PF, MV)
- b) Gasen und gelösten Stoffen
- c) Licht u.a. Energieformen

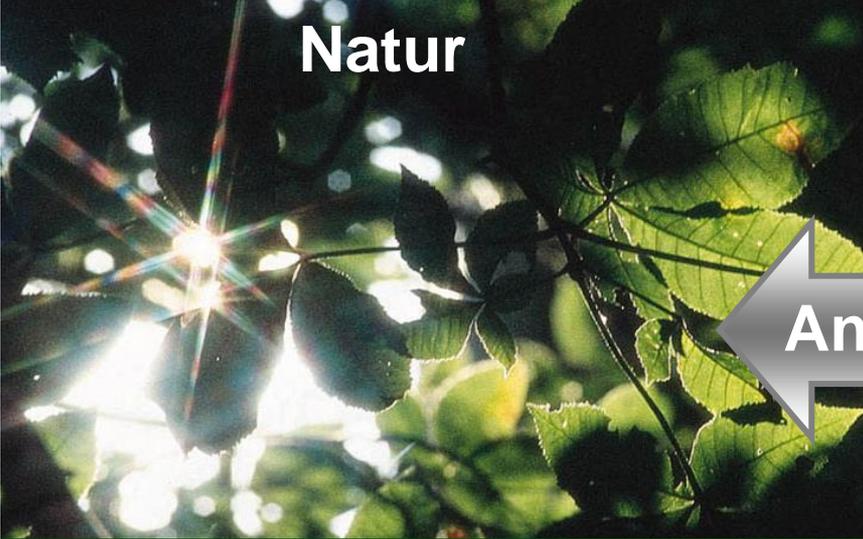
Stoffkreisläufe, Stoffe:

- a) Kreisläufe von MV und PF
- b) Sauerstoffverbrauch bei der Ox.

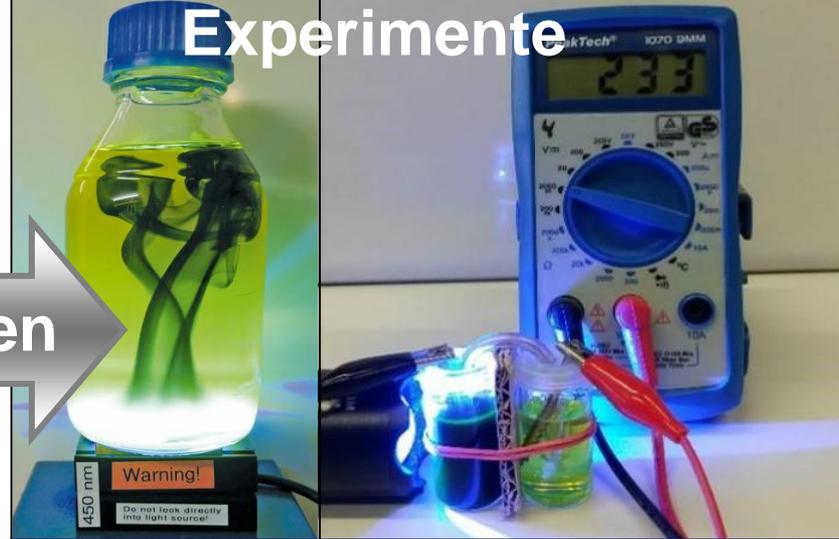
Reaktionstypen, Energiekonversion:

- a) Reduktion - enderg. / Licht
- b) Oxidation - exerg. / elektr. Arbeit..
- c) Anregung, Photoelektronentransfer

Natur



Experimente



Analogien

Photosynthese/Atmung

Phänomene Beteiligung von:

- a) farbigen Stoffen (Chl, Car u.a.)
- b) Gasen und gelösten Stoffen
- c) Licht u.a. Energiefaktoren

Stoffkreislauf

Offenes System, C- und O-Kreislauf
Viele Stoffe und Reaktionsschritte

- a) C, O, Chl...
- b) Stoffverbrauch bei der Ox.

Reaktionstypen, Energiekonversion:

- a) Reduktion - enderg. / Licht
- b) Oxidation - exerg. / Wärme, Arbeit..
- c) Anregung, Photoelektronentransfer

Photo-Blue-Bottle

Phänomene Beteiligung von:

- a) farbigen Stoffen (PF, MV)
- b) Gasen und gelösten Stoffen
- c) Licht u.a. Energiefaktoren

Stoffkreislauf

Geschlossenes System, C-Kreislauf
Wenig Stoffe und Reaktionsschritte

- a) MV und PF
- b) Stoffverbrauch bei der Ox.

Reaktionstypen, Energiekonversion:

- a) Reduktion - enderg. / Licht
- b) Oxidation - exerg. / elektr. Arbeit..
- c) Anregung, Photoelektronentransfer

Unterschiede



<https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/>

Photosynthese – ein Fall für zwei

Teil 1: Kohlenstoffkreislauf in der Biosphäre

Teil 2: Funktionen von Chlorophyll und β -Carotin

<https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/filme-videos/photoredoxreaktionen/photosynthese-ein-fall-fuer-zwei-teil-1-von-2.html>

<https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/filme-videos/photoredoxreaktionen/photosynthese-ein-fall-fuer-zwei-teil-2-von-2.html>



Lehrfilm
Photosynthese – Ein Fall für Zwei; Teil 1

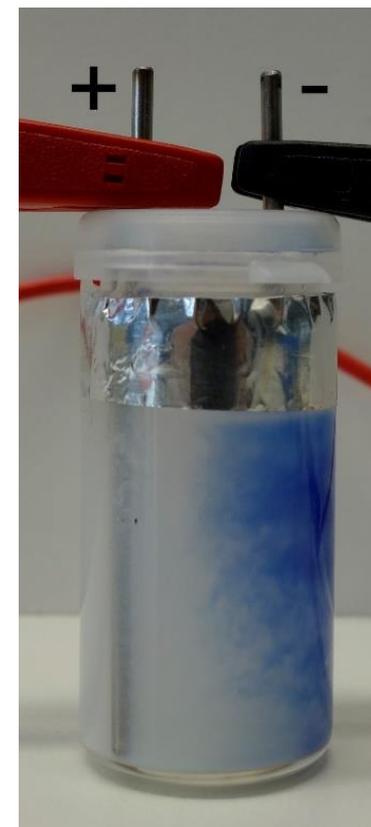
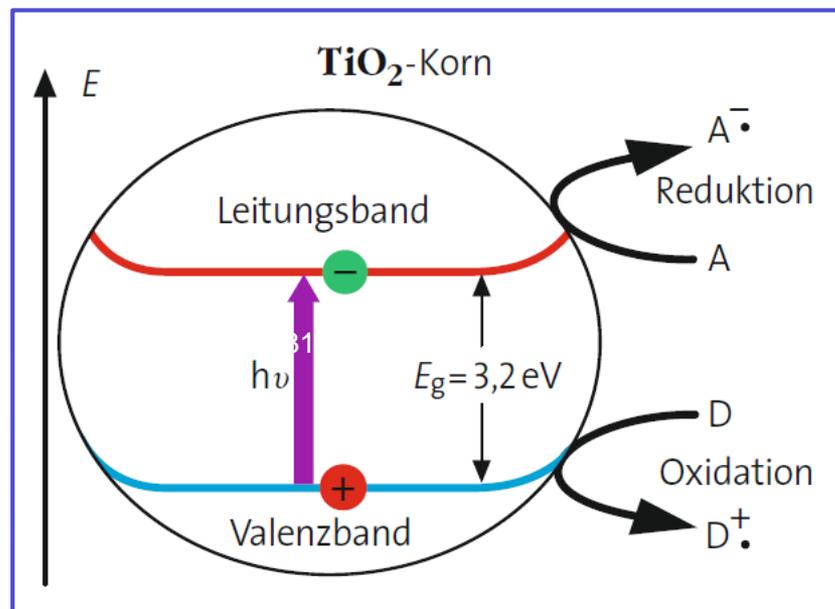
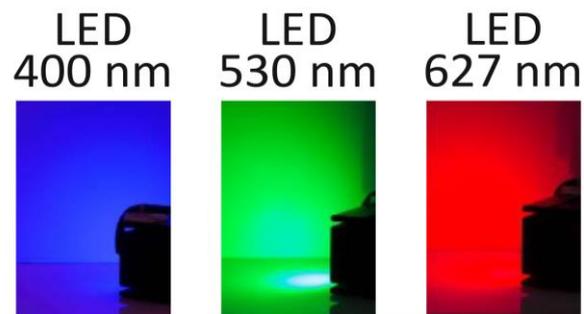


Lehrfilm
Photosynthese – Ein Fall für Zwei; Teil 2

Lehrfilme online auf chemiemitlicht.uni-wuppertal.de abrufbar.

A 28: Präsentieren Sie den jeweiligen Lehrfilm. Diskutieren und vergleichen Sie die Experimente und Behauptungen aus dem Film mit Ihren Ergebnissen und gewonnenen Erkenntnissen. (Hinweis: Wahlweise können/sollten einzelne Filmsequenzen präsentiert und diskutiert werden.)

