

# Photosynthese und Atmung *en miniature*

## Teil 1: Experimente und Materialien für die Mittelstufe

Michael W. Tausch, Maria Heffen

### „Ein hübsches Experiment...“<sup>1</sup>

Die beiden für das Leben auf unserem Planeten essentiellen Reaktionen, die Photosynthese in den Pflanzen und die Zellatmung in den Organismen, können in einfachen und kostengünstigen, aber sicheren und aussagekräftigen Experimenten erschlossen werden können. Erschließen bedeutet in diesem Fall die experimentelle Erkundung und konzeptionelle Erklärung der Prinzipien, nach denen der Kreislauf Photosynthese-Zellatmung aus stofflicher *und* energetischer Sicht abläuft. Da eine experimentelle 1:1 Nachahmung im Labor weder für die Photosynthese noch für die Zellatmung möglich ist, bedienen wir uns verschiedener Versionen des „hübschen“ Modellexperiments **Photo-Blue-Bottle** [1]. Richtig eingesetzt können sie schrittweise zur Einsicht in die Funktionsprinzipien der beiden Reaktionen und ihrer zyklische Verknüpfung führen. Der Anspruch dieses Beitrags geht noch ein Stück weiter: Er will überzeugen, dass diese Versuche und die angestrebten Erkenntnisse nicht erst für den fortgeschrittenen Chemieunterricht geeignet sind, sondern bereits im Anfangsunterricht eingesetzt werden können. Daher werden die Experimente nach diesem einleitenden Teil mit dem PBB-Equipment in *drei* didaktische Einheiten mit *ansteigenden* fachlichen Niveaus eingebettet. Dieser Beitrag enthält die erste, die beiden anderen folgen in Teil 2.

Um Wiederholungen aus bereits publizierten Arbeiten möglichst gering zu halten, werden interessierte Leserinnen und Leser, darauf hingewiesen, dass der Ursprungsartikel [1] kostenlos unter [2] angeklickt werden kann und die zuletzt erschienene Arbeit [5] auf Nachfrage ebenfalls kostenlos von uns zugeschickt wird. Die Kleingeräte für die unten beschriebenen Versuche können über den VCÖ-Shop, die Chemikalien und das didaktische Zusatzmaterial bei den Autoren erworben werden.

### Equipment für die PBB-Experimente:

- *Geräte:* LED-Taschenlampen, Schraubdeckelgläser, Schnappdeckelgläser (ggf. auch mit gelochten Deckeln), Edelstahl Elektroden, Schlauch und Filterpapier für Salzbrücke) Kabel, Digitalmultimeter
- *Chemikalien:* Ethylviologen, Proflavin, EDTA

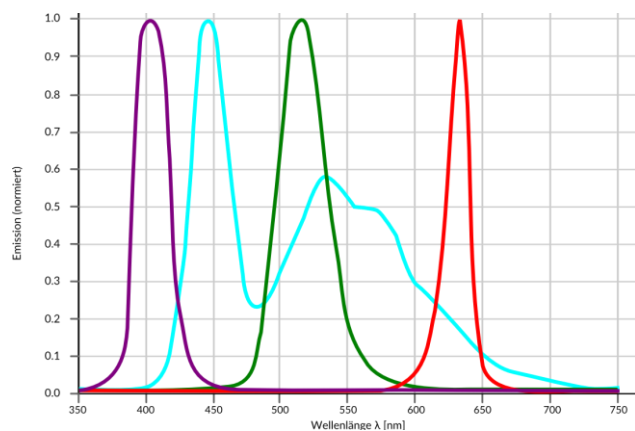


Abb. 1: LED-Taschenlampen für violettes, weißes, grünes und rotes Licht und ihre Emissionsspektren

<sup>1</sup> „... ist oft wertvoller, als zwanzig in der Gedankenretorte erbrütete Formeln“ - viel zitierter Aphorismus von A. Einstein

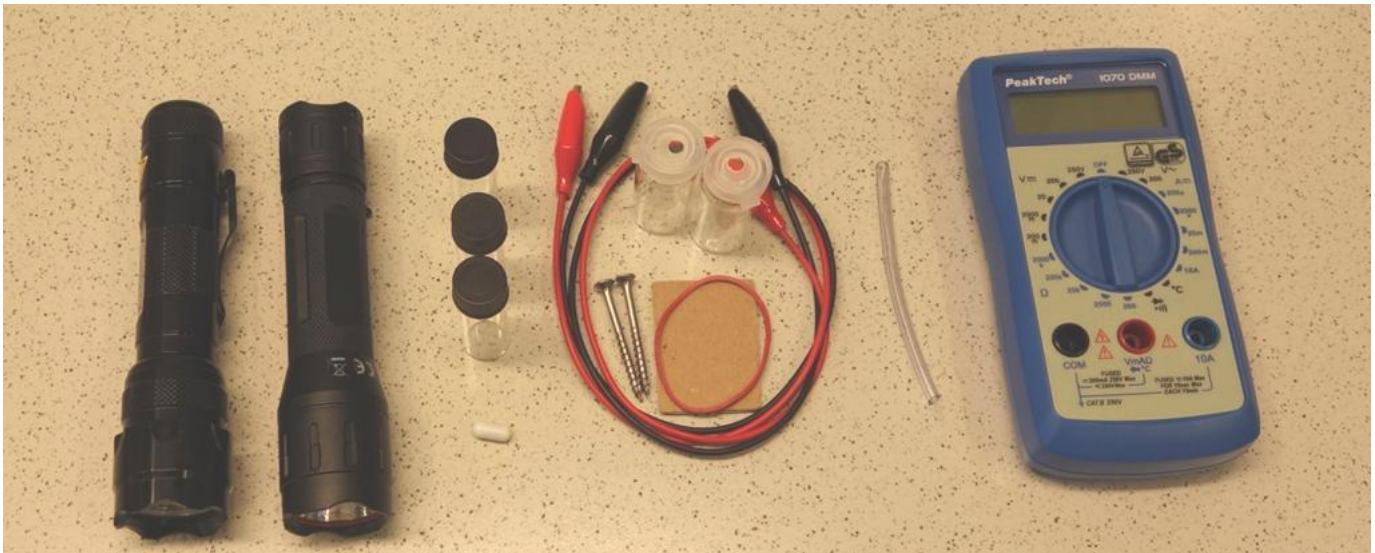
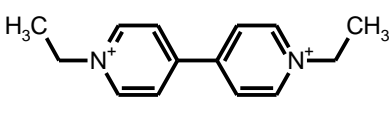
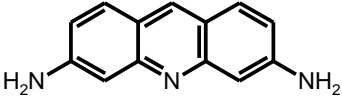
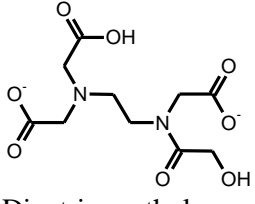


