



# Schulbiologiezentrum Hannover

Vinnhorster Weg 2, 30419 Hannover

Tel: 0511-168-47665/7

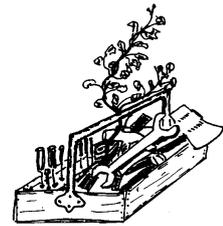
Fax: 0511-168-47352

Email : schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de

Hannover

## Unterrichtsprojekte Natur und Technik

19.65



## Experimente und Anregungen rund um das Thema „Photosynthese“

### Vorwort



Was hat eine Sandmühle aus dem Spielzeugladen mit der Photosynthese zu tun?

Vielen Biologen werden zunächst unterschiedliche Energieniveaus und Elektronentransportketten einfallen. Insofern ist die Sandmühle eine passende Analogie und eine Hilfe zum Verständnis eines komplexen biologischen Vorgangs der aber auf vielfältige Weise mit der Physik und der Chemie verwoben ist.

Wir meinen daher, dass das Thema Photosynthese keineswegs „nur“ in den Biologieunterricht gehört. Photosynthese ist ein Fächerübergreifendes Thema mit Ausblicken bis hinein in geographische und gesellschaftsrelevante Aspekte sowie in die Philosophie und die Religion. So umfassend sollte es auch behandelt werden und nicht als schwer zu überschauende biochemische Abfolge von Formeln und Stoffen. Eine vornehmlich biochemisch

orientierten Vermittlung der Photosynthese führt möglicherweise dazu, dass die Schüler „den Wald vor Bäumen nicht mehr sehen“ können und die grundlegenden energetische Aspekte erst viel später oder nie begreifen.

Diese Arbeitshilfe entstand als Zusammenfassung eines Fortbildungskurses im Schulbiologiezentrum der eigentlich „Lernstationen rund um die Photosynthese“ hätte heißen können und der für die Biologen eine Vielzahl unerwarteter und ungewöhnlicher teilweise offensichtlich nicht biologischer Perspektiven bot.

Doch das war Absicht, auch wenn vielleicht erst im Laufe des Kurses deutlich wurde, was das durch Muskelkraft erzeugte Knallgasgemisch oder der zur Rotglut gebrachte Heizstrahler mit der Photosynthese zu tun hat.

Die für den Kurs aufgebauten Lernstationen bezogen sich weder auf einen Altersjahrgang – einfaches und kompliziertes stand gleichrangig nebeneinander – noch war die Auswahl einem strengen roten Faden unterworfen. Fassen Sie diese Arbeitshilfe eher als Ideenpool und explizit nicht als curriculare Handlungsanweisung auf!

**Daher die Bitte:** Lesen Sie diese Arbeitshilfe nicht von Anfang bis Ende durch! Überfliegen Sie die Themen und greifen Sie sich das für Sie Beste heraus, passen Sie die Vorschläge an Ihre Bedürfnisse an und verwerfen Sie das, was Sie nicht brauchen. Und: Sagen Sie uns, was Ihnen gefällt und was Sie besser machen würden oder besser gemacht haben!

Kurze Exkurse in die Physik der elektromagnetischen Strahlung und in die Atomphysik (Energiezustände) schienen uns notwendig, da diese Zusammenhänge - unserer Erfahrung - nach vielen Biologen recht fremd sind.

Wir haben versucht, das Thema so darzustellen, dass daraus in der Schule ein gemeinsames naturwissenschaftliches Projekt gemacht werden kann an dem sich zum Beispiel anknüpfend an Fragen nach der energiewirtschaftlichen Zukunft der Erde auch die sozialwissenschaftlichen Fächer beteiligen können. Die Diskussion über fossile oder Ressourcen schonende, CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequellen betreffen die Photosynthese. Ohne sie gäbe es weder Erdöl noch Erdgas, Holzfeuerung oder Biogas. Bis zur Erfindung anderer Techniken wird die pflanzliche Photosynthese die Existenzgrundlage aller Konsumenten einschließlich der Menschen bleiben. Oder salopp formuliert: In jedem Steak, in jedem Tank steckt Sonnenlicht! Unser Kurs „Experimente zur Photosynthese“ rückte Vertrautes und vordergründig Selbstverständliches in ein ganz neues Licht und knüpfte für viele Teilnehmer ungewohnte Zusammenhänge. Warum sind Blätter grün? Warum ist der Himmel blau und Sonnenuntergänge rot? Und, hat das eine mit dem anderen zu tun, was mit der Photosynthese? Und: Ist das Zufall? Oder Gesetz? Oder geplant? Wir wollen wie üblich versuchen, mit einfachen, in der Schule oder zu Hause durchführbaren Mitteln vorzugehen. Mit Sternchen versehene Geräte sind im Schulbiologiezentrum Hannover ausleihbar. Eine Liste am Ende dieser Arbeitshilfe gibt einen Überblick über die bei uns vorhandenen Materialien. Mit dem Hinweis auf einige technische Anwendungen (Elektrolyse mit Solarzellen, Brennstoffzelle) möchten wir zeigen, dass die Natur viele Ideen liefert, die uns auf dem Weg zu einem intelligenten Umgang mit der Natur begleiten können. Wer weiß, vielleicht werden wir eines Tages elektrische Energie mit Hilfe von Biomembranen gewinnen? Zurück zur Frage nach der Sandmühle: Nur wer Sand in die Höhe hebt und in die Mühlenschaufeln rieseln lässt wird sie bewegen. Dazu braucht es Energie, denn von nichts kommt nichts.