Photo-Blue-Bottle mit TiO_2



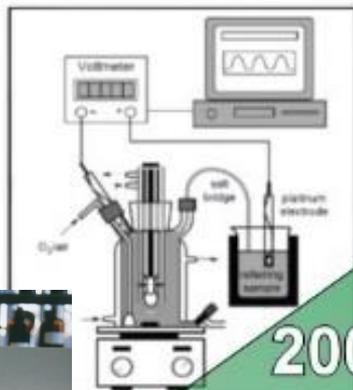
Metamorphosen von Photo-Blue-Bottle in 25 Jahren



Yasemin Yurdanur

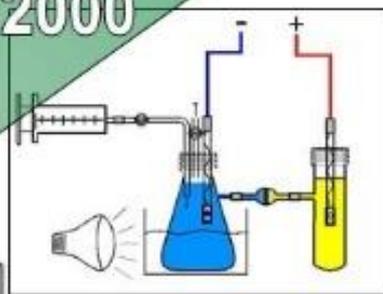


1994



2000

2001



2015

2017

2019



- M.T. *PdN-ChiS*, 43 (3) 13 (1994);
S. Korn, M. T. *J. Chem. Educ.* 78 (9), 1238 (2001);
M. T. et al. *CHEMIE 2000+*, (2007-2017);
M. Heffen, M. T. *PdN-ChiS* 68 (4) 42 (2015);
M. Heffen, M. T. *Chem. & Sch.* 31, 5 (2016);
Y. Yurdanur, M. T. *CHEMKON* 26 (3), 125 (2019);
R. Brunnert, Y. Yurdanur, M. T. *World J. Chem. Educ.* 7 (2), 33 (2019);
R. Kremer, M. T. *Chemie & Schule*, 34 (3), 15 (2019).



Künstliche Photosynthese

Keine 1:1 Kopie der natürlichen Photosynthese



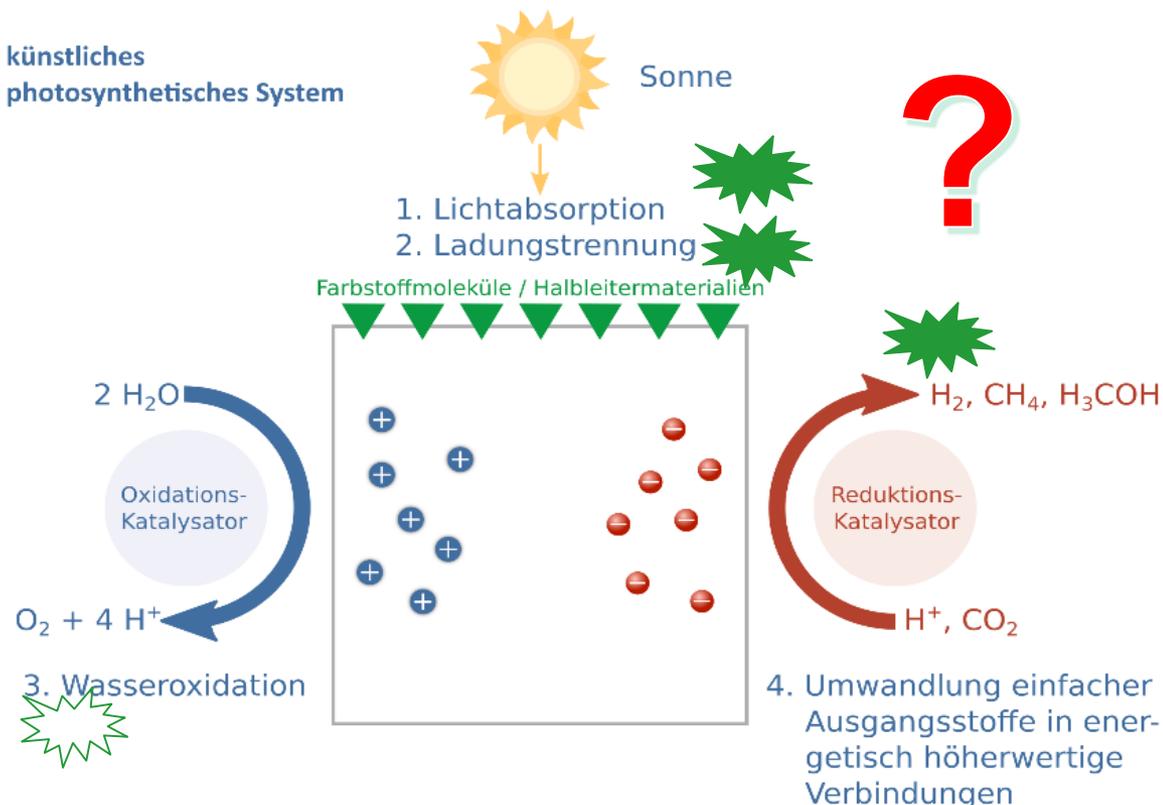
Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEN
DER WISSENSCHAFTEN

Stellungnahme, Mai 2018

künstliches
photosynthetisches System

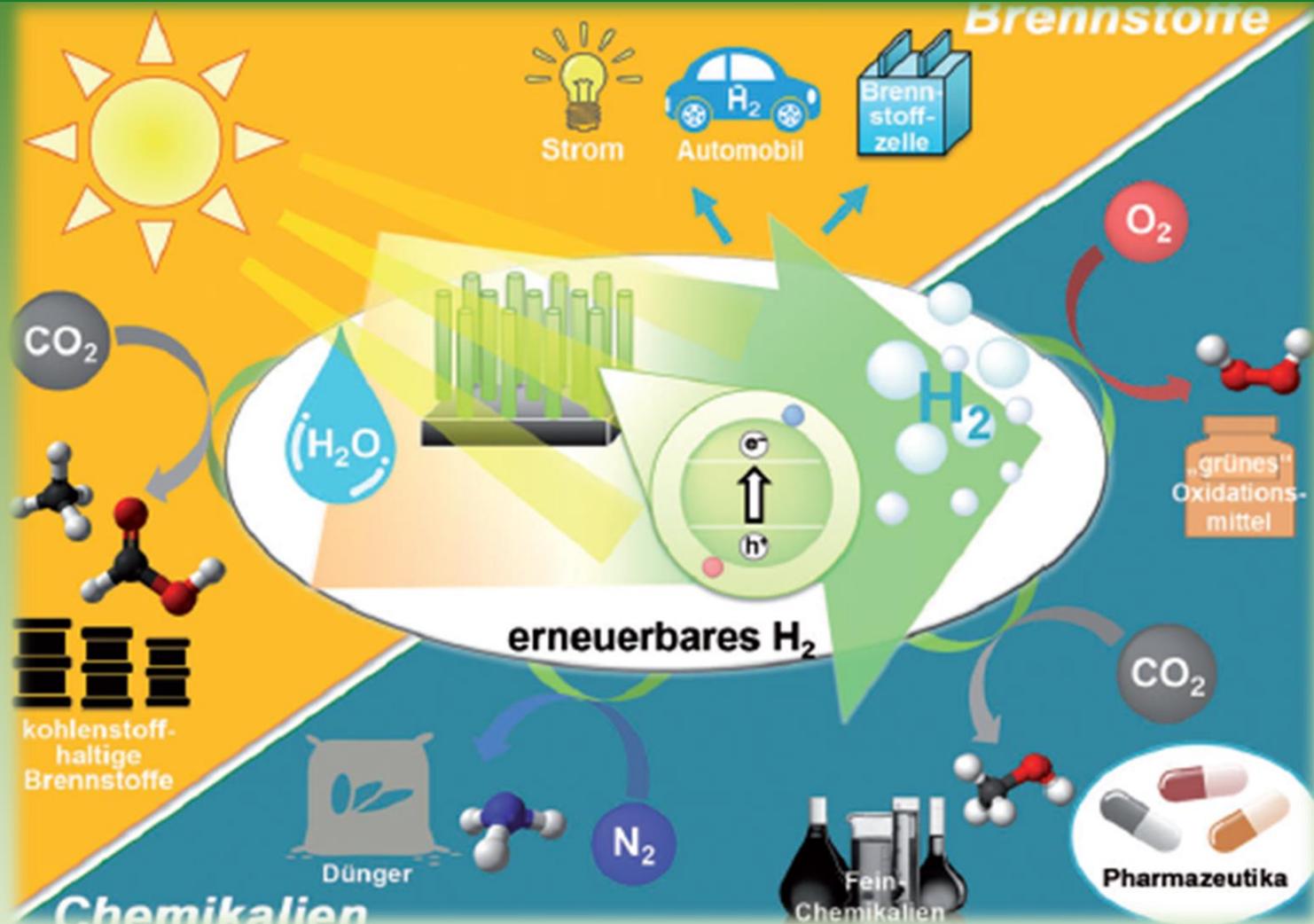


1. Licht → elektrische Ladung
2. Protektion von Blattpigmenten
3. Robuste, reparierbare Teilsysteme



Künstliche Photosynthese

Szenarien mit „grünen Brennstoffen“ (H_2 , CH_4 , CH_3OH , $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ u.a.)