Abb. 2: Geräte für die PBB-Versuche (v. l. n. r.): UV-LED-Taschenlampe, LED-Taschenlampe mit Farbwechsel, Schraubdeckelglässchen, Rührfisch, Schnapdeckelglässchen mit gelochten Deckeln, Kabel mit Krokodilklemmen, Pappe und Gummiband, Elektroden (Schrauben aus Edelstahl), Salzbrücke (PVC-Schlauch mit eingelegtem Filterpapierstreifen), Digitalvoltmeter

<p>Ethylviologen</p>  <p>1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridiniumdibromid</p>	<p>Proflavin</p>  <p>3,6-Diaminoacridin-hemisulfat</p>	<p>EDTA</p>  <p>Dinatrium-ethylen-diamintetraessigsäure</p>
--	--	---

Tab. 1: Kurznamen, Formeln und systematische Namen der Chemikalien für die PBB-Experimente

### Stammlösungen für die PBB-Lösung

#### Lösung I

2,8 g EDTA (Ethyldimaintetraessigsäure-dinatriumsalz) werden in 100 mL dest. Wasser gelöst ( $c = 0,075 \text{ mol/L}$ ).

#### Lösung II

561 mg Ethylviologen (1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridiniumdibromid) werden in 10 mL dest. Wasser gelöst ( $c = 0,15 \text{ mol/L}$ ).

#### Lösung III

15,5 mg Proflavin (3,6-Diaminoacridin-hemisulfat) werden in 100 mL dest. Wasser gelöst ( $c = 0,0006 \text{ mol/L}$ ).

### Photo-Blue-Bottle-Lösung, PBB-Lösung:

30 mL Lösung I, 10 mL Lösung II, 75 mL Lösung III und 380 mL dest. Wasser werden zur Photo-Blue-Bottle-Lösung (PBB-Lösung) vereinigt. Darin liegen folgende Konzentrationen vor:  $c(\text{EV}^{2+}) = 0,003 \text{ mol/L}$ ;  $c(\text{PF}^+) = 0,000045 \text{ mol/L}$ ;  $c(\text{EDTA}) = 0,0049 \text{ mol/L}$ . Diese gelbe, schwach fluoreszierende Lösung ist unter Lichtausschluss (z.B. in einer braunen Glasflasche oder in einer Flasche umwickelt mit Aluminiumfolie) mehrere Monate haltbar.

# Licht - der Antrieb fürs Leben

Unter dieser Überschrift geht es in der ersten Einheit für den *Anfangsunterricht* ganz ohne Formeln und Reaktionsgleichungen zu. Auch auf einschlägige Fachbegriffe wird weitestgehend verzichtet. Das soll aber nicht heißen, dass es hier *nur* um Experimentierspaß geht, wengleich der im Vordergrund steht. Die Schülerinnen und Schüler sollen bereits hier geschickt experimentieren, genau beobachten, logisch deuten, Vermutungen entwickeln, diese experimentell überprüfen und die neuen Erkenntnisse folgerichtig mit ihren Vorkenntnissen verknüpfen.

*À propos Vorkenntnisse:* Die Lernenden sollten bereits wissen, dass Sauerstoff ein Bestandteil der Luft ist, die wir zum Atmen benötigen. Weiterhin sollten sie wissen, dass Sauerstoff für Verbrennungsvorgänge benötigt und dabei verbraucht wird. Und sie sollten auch wissen, dass die Pflanzen zum Wachsen Licht benötigen. Das alles lernen die Kinder gewöhnlich in der Grundschule.