Das Leben ist wie eine Sandmühle ...

Ingo Mennerich, Schulbiologiezentrum Hannover,  
Sylt/Hannover, April/Juni 2006

# Inhalt

Grüne Einzeller: Hungrig auf Licht.....	5
Kartoffeln: Hungrig auf Licht.....	5
<b>Energiequelle Sonne: Der Stern von dem wir leben</b>	
Wenn die Sonne so groß wie eine Pampelmuse wäre.....	5
Planetenpfad im Schulbiologiezentrum Hannover.....	6
Kann man messen, wie heiß die Sonne ist? .....	6
Wie heiß wird eine Herdplatte? .....	6
Gutfarben zeigen die Temperatur an.....	6
Experimente mit der selbst gewickelten Glühwendel.....	7
Temperaturmessung mit dem IR-Thermometer.....	7
Temperaturmessung mit dem Taschenrechner: Das Wiensche Verschiebungsgesetz.....	8
Unsichtbare Wärmestrahlung.....	8
Elektromagnetische Strahlung.....	9
Licht, Wellenlängen und Farben.....	9
Wir zerlegen das Sonnenlicht.....	10
Selbstbau eines Spektroskops.....	10
Langwellige und kurzwellige Strahlung im Spektroskop.....	11
Das Strahlungsspektrum der Sonne.....	11
Streulicht in der Atmosphäre.....	11
Sonnenlicht unter Wasser.....	12
Messen der Extinktion im Wasser.....	12
<b>Der grüne Stoff, der das Leben möglich macht: Chlorophyll</b>	
So stellt man ganz einfach eine Chlorophylllösung her.....	13
Chromatographie mit Tafelkreide.....	13
Papierchromatographie.....	13
Spektroskopische Untersuchung der Absorptionseigenschaften von Chlorophyll.....	14
Untersuchung mit einem Luxmeter.....	14
Untersuchung mit Hilfe einer Energiesparleuchte.....	14
Messungen mit dem Photometer.....	15
Spektroskopische Untersuchungen anderer Farblösungen.....	16
Euglena, das „Arbeitspferd“ der Photosynthese.....	16
Euglena kann schreiben.....	17
Euglena kann Farben sehen.....	17
Farbfilter aus Farblösungen selbst hergestellt.....	18
Fluoreszenz.....	18
<b>Energie aus Sonne und Wasser</b>	
Hydrolyse.....	19
Knallgasreaktion.....	19
Brennstoffzellentechnik.....	19
<b>Abfallprodukt Sauerstoff</b>	
Künstliche Biosphären.....	20
Leben zwischen Himmel und Erde.....	20
Sauerstofferzeugung bei der Wasserpest Elodea.....	21

Photosynthese in blauem, grünem und rotem Licht.....	21
Sauerstoffnachweis mit der Glimmspanprobe.....	21
Sauerstoffnachweis mit dem „Blauen Wunder“ .....	21
Sauerstoffnachweis mit Indigokarmin* und Natriumditionit*.....	22
Elektrochemischer Nachweis mit dem Sauerstoffmessgerät.....	22
<b>Chemisch gebundene Energie</b>	
„Solenergix“ – Enthalten Kartoffeln Sprengstoff?.....	23
Alkohol aus Getreide- oder Kartoffelstärke.....	23
Stärkenachweis in Elodea.....	24
Stärkenachweis mit anderen Blättern.....	24
<b>Überlegungen zur Energieeffizienz</b>	
Wirkungsgrad von Photosynthese und Solarzelle.....	24
Kartoffeln und Biodiesel: Wie viel Acker braucht ein Auto?.....	28

**Titel:** **Experimente und Anregungen rund um das Thema  
„Photosynthese“**

**Arbeitshilfe Nr. 19.65**

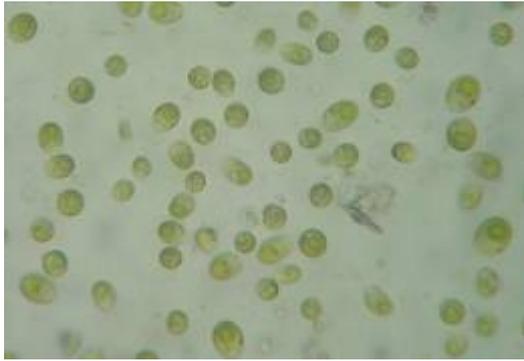
**Verfasser:** Ingo Mennerich, April/Juni 2006