Experiment E8



Photo-Cat Demo-Set

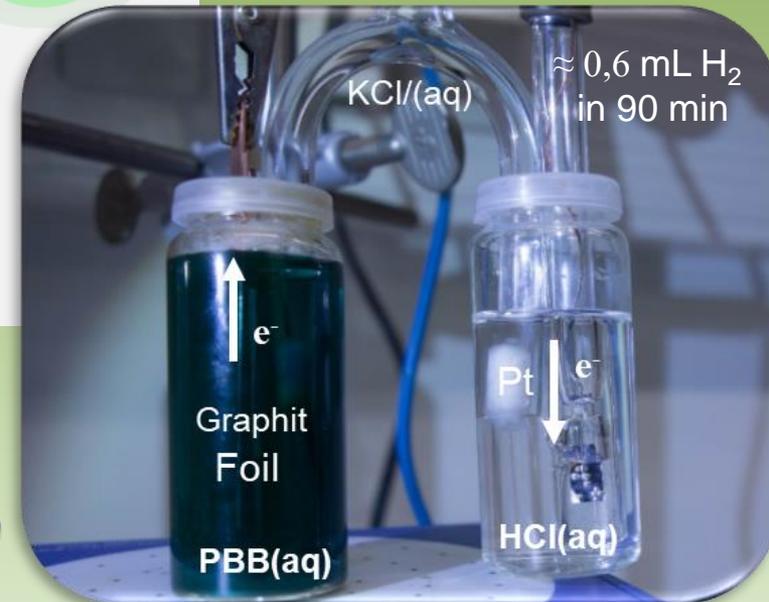
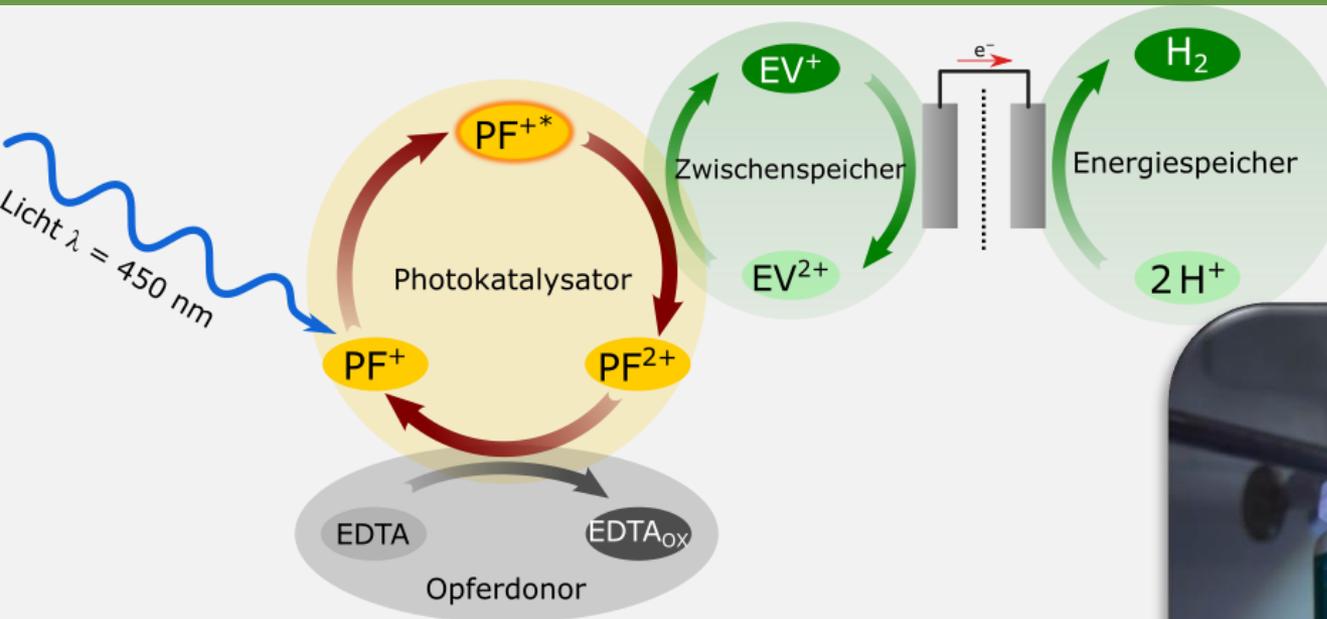
Photokatalytische Herstellung von „grünem“ Wasserstoff [1]:

50 mL PBB-Lösung (aus den voranstehenden Experimenten) und 50 mg Reduktionskatalysator (5%Pt auf Aluminiumoxid-Fasern) werden in einem Schraubdeckelglas unter magnetischer Rührung mit blauen LED ($\lambda = 450 \text{ nm}$, $2 \times 950 \text{ mW}$) ca. 30 min lang bestrahlt. Das entweichende Gas wird pneumatisch in einem transparenten und flexiblen Siliconschlauch aufgefangen, in eine 10-mL Plastikspritze übernommen und langsam auf den vorher ausgeglühten Reduktionskatalysator geleitet. Der glüht auf – ein Nachweis für Wasserstoff.

[1] <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/experimentierkoffer-materialiensets/qr-33-experimentierset-photo-cat/demoversion/>

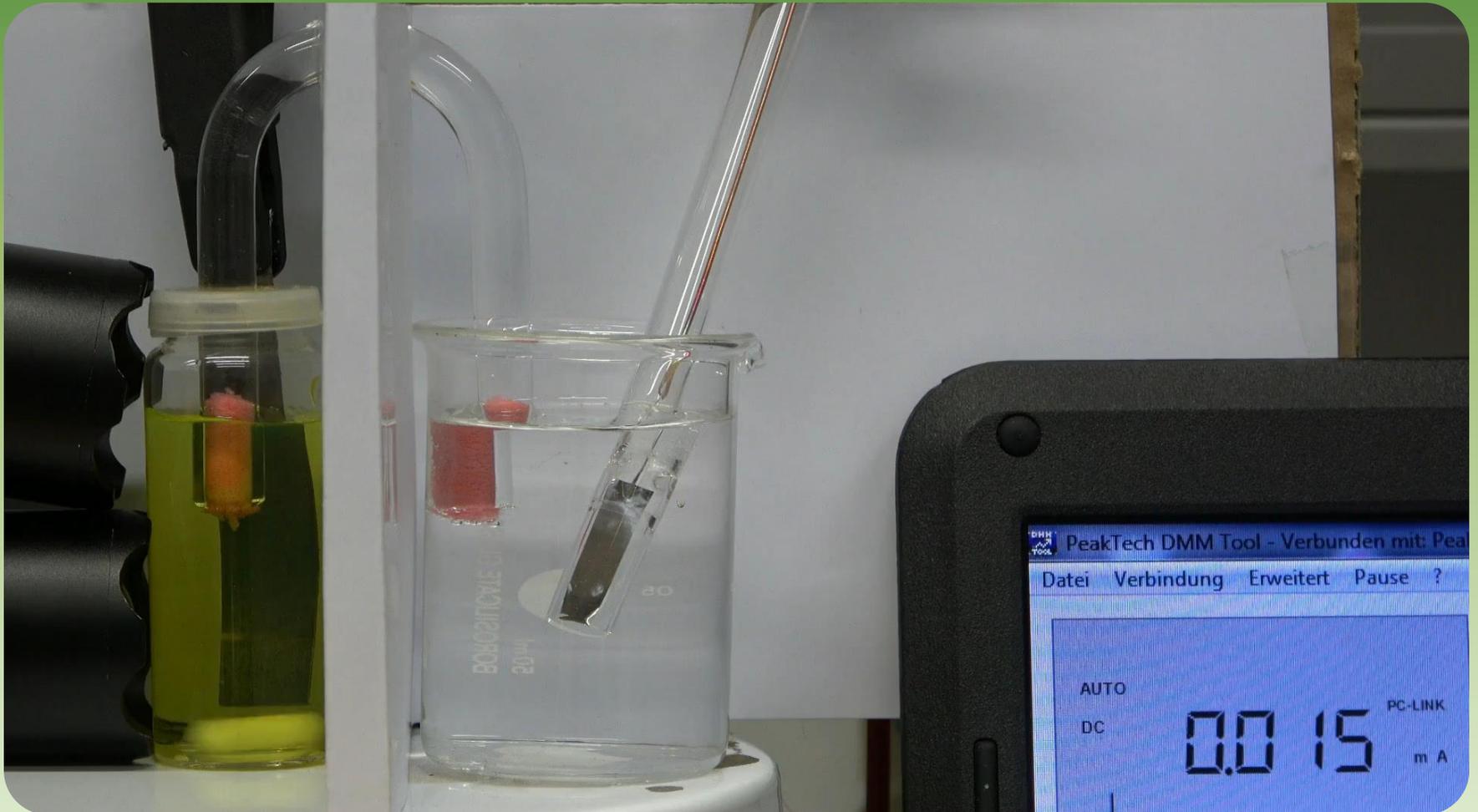
Unterwegs zur künstlichen Photosynthese:

- Ist die Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff mit dem Photo-Blue-Bottle Experiment möglich?