Die Lerneinheit kann (sollte) nach dem Konzept einer vierstufigen *konstruktivistischen Lernschleife* strukturiert werden (Abb. 3). Prinzipiell wird dabei nach dem *forschend-entwickelnden* Lernverfahren [2] bzw. nach dem *inquiry learning* [3] vorgegangen. In einer ersten Stufe werden die Vorkenntnisse der Schüler über die Photosynthese, die Verbrennungsvorgänge allgemein und die (Zell)Atmung erkundet. Anschließend werden in Modellexperimenten Fakten erforscht, für deren Erklärung ein Denkmuster entwickelt und angepasst wird. Bei der abschließenden Anwendung des an Modellexperimenten entwickelten Kreislaufschemas aus Abb. 3 auf den natürlichen Kreislauf Photosynthese-Atmung müssen Begriffe passend zugeordnet und die Gemeinsamkeiten zwischen den Modellexperimenten und den natürlichen Vorgängen kritisch bewertet werden.

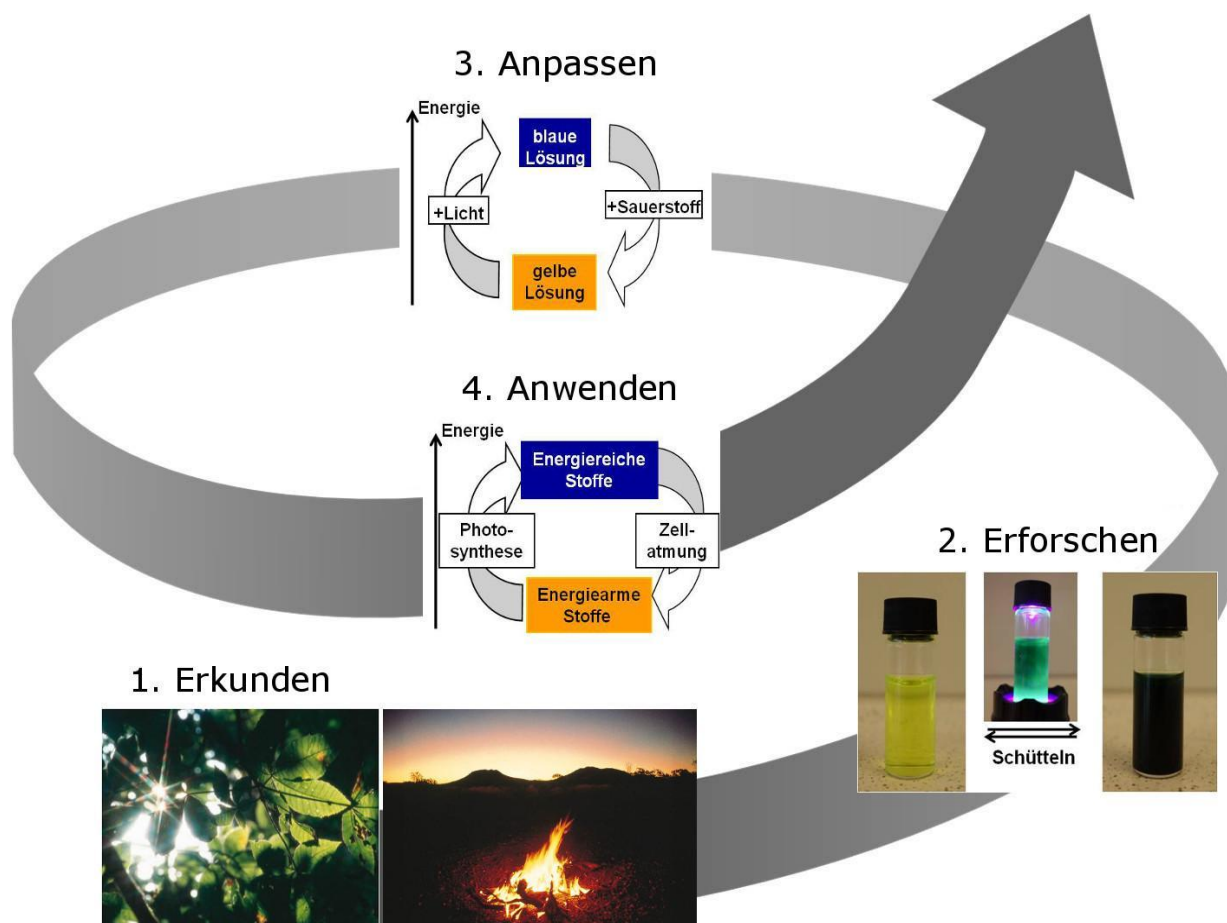


Abb. 3: Konstruktivistische Lernschleife zur Erschließung stofflicher und energetischer Grundlagen des Kreislaufs Photosynthese-Atmung mithilfe des Modellexperiments Photo-Blue-Bottle

# Drehbuch einer Lernschleife

## 1. Erkunden

Die Erkundung der Vorkenntnisse kann im Unterrichtsgespräch anhand geeigneter Fragen zu den beiden Bildchen aus Abb. 3 und/oder mithilfe eines Arbeitsblattes<sup>2</sup>, erfolgen. Erfahrungsgemäß sind (nicht nur bei diesem Lernthema!) die Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler sehr heterogen. Es ist die Kunst der Lehrperson, sich möglichst schnell ein Bild davon zu machen, um in geeigneter Weise weiter vorzugehen. Bei den weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die oben genannten Vorkenntnisse entweder spontan abrufbar oder im Unterrichtsgespräch reaktivierbar sind.

Es wird dann angekündigt, dass Experimenten durchgeführt werden sollen, in denen gewisse Vorgänge in Pflanzen und Tieren *stark vereinfacht nachgeahmt* werden. Es soll herausgefunden werden,

1. welche Vorgänge das sind,
2. unter welchen Bedingungen sie ablaufen und
3. wozu diese Vorgänge in der Natur „gut sind“.

## 2. Erforschen

Die experimentelle Erforschung von Fakten ist das zentrale Segment der Lernschleife. Sie nimmt den größten Teil der Unterrichtszeit in Anspruch und ist didaktisch anspruchsvoll, wenngleich (besser: gerade weil) fachlich noch nicht in die Tiefe gegangen werden soll. Daher soll dieses Segment hier erstmalig ausführlich beschrieben werden. Es sollte mit folgendem Photo-Blue-Bottle Grundexperiment beginnen, das die Lernenden in *Gruppen* (bei kleinen Lerngruppen *einzelnen*) durchführen.

**E1: PBB-Grundexperiment:** a) 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 violetten 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. b) 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. c) Wiederhole die Folge a) und b) noch einmal.

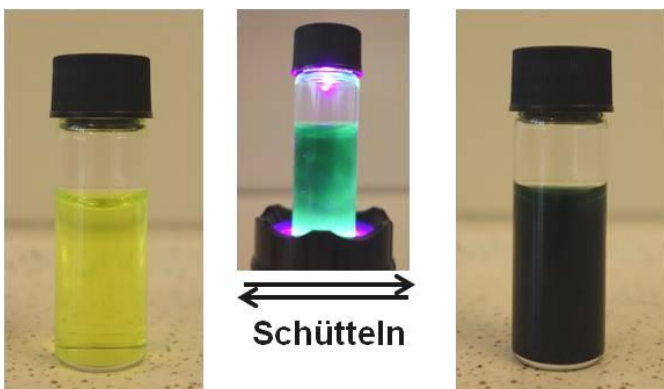


Abb. 4: Der Photo-Blue-Bottle Grundversuch

---

<sup>2</sup> Arbeitsblätter und weitere didaktische Materialien zu der gesamten Titelthematik dieses Beitrags werden in Kooperation mit Lehrkräften entwickelt. Sie können beim Korrespondenzautor bestellt werden.

*Beobachtungen und didaktische Hinweise:* Schon nach weniger als einer Minute tritt eine Blaufärbung der PBB-Lösung ein und nach 5-10 Minuten ist die Lösung vollständig blau (Abb. 4). Durch Schütteln des zugeschraubten Gläschens färbt sich die Lösung wieder von Blau nach Gelb. Dieser Zyklus lässt sich mehrere Male wiederholen.

Nach der Durchführung dieser Grundversion des PBB-Experiments kommen in der Regel spontane Äußerungen der Lernenden. Diese sollten von der Lehrperson aufgegriffen und so gelenkt werden, dass Vermutungen darüber entwickelt werden, *warum* für die Reaktion Gelb → Blau *bestrahlt* und für die Reaktion Blau → Gelb *geschüttelt* werden muss. Die Schülervermutungen können erfahrungsgemäß in folgenden *Hypothesen* zusammengefasst werden:

- a) Durch das Bestrahlen wird Lichtenergie für die Reaktion Gelb → Blau zugefügt. *Diese Reaktion benötigt Energie in Form von Licht.*
- b) Durch das Schütteln wird Bewegungsenergie für die Reaktion Blau → Gelb zugefügt. *Diese Reaktion benötigt Energie in Form von Bewegungsenergie.*
- c) Durch das Schütteln wird Luft in die Lösung eingetragen. Das bewirkt die Reaktion Blau → Gelb. *Diese Reaktion benötigt Luft bzw. einen Bestandteil der Luft.*

Im Anschluss sollte man mit der Lerngruppe jede dieser Hypothesen überprüfen, indem man Experimente als „Fragen an die Natur“ zur Bestätigung bzw. Widerlegung der jeweiligen Hypothese plant und durchführt.

Es bietet sich an, mit den **Hypothesen b) und c)** anzufangen. Die Schülerinnen und Schüler sollten dazu Experimente vorschlagen. Bei jedem vorgeschlagenen Experiment müssen sie auch erläutern, warum damit geprüft werden kann, ob Bewegungsenergie bzw. Luft für die Reaktion Blau → Gelb benötigt wird. Mit dem Experimentiersatz aus Abb. 2a können folgende zwei Experimente durchgeführt werden (Abb. 5)

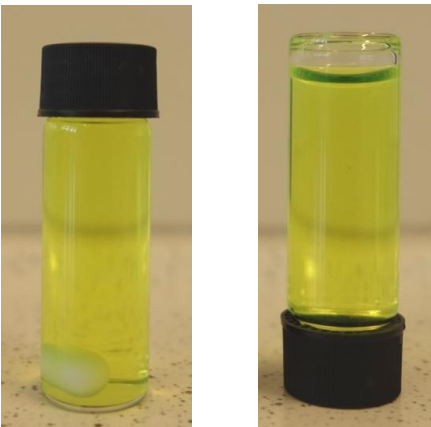


Abb. 5: Experimentgestaltung zur Überprüfung der Hypothesen b) und c) – vgl. Text

Die genaue Planung der Experimente sollte gemeinsam erfolgen. Für die Durchführung der Experimente bietet es sich an, die beiden folgenden Experimente in Gruppen arbeitsteilig durchzuführen. Danach sollte jeweils eine Gruppe ihr Experiment für die ganze Klasse noch einmal vorführen und die Ergebnisse hinsichtlich der zu prüfenden Hypothese deuten.