Photogalvanische 2-Topf Zelle

Wasserstoff mit Photo-Blue-Bottle in der photogalvanischen 2-Topf Zelle



Wasserstoff mit Photo-Blue-Bottle in der photogalvanischen 2-Topf Zelle

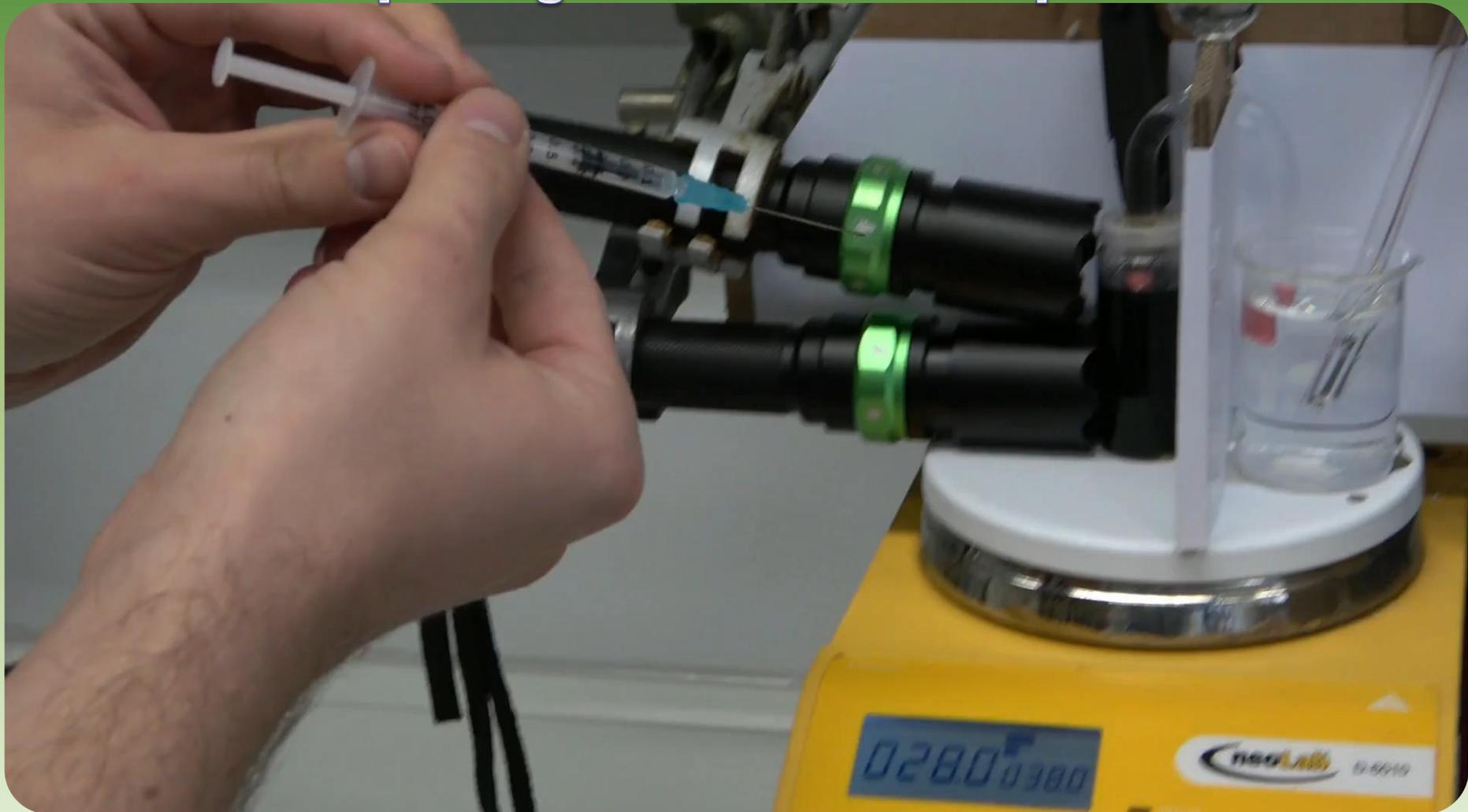
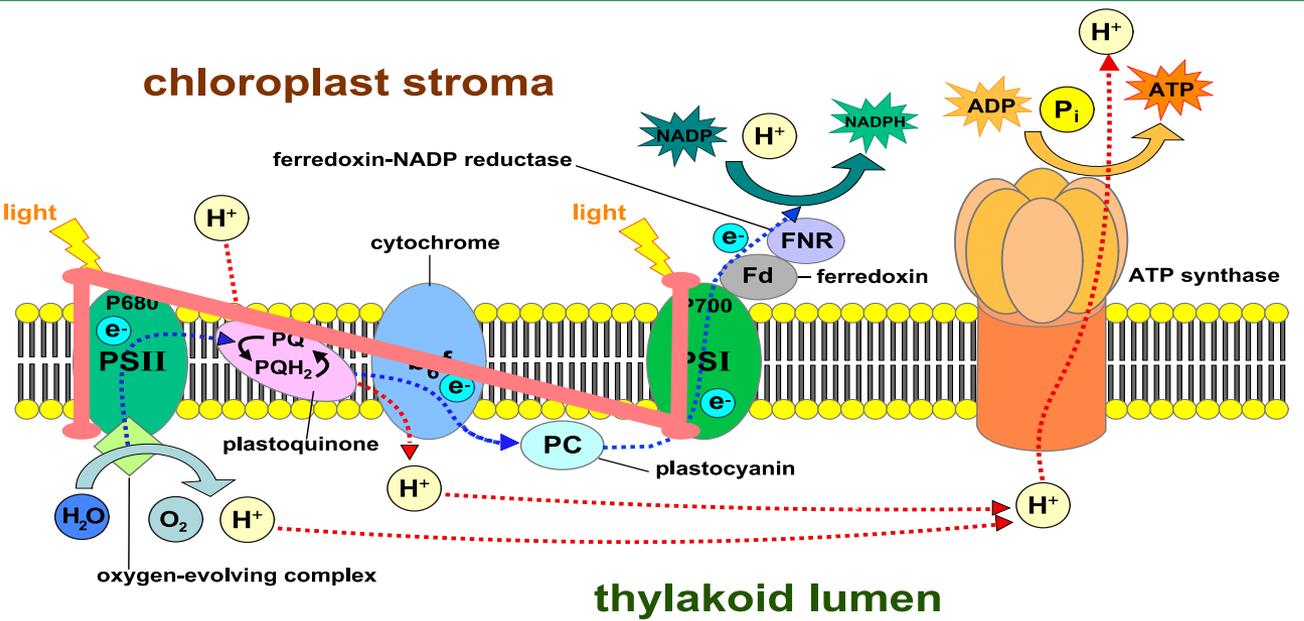




Photo-Blue-Bottle

unterwegs zu „grünem Wasserstoff“ durch Wasserphotolyse



Photosynthese Lichtreaktion

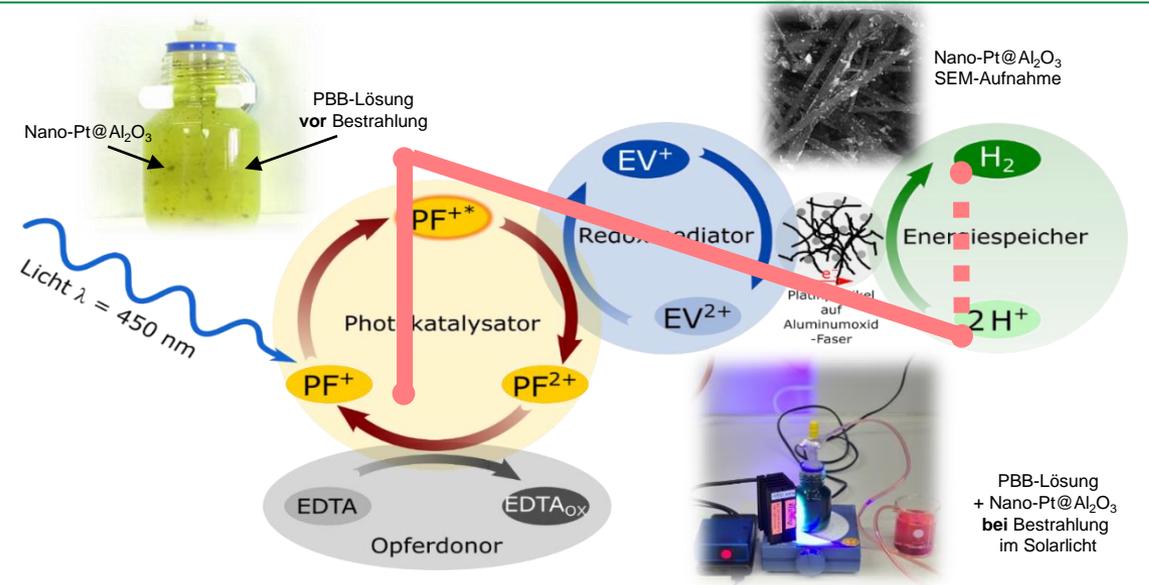
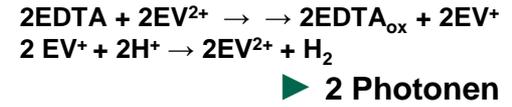
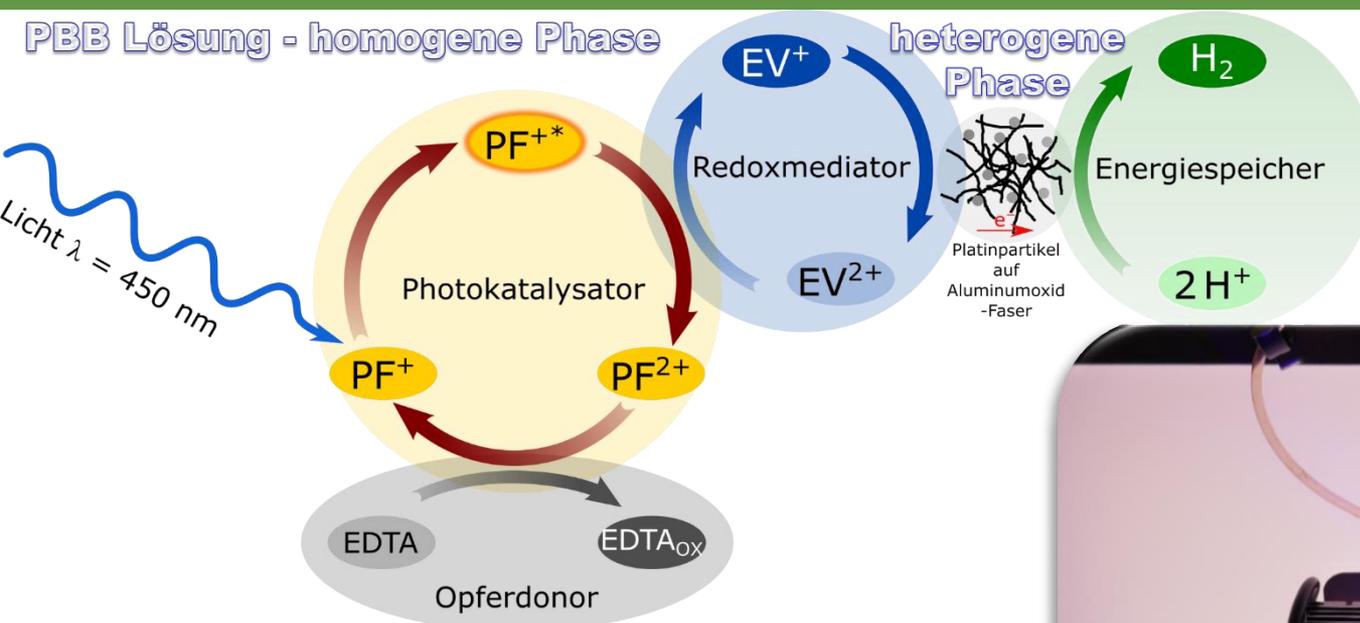