**E2: Überprüfung der Hypothese b):** Gib in das Gläschen aus dem PBB-Grundexperiment ein Rührfischchen (oder ein Siedesteinchen). Fülle dann das Gläschen bis zum Überlauf mit PBB-Lösung aus der Pipette und verschließe es mit dem Schraubdeckel. Bestrahle die gelbe PBB-Lösung wie im Grundexperiment mit der violetten LED-Taschenlampe bis zur vollständigen Blaufärbung. Schüttele das Gläschen mit der blauen Lösung kräftig, sodass das Rührfischchen zwischen dem Boden und dem Deckel auf

und ab fliegt um die Flüssigkeit zu bewegen. Stelle den Unterschied zu den Beobachtungen im Grundexperiment fest und deute ihn.

**E3: Überprüfung der Hypothese c):** Fülle mithilfe der Pipette in das Gläschen aus dem PBB-Grundexperiment weiter PBB-Lösung hinzu, bis das Gläschen fast voll ist. Nach dem Verschließen mit dem Schraubdeckel soll nur ein korngroßes Luftpolster über der PBB-Lösung übrig bleiben. Das kannst du prüfen, indem du das Gläschen wie in Abb. 5 umdrehst, sodass du die Luftblase sehen kannst. Gegebenenfalls musst du noch Lösung nachfüllen oder mit der Pipette heraus ziehen. Bestrahle die gelbe PBB-Lösung wie im Grundexperiment mit der violetten LED-Taschenlampe bis zur vollständigen Blaufärbung. Schüttle das Gläschen mit der blauen Lösung kräftig. Stelle den Unterschied zu den Beobachtungen im Grundexperiment fest und deute ihn.

*Beobachtungen und didaktische Hinweise:*

In E2 kommt es trotz starker Bewegung der Lösung nicht zur Rückfärbung der blauen Lösung in die ursprüngliche gelbe Lösung. Die Reaktion Blau  $\rightarrow$  Gelb wird also nicht durch Zufuhr von Bewegungsenergie angetrieben. Die Hypothese b) wird dadurch widerlegt und muss verworfen werden.

In E3 kommt es erst nach längerem Schütteln als beim PBB-Grundversuch E1 zur Rückfärbung. Das liegt daran, dass bei E1 mehr Luft über der Lösung im verschlossenen Gläschen ist als bei E3. Die Beobachtungen aus E3 sind also in Übereinstimmung mit der Hypothese c). Auch der Vergleich der Beobachtungen aus E2 (keine Rückfärbung Blau  $\rightarrow$  Gelb) und E3 (Rückfärbung Blau  $\rightarrow$  Gelb erst nach längerem Schütteln) unterstützen die Hypothese c).

Um noch zusätzliche experimentelle Fakten zu schaffen, mit denen die Hypothese c) gestützt wird, sollte der Zyklus aus E3 von den Schülern noch einige Male wiederholt werden. Dabei zeigt sich, dass die Reaktion Blau  $\rightarrow$  Gelb zunehmend längeres Schütteln erfordert und nach einigen Zyklen gar nicht mehr erfolgt. Es wird dann gemeinsam überlegt, woran das liegen kann und was zu tun ist, damit die Reaktion Blau  $\rightarrow$  Gelb wieder abläuft. Das kann realisiert werden, wenn durch Entfernen des Schraubdeckels die „verbrauchte“ Luft durch frische Luft ausgetauscht und anschließend wieder verschlossen und geschüttelt wird. Noch effizienter ist es, mit der Pipette einige Tropfen PBB-Lösung aus dem Gläschen herauszunehmen, dann zu verschließen und zu schütteln.

Unter der Annahme, dass die Rolle des Sauerstoffs bei Verbrennungsreaktionen und die Tatsache, dass der größte Bestandteil der Luft, der Stickstoff, ein sehr reaktionsträges Gas ist, bekannt sind, werden die Schüler auch bei der Reaktion Blau  $\rightarrow$  Gelb im PBB-Experiment den Sauerstoff als jenen Bestandteil der Luft vermuten, der hier benötigt wird. Auch zur Überprüfung dieser Vermutung kann ein mögliches Experiment geplant werden. Dabei müsste das Gas über der PBB-Lösung im Grundexperiment E1 keinen Sauerstoff enthalten; es müsste beispielsweise reiner Stickstoff sein. Das ist in der nötigen Genauigkeit im einfachen Schülerexperiment kaum zu verwirklichen. Durch längeres Einleiten von Stickstoff aus der Stahlflasche in das Gläschen mit der PBB-Lösung kann nicht der gesamte Sauerstoff ausgetrieben werden<sup>3</sup>. Es ist an dieser Stelle ausreichend, wenn die Lehrperson erläutert, warum der entsprechende Versuch bessere Laborbedingungen erfordert, als die vorhandenen und dann mitteilt, dass in der Tat Sauerstoff jener Bestandteil der Luft ist, der für die Reaktion Blau  $\rightarrow$  Gelb benötigt und dabei verbraucht wird.

Es ist vorgekommen, dass an dieser Stelle von Schülerseite im Schnellschuss aus dem Ergebnis gefolgert wurde, bei der Reaktion Gelb  $\rightarrow$  Blau sollte dann Sauerstoff gebildet werden. Diese Hypothese kann argumentativ und ohne weiteres Experiment widerlegt werden. Würde tatsächlich bei der Reaktion Gelb  $\rightarrow$  Blau Sauerstoff gebildet, dann müsste man in E2 eine Gasbildung beobachten und in E3 müsste man nicht

---

<sup>3</sup> Schülerinnen und Schüler, die dieses experimentelle Problem unbedingt lösen möchten, können es im Rahmen einer Chemie-AG angehen. Dafür stellt man ihnen neben dem PBB-Equipment auch einen Satz Plastikspritzen mit Zubehör und die Stahlflasche mit Stickstoff zur Verfügung. Mit Kreativität und experimentellem Geschick lässt sich damit das Problem lösen.

nach einer bestimmten Zyklenzahl lüften, um die Reaktion Blau → Gelb möglich zu machen. Damit ist geklärt, dass Hypothese b) falsch ist und Hypothese c) zutrifft.

Wir kommen jetzt auf die **Hypothese a)** zurück, in der es um die *Energiebeteiligung* beim PBB-Experiment geht. Im Grundexperiment E1 wird deutlich, dass die Reaktion Gelb → Blau einen energetischen Antrieb benötigt, den sie in Form des violetten Lichts aus der LED-Taschenlampe erhält.

Aber muss es *Licht* sein, kann die Energie nicht auch in anderer Form, beispielsweise als *Wärme* zugefügt werden? Und muss es denn *violettes* Licht sein, kann es nicht auch beispielsweise *rotes*, *grünes* oder *blaues* Licht sein? Und kann es auch *weißes* Licht sein, etwa auch *Sonnenlicht*? Das sind Fragen, denen in weiteren Experimenten E4 und E5 nachgegangen werden soll. Sie können in Gruppen arbeitsteilig durchgeführt und ausgewertet werden, ähnlich wie es weiter oben für E2 und E3 beschrieben wurde.

**E4: Überprüfung der Hypothese a):** Erwärme die gelbe PBB-Lösung aus dem Grundexperiment E1 indem du das verschlossene Gläschen mit der Lösung in eine Glaswanne oder ein Becherglas mit ca. 60 °C warmem Wasser stellst. Beobachte die Veränderungen in der PBB-Lösung 2-3 Minuten lang. Wiederhole die Erwärmung der gelben PBB-Lösung indem du sie auf einer elektrischen Heizplatte im geöffneten Gläschen nach Zufügen eines Siedesteinchens bis zum Sieden erhitzt. Beobachte die Änderungen in der Lösung und unterbrich das Sieden nach ca. 10 Sekunden.

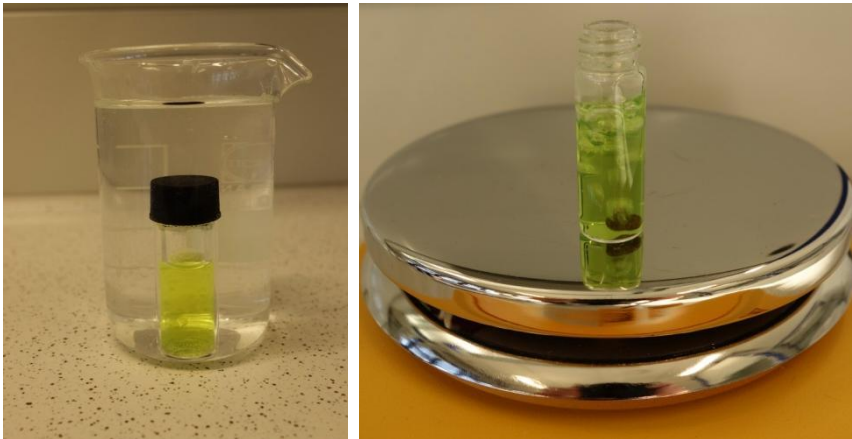


Abb. 6: Experimentgestaltung zur Überprüfung der Hypothese a) – vgl. Text

**E5: Überprüfung der Hypothese a):** Bestrahle die gelbe PBB-Lösung aus E1 in Einzeltests mit jeweils unterschiedlich farbigem Licht aus verschiedenen Lichtquellen. Verwende dazu das blaue, grüne, rote und weiße Licht aus der LED-Taschenlampe, Licht aus einer Halogenlampe und Sonnenlicht. Beobachte jeweils, die Farbänderung in der PBB-Lösung.

*Beobachtungen und didaktische Hinweise:*

In E4 kommt es weder bei 60 °C noch in der siedenden PBB-Lösung zur Blaufärbung. Das ist aber der Fall in E5, wenn mit blauem oder weißem Licht aus der LED-Taschenlampe bestrahlt wird. Die Blaufärbung erfolgt allerdings langsamer als bei der Bestrahlung mit violettem Licht wie in E1. Auch mit Licht aus einer Halogenlampe und noch besser mit Sonnenlicht färbt sich die gelbe PBB-Lösung blau. Mit grünem und rotem Licht, ganz gleich aus welcher Lichtquelle, erfolgt keine Blaufärbung.