Photo-Blue-Bottle 1-Topfzelle

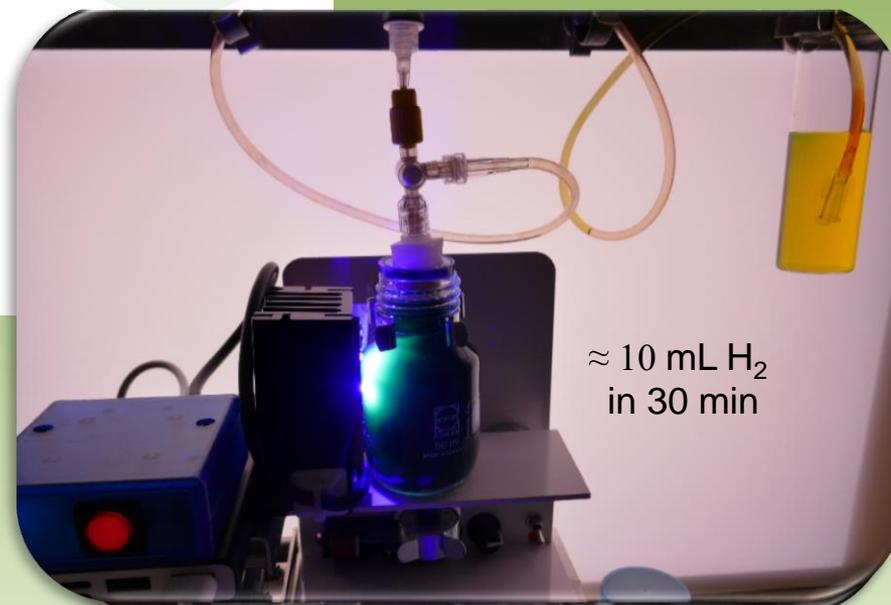


Wasserstoff mit Photo-Blue-Bottle in der photokatalytischen 1-Topf Zelle



- 50 mL PBB-Lösung
- 50 mg Nano-Pt@Al₂O₃
- pH \cong 4,5 (EDTA-Puffer)
- $E^\circ(H_2/2H^+) = -0,265\text{ V}$
- $E^\circ(EV^+/EV^{2+}) = -0,449\text{ V}$

Photokatalytische 1-Topf Zelle
2019 - 2023

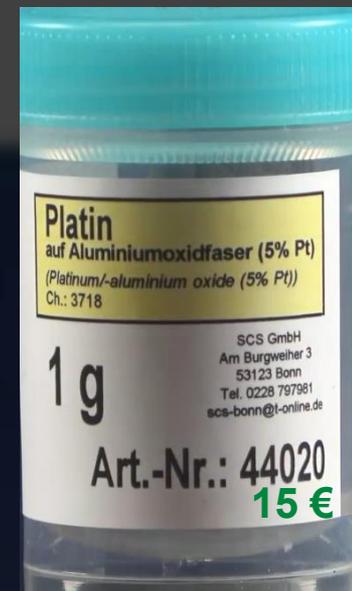


H₂ – Nachweis im Mikromaßstab

schnell - einfach - eindeutig



5% Pt@Al₂O₃



Angeregte Zustände
für anregende Chemie

Photo-Blue-Bottle

Photo-MINT



Grüner
Wasserstoff
mit Sonnenlicht

PBB im Sonnenlicht

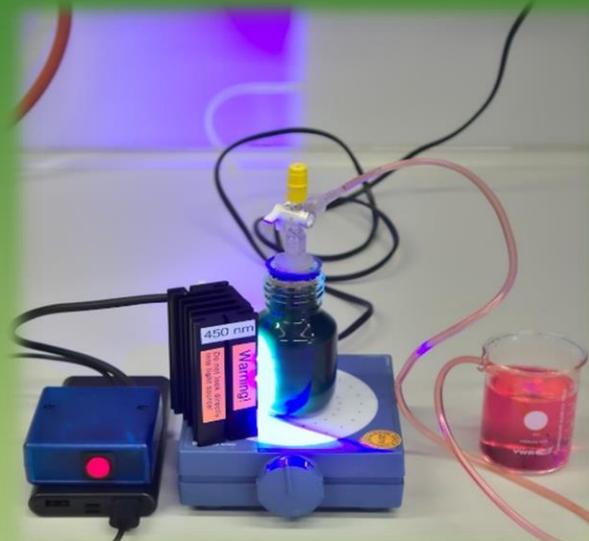
PBB mit Handy - LED



Luisa, 6 J



H₂ in PBB 2-Topfzelle



H₂ in PBB 1-Topfzelle



Solarreaktor

Zweitopfzellen

Beobachtbare Phänomene in den beiden Halbzellen, die auf Elementarprozesse hinweisen

gut geeignet für den Schulunterricht und die Lehre an Hochschulen

Eintopfzellen

Kompakterer Aufbau und bessere Leistungsparameter der Zelle als Ganzes

geeignet für die Lehre an Schulen und Hochschulen sowie für die Forschung

Technik

Ökonomische & ökologische Anforderungen

geeignet für Pilotanlagen und für großtechnische Industrieanlagen

Zusammenfassung Workshop

Lichtlabor Pflanze & Künstliche Photosynthese

Photo-MINT



Relation: Licht-Energie-Farbe-Struktur

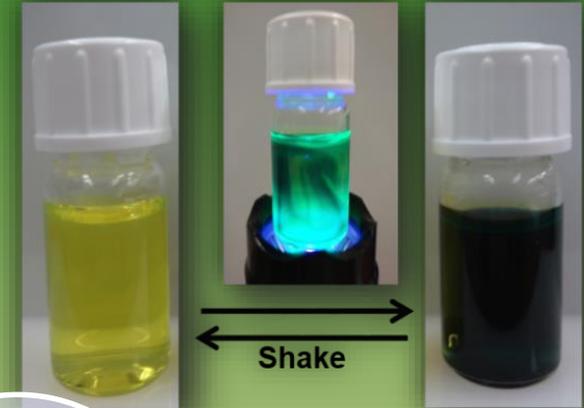


Photo-Blue-Bottle PBB
Basisexperiment



β -Carotin und Chlorophyll

Energie
Umwandlung und
Transfer

**Photonen
& Moleküle**
Relationen
L-E-F-S

C-Kreislauf
Photosynthese-
Atmung

Fachinhalte aus:

- ▶ Chemie
- ▶ Biologie
- ▶ Physik
- ▶ Geographie

Elektrochemie
Galvanische
Zellen

**Künstliche
Photosynthese**
„grüner“
Wasserstoff



PBB Konzentrationszelle



H₂ in PBB 1-Topfzelle



Photochemie



in Büchern & Zeitschriften / Beiträge von M. W. Tausch et al.