Diese Versuchsergebnisse zeigen, dass für die Reaktion Gelb → Blau in der PBB-Lösung tatsächlich Energie in Form von Licht (nicht in Form von Wärme!) benötigt wird. Es wird aber auch deutlich, dass es blaues oder violettes Licht sein muss. Weißes Licht, das eine „Mischung“ aus Licht verschiedener Farben ist, treibt die Blaufärbung im PBB-Experiment nur dann an, wenn es auch blaues oder violettes Licht enthält. Weil das bei Sonnenlicht der Fall ist (Hinweis auf den Regenbogen) verläuft die Reaktion Gelb → Blau in der PBB-

Lösung bei Sonnenlicht sehr gut. Die Versuchsergebnisse aus E4 und E5 unterstützen<sup>4</sup> also die Hypothese a). Es bietet sich an dieser Stelle an, das Farbenspektrum des Sonnenlichts aufzugreifen und ihm eine Energieskala wie in Abb. 7 zuzuordnen. Ohne auf die Wellenlängen und auf Zahlenwerte von Energien

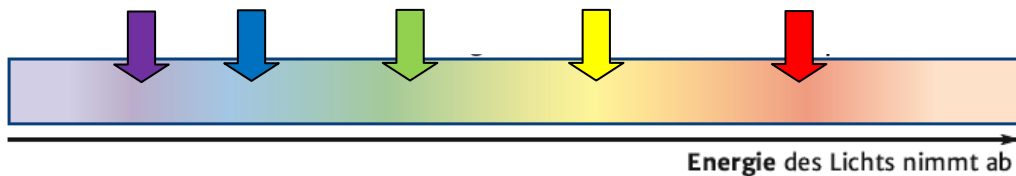


Abb. 7: Sonnenlicht enthält ebenso wie das Licht der Halogenlampe alle Farben. Das farbige Licht der LEDs aus dem PBB-Experimentiersatz besteht dagegen nur aus der einen Farbe. Das weiße Licht der LED besteht aus blauem und gelbem Licht.

einzugehen, sollte aufgrund der Versuchsergebnisse bei E1 und E5 festgehalten werden, dass für den Antrieb der Reaktion Gelb → Blau beim PBB-Experiment die Farben Blau und Violett vom „energiereicheren Rand“ des Solarspektrums benötigt werden. Damit und mithilfe der Unterschrift aus Abb. 7 lässt sich erklären, warum auch das weiße Licht der Sonne, der Halogenlampe und der LED die Blaufärbung der PBB-Lösung antreibt.

### 3. Anpassen

Die Forschungsergebnisse aus den Versuchen sind im oberen Energieschema aus Abb. 3 dargestellt. Dies ist die graphische Zusammenfassung der „angepassten“ Vorkenntnisse. Im PBB-Experiment läuft eine Reaktion ab, die als energetischen Antrieb Licht benötigt. Dabei wird ein blauer Stoff gebildet. Ob er sich aus dem gelben Stoff in der PBB-Lösung bildet oder aus einem farblosen Stoff, der ebenfalls in der Lösung enthalten sein könnte, wissen wir (noch) nicht<sup>5</sup>. Der bei der Lichtbestrahlung gebildete blaue Stoff reagiert mit Sauerstoff und wird dabei in einen farblosen oder gelben Stoff umgewandelt. Das Schema im Segment Anpassung aus Abb. 3 kann und darf nicht genauere Angaben über die Stoffe enthalten als die eben eingetragenen. Sicher ist aber, dass die kreisläufigen Farbänderungen im PBB-Experiment mit Stoffumwandlungen, also mit chemischen Reaktionen, einhergehen. Die erste Reaktion Kreislauf läuft nur lichtgetrieben ab und die zweite, den Kreis schließende, verbraucht Sauerstoff - wie bei einer Verbrennung.

### 4. Anwenden

Die Anwendung der Erkenntnisse aus dem Modellexperiment auf die Vorgänge in der Natur wird in einem Energieschema dargestellt, das vor allem die Gemeinsamkeiten des *Stoffkreislaufs* Photosynthese-Atmung mit dem Stoffkreislauf aus dem Experiment hervorheben soll. Die Edukte und Produkte der Photosynthese und Zellatmung sind in Abb. 3 nicht explizit genannt, weil zunächst betont werden soll, dass bei der Photosynthese in einer *lichtgetriebenen* Reaktion aus energiearmen Stoffen energiereiche Stoffe gebildet und diese in tierischen Zellen unter Sauerstoffverbrauch wieder zu den energiearmen Ausgangsstoffen der Photosynthese umgewandelt werden. Welche Stoffe das sind, könnte aus dem Biologieunterricht bekannt sein. Ganz gleich, ob das der Fall ist oder nicht, sollten die Stoffe *Kohlenstoffdioxid*, *Wasser*, *Zucker* und

<sup>4</sup> Statt „unterstützen“ kann im Anfangsunterricht auch „bestätigen“ oder sogar „beweisen“ gesagt werden. Hier wird zurückhaltend nur vom *Unterstützen* einer Hypothese gesprochen, um der Auffassung Rechnung zu tragen, dass eine Hypothese streng genommen durch Experimente weder bestätigt noch bewiesen, sehr wohl aber widerlegt werden kann. Nach *Karl Popper* ist jedes „geglückte Verifikationsexperiment“ ein „gescheitertes Falsifikationsexperiment“.

<sup>5</sup> Wenn danach gefragt wird, kann den Schülern mitgeteilt werden, dass die PBB-Lösung außer dem gelben Stoff noch zwei farblose gelöste Stoffe enthält.



*Sauerstoff* als Edukte und Produkte der Photosynthese zum Abschluss dieser Lerneinheit genannt und in das Schema aus dem Segment „Anwendung“ eingesetzt werden.