<https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/arbeitsgruppe/sen-prof-dr-michael-w-tausch/publikationen/>

Tausch · von Wachtendonk

CHEMIE 2000+
Einführungsphase

Digitale Schulbuch

Tausch · von Wachtendonk

CHEMIE 2000+
Qualifikationsphase

Digitale Schulbuch

WILEY-VCH

Dieter Wöhrle
Michael W. Tausch
Wolf-Dieter Stohrer

Photochemie

Konzepte, Methoden, Experimente

Michael Tausch

Chemie mit Licht

Innovative Didaktik für Studium und Unterricht

MOREMEDIA | Springer Spektrum

EurJOC
European Journal of Organic Chemistry

Chemie Europa
European Chemical Societies Publishing

ChemPhotoChem

Cover Photo: Yang cyclization, Norrish type II reaction, Photoredox coupling

Energy

Excited State

Ground State

Vertical Transition

Photochemical Funnel

Transition State

WILEY-VCH

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

Solarzellen

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

COFFEEKREIS

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

1/65

Funktionelle Farbstoffe

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

1/64

All We Need Is Light

CHEMIE & Schule

3/2014

Prozesse und Produkte

CHEMIE & Schule

3/2015

Prozesse und Produkte

Computerbasierter Chemiekurs

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

Flüssigkristalle

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

lumineszenz

Chemie konkret

CHEMKON

Forum für Unterricht und Didaktik

1/2012

Fantastische Plastik

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

Photochemie

Chemie konkret

CHEMKON

Forum für Unterricht und Didaktik

3/2019

Moderne Lichtquelle in Aktion

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

4/62

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

1/60

Katalyse und Nachhaltigkeit

Praxis der Naturwissenschaften

Chemie in der Schule

Titandioxid



Chemie mit Licht im Unterricht

- Vorschläge für Unterrichtsdesign
- Curriculare Einbindung



Konstruktivistische Lernschleife

Gliederung eines Unterrichtsbausteins in vier Segmente im Sinne *forschend-entwickelnden* Lernens

Die angepassten Begriffe und Konzepte werden auf Phänomene aus **Alltag**, **Technik** und **Umwelt** angewendet .

Die Interpretation der neuen Fakten zwingt zur Anpassung der vorhandenen **Begriffe** und **Konzepte**, sodass sie den neuen Fakten auch gerecht werden.

Zunächst wird das **Vorwissen** der Lernenden erkundet, denn das ist der wichtigste Faktor, der das Lernen beeinflusst.

In diesem Segment werden in **Experimenten** neue Fakten erforscht, **Hypothesen** entwickelt und überprüft

3. Anpassen

4. Anwenden

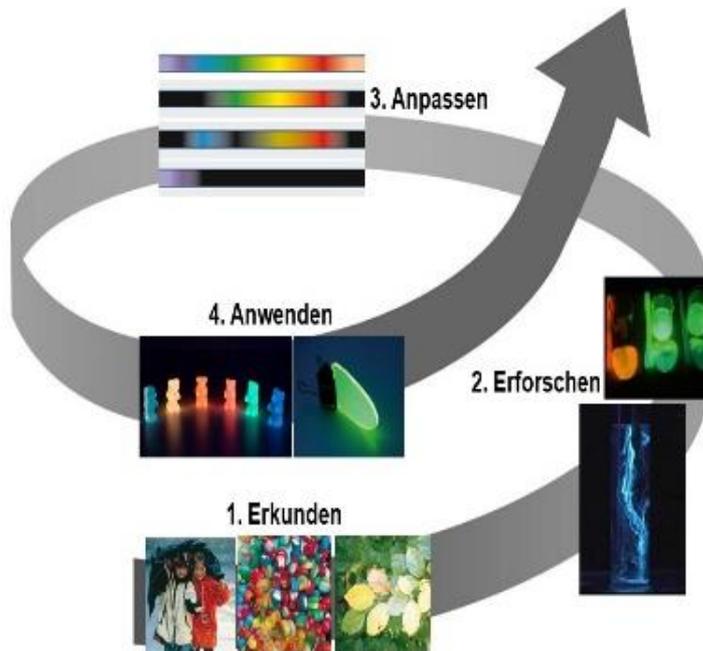
2. Erforschen

1. Erkunden

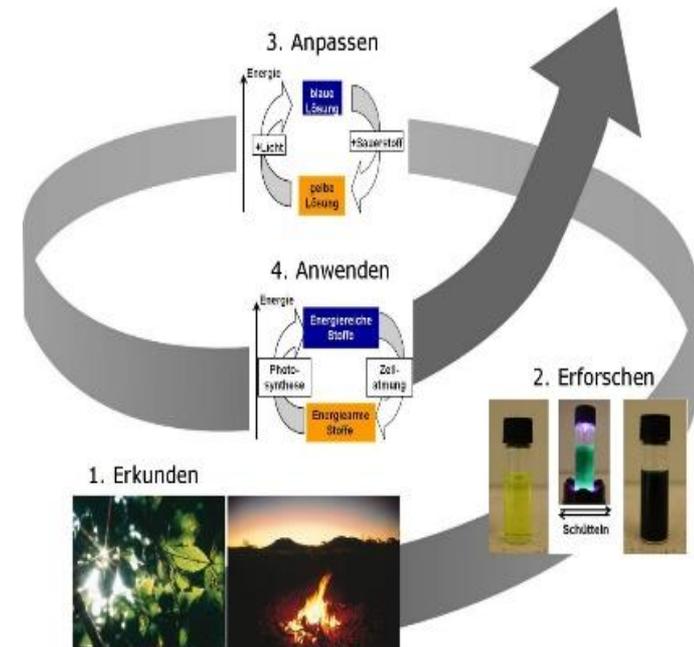


Konstruktivistische Lernschleifen

Beispiele für Sek. I



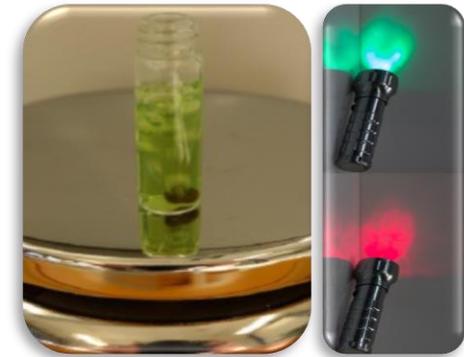
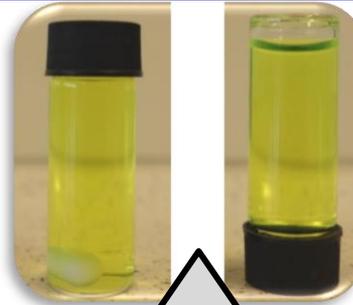
Lernschleife „Farben und Leuchtfarben“



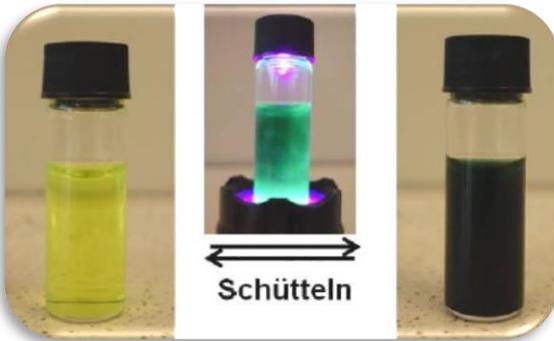
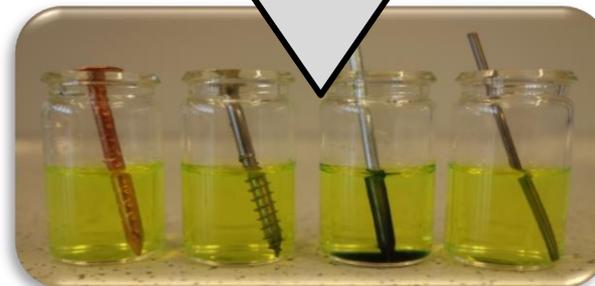
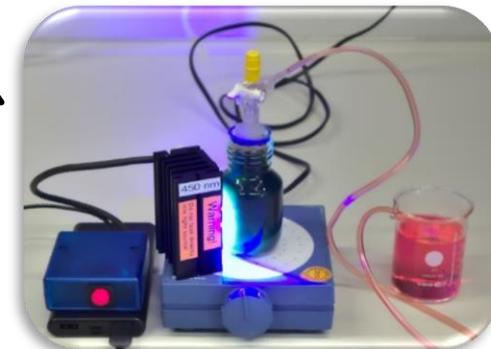
Lernschleife „Licht – der Antrieb fürs Leben“

Unterrichtsdesign - Beispiel für die Sek. II

Stationenlernen im Expertenmodus zum Kontext „Kreislauf Photosynthese/Zellatmung“ und „Grüner Wasserstoff“



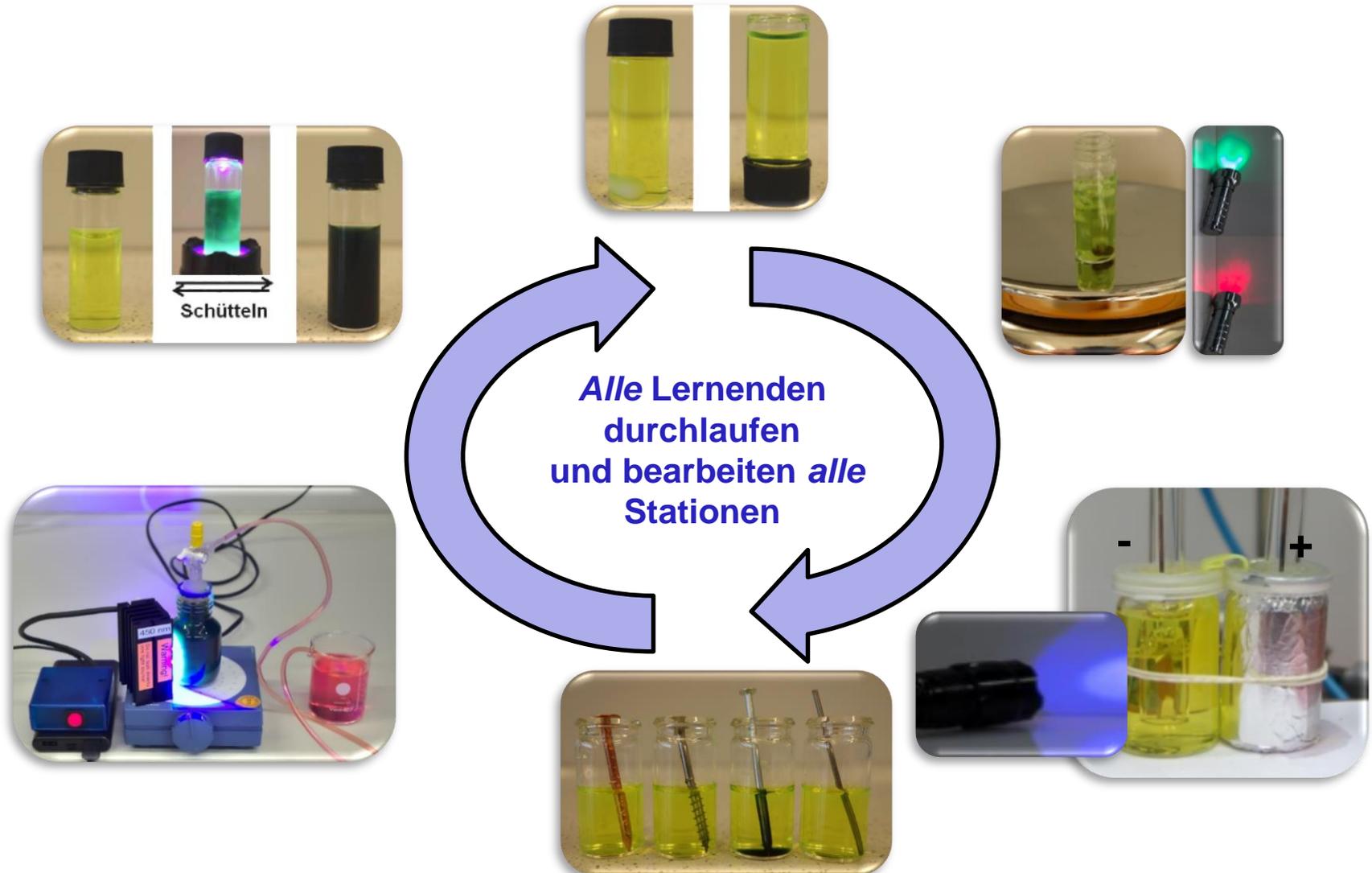
Jeweils eine Gruppe
Lernender bildet sich an
einer Station zu „Experten“
aus und präsentiert
anschließend ihre
Experimente und
Erkenntnisse der gesamten
Lerngruppe



Unterrichtsdesign - Beispiel für die Sek. II

Stationenlernen im Rotationsmodus zum Kontext

„Kreislauf Photosynthese/Zellatmung“ und „Grüner Wasserstoff“

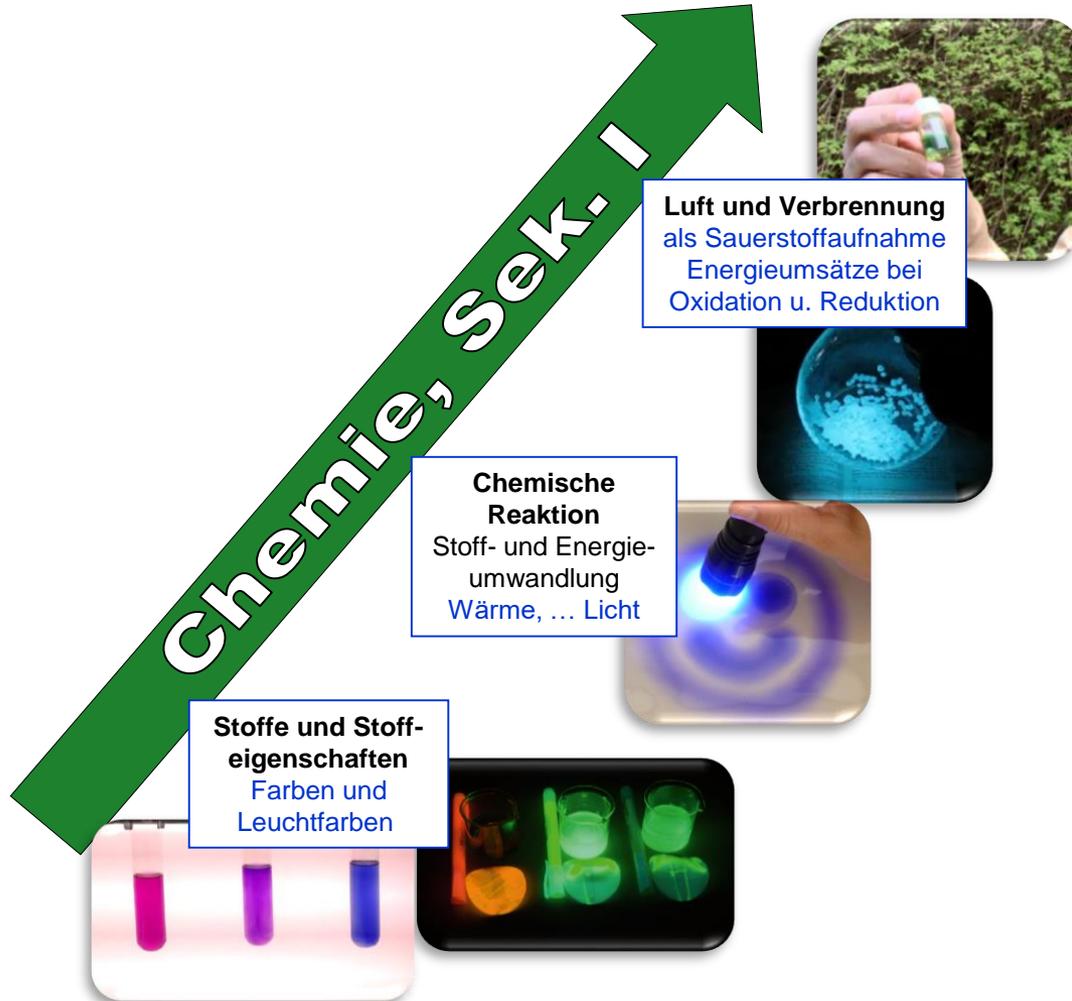




Curriculare Einbindung von Chemie mit Licht in den Chemieunterricht der Sek. I

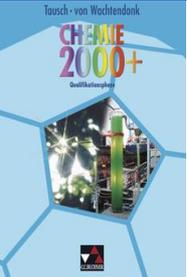


Lehrplanpflichtige Inhaltsfelder der Sek. I - die Reihenfolge ihrer Bearbeitung ist wie angegeben festgelegt

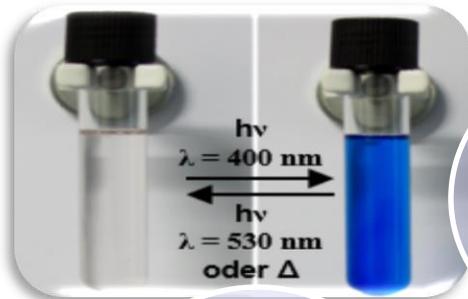
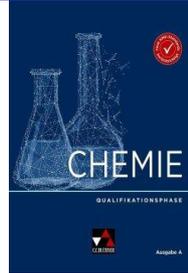




Curriculare Einbindung von Chemie mit Licht in den Chemieunterricht der Sek. II

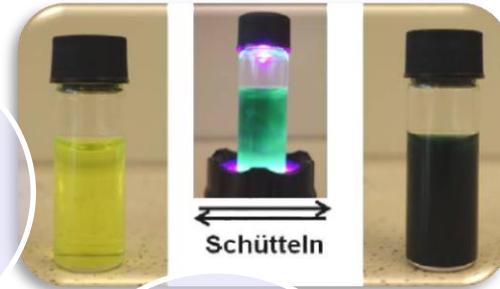


Lehrplanpflichtige Inhaltsfelder der Sek. II
Die Reihenfolge der Bearbeitung ist *nicht* festgelegt