Die oben beschriebene Lernschleife soll Kinder recht früh erkennen lassen, dass die Nährstoffe für Menschen und Tiere sowie der Sauerstoff aus der Atemluft in der pflanzlichen Photosynthese aus Wasser und Kohlenstoffdioxid angetrieben durch Sonnenlicht erzeugt werden. In der Photosynthese wird also *Licht* zum *Antrieb fürs Leben* auf unserem Planeten. Wenn diese Erkenntnis von Dauer sein und sich auf individuelles Denken und Handeln auswirken soll, ist es förderlich, wenn sie in einem forschend-entwickelnden Lernprozess ins eigene Bewusstsein eingebaut wird. Dafür sind die oben beschriebenen Versionen des PBB-Experiments als „Wow-Effekt“ zur Motivation (E1) und als „Fragen an die Natur“ (E2-E5) geeignet.

## Ausblick

Für Teil 2 dieses Aufsatzes sind zwei weitere Lernschleifen geplant, in denen mithilfe neuer Versionen des PBB-Experiments die Elementarprozesse bei den gekoppelten Redoxreaktionen im Experiment erforscht und mit den entsprechenden Reaktionszyklen im natürlichen Kreislauf Photosynthese-Atmung verglichen werden. Dabei soll die photokatalytische Reduktion des Substrats Ethylviologen  $EV^{2+}$  im Mittelpunkt stehen (Abb. 8). Die Elementarschritte weisen mehrere prinzipielle Gemeinsamkeiten (aber auch essentielle Unterschiede) mit den Elementarprozessen bei der Photosynthese auf. Diese sollen herausgearbeitet und verglichen werden.

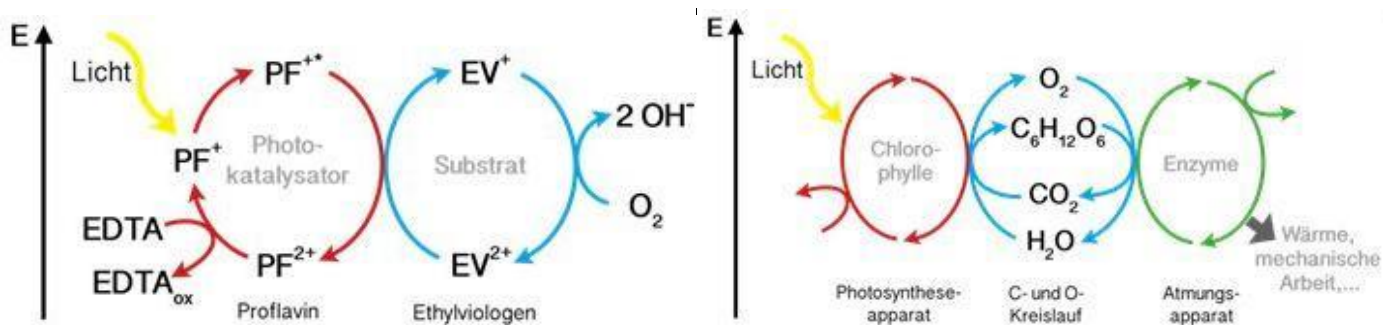


Abb. 8: Die stofflichen und energetischen Analogien und Unterschiede bei den gekoppelten Reaktionszyklen im PBB-Experiment und im natürlichen Stoffkreislauf Photosynthese-Atmung werden in Teil 2 dieses Aufsatzes experimentell und konzeptionell erschlossen

Weiterhin soll der Frage nachgegangen werden, ob im PBB-Experiment wie bei der Photosynthese die Energie des Lichts in chemische Energie umgewandelt und im reduzierten Substrat gespeichert wird. Die Bearbeitung dieser Fragen erfordert einige Grundkenntnisse, die erst in der Oberstufe erworben werden, beispielsweise über Redoxreaktionen als Elektronenübertragungen, Redoxpaare, Redoxpotenziale, und elektrochemische Zellen, Molekülstruktur und Farbigkeit organischer Verbindungen.

## Dank

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG wird für die Förderung des Forschungsvorhabens TA 228/4-1 **Photo-LeNa** (Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften) gedankt.

## Literatur

- [1] M. W. Tausch: "Photo-Blue-Bottle: Modellversuche zur Photosynthese und zur Atmung", PdN (Chemie), 43 (3), 13 (1994)
- [2] [www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de](http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de) > Publikationen > Publ. Nr. 43

- [3] S. Korn, M. W. Tausch, "A Laboratory Simulation for Coupled Cycles of Photosynthesis and Respiration", J. Chem. Educ., 78 (9), 1238 (2001)
- [4] M. W. Tausch, M. Heffen, R. Krämer, N. Meuter, "Passendes Licht - Harmlose Stoffe", PdN - ChiS , 64 (2), 45, (2015)
- [5] M. Heffen, M. W. Tausch: „Photokatalyse – homogen und heterogen; Das Photo-Blue-Bottle Experiment runderneuert“, PdN - ChiS , 64 (8), 42, (2015).
- [6] H. Schmidkunz, H. Lindemann: „Das forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren“ Westarp Wissenschaften, Didaktik Naturwissenschaften Bd. 2, 6. Auflage 1992
- [7] C. Bolte, J. Holbrook, F. Rauch (eds.) „Inquiry-based Science Education in Europe – Reflections from the PROFILE Project“ Berlin 2012
- [8] mmm

*Anschrift der Verfasser: Prof. Dr. Michael W. Tausch\*, Maria Heffen, Bergische Universität Wuppertal, FB C – L13.01/04 Gaußstr. 20, 42119-Wuppertal, e-mail: [mtausch@uni-wuppertal.de](mailto:mtausch@uni-wuppertal.de), [heffen@uni-wuppertal.de](mailto:heffen@uni-wuppertal.de)*