Chemische Gleichgewichte

Energie und Gleichgewicht photostationärer Zustand



Energetik, Katalyse, Reaktionskinetik

Konzept: $A \rightarrow A^*$
Photonen: $E = h \cdot \nu$
Thermo- vs. Photochemie

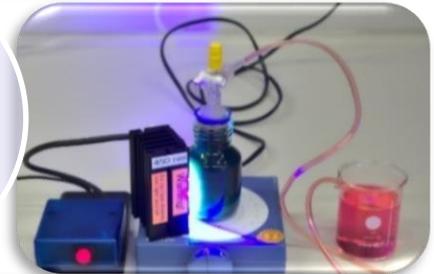


Basiskonzepte

- ▶ Chem. Gleichgewichte
- ▶ Energie
- ▶ Stoff-Teilchen
- ▶ Struktur-Eigenschaft
- ▶ Donator-Akzeptor

Stoffkreisläufe

C-Kreislauf in der Biosphäre
„Grüner“ H_2 - photokatalytisch



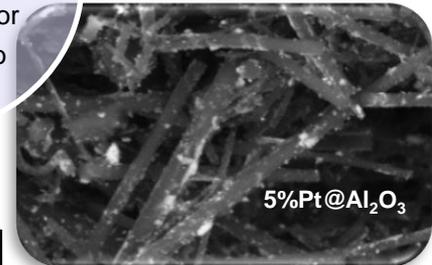
Elektrochemie, galv. Zellen

Redoxpaare
Nernst-Gleichung.
Konz.-Zellen



Funktionelle Farbstoffe, Nano-Material

Photokatalysator
Photo & Nano





Teaching@Distance

in der Corona-Pandemie entwickelte
digitale Materialien zu Chemie mit Licht
mit Links zu Bildungsservern einiger
Bundesländer

Die Materialien sind aktuell
zugänglich und nutzbar



Teaching@Distance

Sek. I



Lernpfad mit den PBB Experimenten auf Bildungsservern

- INFO für LuL zum Einsatz im Unterricht
- Motivation für SuS (Energieformen bei chem. R.)
- Digitale Arbeitsblätter mit Arbeitsanweisungen
- Links zu 4 Kurzvideos mit dem Basisexperiment
- Austausch der Ergebnisse via Handy & Internet



<https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=13243>

<https://cloud.schulcampus-rlp.de/edu-sharing/components/search>

https://nibis.de/photochromie-solvatochromie-molekulare-schalter_15510



Teaching@Distance

Sek. II



**Stoff- und Energie-
umwandlungen
beim Kreislauf
Photosynthese-Zellatmung**

Sek. II (Chemie & Biologie)



Lernpfad mit den PBB Experimenten
auf Bildungsservern

- INFO für LuL zum Einsatz im Unterricht
- Szenario für SuS (Stichwort: *fridays 4 future*)
- Links zu digitalen Arbeitsblätter
- Links zu Lehrfilmen (*Photosynthese – ein Fall für 2*)
- Austausch der Ergebnisse via Handy & Internet

<https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=13243>

https://cloud.schulcampus-rlp.de/edu-sharing/components/search_

https://nibis.de/stoff--und-energieumwandlungen-beim-kreislauf-photosynthese-zellatmung_15501

Chemie mit Licht



Lehrplankonforme Einbindung in den Unterricht

Pflichtinhalte im LP

Sekundarstufe I:

Stoffeigenschaften (S I)

Chemische Reaktion (S I)

Sekundarstufe II:

Energieumwandlungen

Modelle und Konzepte für Atome,
Moleküle und Halbleiter

Stoffkreisläufe

Elektrochemie, Redoxreaktionen

Katalyse, Katalysator, Energieverläufe
von Reaktionen,
Chemisches Gleichgewicht

Reaktionstypen
in der Organischen Chemie

Farbstoffe

Kunststoffe und nanostrukturierte
Materialien

Photochemische Inhalte als Anknüpfungen

Farben und Leuchtfarben (Lumineszenz), Farbe - (k)eine Stoffeigenschaft (Solvatochromie)

Energieform Licht als energetischer Antrieb für Reaktionen und als Ergebnis aus Reaktionen (photochemische Reaktion bzw. Chemolumineszenz)

Umwandlung von Licht in elektrische Energie und *vice versa*: Photovoltaische, photogalvanische und photoelektrochemische Zellen bzw. LED und OLED

Energiestufen-Modell für Moleküle, Energiebänder-Modell für Metalle, Halbleiter und Isolatoren, Konzept vom Grundzustand und elektronisch angeregten Zuständen

Kohlenstoffkreislauf Photosynthese/Atmung in der Biosphäre, Stoffkreisläufe in der Atmosphäre

Elektronentransferreaktionen in photogalvanischen und photovoltaischen Zellen sowie in photokatalytischen Redoxreaktionen

Photokatalyse und Photokatalysator: Wirkungsweise, Vergleich mit Katalyse und Katalysator Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen chemischem Gleichgewicht und photostationärem Zustand in natürlichen und technischen Systemen

thermische und photochemische Reaktionen: Radikalkettenreaktionen, Isomerisierungen u.a.

herkömmliche und funktionelle Farbstoffe (photochrome, thermochrome, solvatochrome Farbstoffe, Fluorophore, Photoinitiatoren, -sensibilisatoren, -katalysatoren etc.).

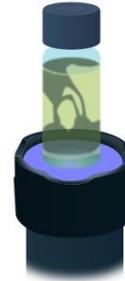
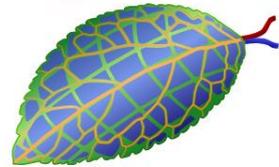
elektrisch leitende und halbleitende Kunststoffe, Kunststoffe mit photoaktiven molekularen Schaltern



Equipment

Experimentiersets zum
Workshop „Lichtlabor Pflanze und
Künstliche Photosynthese“

Chemie mit Licht - Innovative Didaktik für Studium und Unterricht



Basis-Version
Photo-Blue-Bottle
Kreislauf Photosynthese/Atmung
Preis: 196,- €

<https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/experimentierkoffer-materialiensets/qr-33-experimentierset-photo-cat/basisversion/>



Demo-Version
Photo-Blue-Bottle
Herstellung von „grünem“ Wasserstoff
Preis: 360,- €

<https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/experimentierkoffer-materialiensets/qr-33-experimentierset-photo-cat/demoversion/>



Photo-Cat Experimentiersets

mit der Photo-Blue-Bottle Lösung



Basis-Version

Photo-Cat für Experimente zum
Kreislauf Photosynthese/Atmung

Preis: 196,- €



Demo-Version

Photo-Cat für Experimente zur
Herstellung von „grünem“ Wasserstoff

Preis: 360,- €

Bezugsquellen für PBB-Versuche:

- Proflavin (3,6-Diaminocridin-hemisulfat), CAS 1811-28-5, Sigma Aldrich; (10 g ca. 43 €)
- Ethylviologen dibromid (1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridiniumdibromid), CAS 53721-12-3, Sigma Aldrich; (1 g ca. 45 €)
- EDTA-Dinatriumsalz (Ethylendiamintetraessigsäure-dinatriumsalz), CAS 6381-92-6, Carl-Roth; (1 kg ca. 47 €)

Für die Herstellung von 500 mL PBB-Lösung werden benötigt:

- 1 g EDTA
- 561 mg Ethylviologen
- 15 mg Proflavin

Für die Herstellung von 500 mL PBB-Lösung werden benötigt:

- Graphitfolien, Conrad Electronics, Wärmeleitfolie 0.2 mm 5.5 W/mK (L x B) 100 mm x 100 mm Kerafol 90/10; Art. Nr.: 000189059 ; 2,59 €/Folie
- Reduktionskatalysator (5% Pt auf Al₂O₃ Fasern)

Lichtquellen:

- LED-Taschenlampen mit 4 Farben (violett: 400 nm, blau: 450 nm, grün: 530 nm, rot: 630 nm); im Internet unter Suchbegriff: LE Multi-Color LED, Rechargeable Flashlight (1 Stück ca. 20 €)
- Highpower LED von *Sahlmann Photochemical Solutions*, verschiedene Wellenlängen, Preis auf Nachfrage beim Hersteller; email: bs@sahlmann-ps.de.

LED-Taschenlampe



**LE Multi-Color LED
Rechargeable Flashlight**

Internet ca. 19,99.-€
Akku - Ladeteil inbegriffen

- gelb 580-585nm, 200lm, 5 Std.
- blau 450-455nm, 40lm, 5 Std.
- grün 450-525nm, 200lm, 6,5 Std.
- rot 620-625nm, 140lm, 3,5 Std.
- UV 390-395nm, 9 Std



**LEDLENSER t2qc Quad Farbe LED-
Taschenlampe (schwarz) – test-it Pack,
9802qctp / Ledlenser GmbH Solingen**

Internet ca. 29,39.-€; Batterie inbegriffen

- weiß, rot, grün, blau durch Kopfdrehen

über „Voelkner LED Lenser T2 QC“ nur 26.-€

LED-Taschenlampe



Advanced focusing system

Multi-Color LED Taschenlampe

Internet ca. 16.-€
Akku - Ladeteil inbegriffen



IPX-5
waterproof



USB charging



Highlight wick



Zoom



- blau 450-455nm,
- grün 450-525nm,
- rot 620-625nm,



4 light color flashlight



DE STOCK



Multi-Color LED Taschenlampe

Internet ca. 14.-€
Akku - Ladeteil inbegriffen



Ende

„Lichtlabor Pflanze und
Künstliche Photosynthese“