**Redaktion, Fotos,  
und Layout** Ingo Mennerich

**Herausgeber** Landeshauptstadt Hannover  
 Fachbereich Bibliothek und Schule  
 Vinnhorster Weg 2  
 30419 Hannover  
 Tel.: 0511-168-47665/7  
 Fax: 0511-168-47352  
 Email: [schulbiologiezentrum@hannover.de](mailto:schulbiologiezentrum@hannover.de)  
 Internet: [www.schulbiologiezentrum-hannover.de](http://www.schulbiologiezentrum-hannover.de)  
[www.foerderverein-schulbiologiezentrum.de](http://www.foerderverein-schulbiologiezentrum.de)

Hannover 2006

## Grüne Einzeller: Hungrig auf Licht



Eine mit Wasser gefüllte Treckerspur am Ackerrand ist von grünen Wolken durchzogen: Unter dem Mikroskop ist massenhaft Chlamydomonas\* zu erkennen, grüne Einzeller, die sich mit Hilfe von zwei peitschenartigen Geißeln recht zügig fortbewegen.

Chlamydomonas ist hungrig auf Licht und kann es mit einem lichtempfindlichen, von einem roten „Augenfleck“ einseitig abgeschatteten lichtempfindlichen Organell

orten. Schon bald hat sich die Probe entmischt. Die Einzeller versammeln sich an der belichteten Seite des Gefäßes und bilden dort eine dunkelgrüne Wolke...

Die Grünalge Chlamydomonas\* oder auch das ebenfalls zu den Grünalgen gehörende „Augentierchen“ Euglena\* zeigen durch ihr Verhalten, was höhere Pflanzen erst bei näherer Untersuchung offenbaren: Alle leben vom Licht.

## Kartoffeln: Hungrig auf Licht

Keimende Kartoffeln vergeilen („etiolieren“) in der Dunkelheit. Man kann sie in ein aus einem Schuhkarton mit Deckel hergestelltes und mit einem kleinen Lichtfenster versehenes dunkles Labyrinth legen und wird beobachten können, wie die langen, weißlich-gelben Triebe um alle Ecken herum auf das Lichtfenster zuwachsen. Die Kartoffel steckt die in der Knolle enthaltene Energie (Stärke) fast ausschließlich in das Längenwachstum der Triebe. Der Stärkevorrat reicht zur Bildung von einem Meter langen Trieben. Eine zur gleichen Zeit ins Helle gelegte zweite Kartoffel bildet an gedrungenen Sprossen grüne Blätter aus.

Die Kartoffel zeigt nicht nur Lichtwendigkeit („Phototropie“) sondern auch, dass Blätter und Blattgrün („Chlorophyll“) erst im Licht entstehen, also erst dann, wenn sich ihre Bildung „lohnt“.

## Energiequelle Sonne: Der Stern von dem wir leben

Die Energie, die Leben ermöglicht stammt nahezu ausschließlich von der Sonne. Grüne Pflanzen verwandeln durch die Photosynthese die Strahlungsenergie in chemisch gebundene Energie. Vor jeder Beschäftigung mit der Photosynthese sollte daher die Energiequelle selbst, die Sonne stehen. Dafür lohnt ein kleiner Ausblick in die Astronomie:

### Wenn die Sonne so groß wie eine Pampelmuse wäre...

Wie groß wäre dann die Erde? Wie weit wäre sie – bei gleichem Maßstab - von der 14 cm großen Pampelmusensonne“ entfernt?

Die Sonne ist mit einem Durchmesser von 1392000 km etwa 109mal so groß wie Erde (12756 km). Eine zur „Pampelmusensonne“ passende Erde wäre folglich nur so groß wie ein Kressesamen (1,3 mm)

Der mittlere Abstand Sonne-Erde beträgt etwa 149000000 km. Auf unseren Maßstab umgerechnet wären das etwa 15 m!

Die Erde hat gerade die „richtige“ Distanz zur Sonne. Auf der sonnennahen Venus wäre es für das Leben, so wie wir es kennen, zu heiß. Auf dem sonnenfernen Mars ist wäre zu kalt. Zufall? Oder, wer hat sich das so ausgedacht?



### **Der Planetenpfad im Schulbiologiezentrum Hannover**

Im Schulbiologiezentrum Hannover gibt es einen maßstabsgetreuen Planetenpfad an dessen einem Ende eine golfballgroße Sonne steht und in etwa 150 m Distanz der stecknadelgroße Pluto. Dazu mehr in den Arbeitshilfen „Das Sonnensystem im Schulbiologiezentrum“\* und „Der Themengarten Sonne, Energie und Klima“\*. Hinweise zu einem „ambulanten“, 1800 m langen Pfad mit einem Gymnastikball als Sonne liefert unsere Arbeitshilfe „Das Sonnensystem im Georgengarten“\*. Die darin enthaltenen Anregungen lassen sich für jeden anderen Standort umrechnen.

### **Kann man messen wie heiß die Sonne ist?**

Die Sonne ist ein Stern, einer unter hundert Milliarden oder mehr Sternen in der Milchstraßen-Galaxis. Sie ist ein, ein gelblich-weißer, von der Größe und Temperatur her relativ unbedeutender so genannter G2-Stern auf der Hauptreihe der Sternentwicklung. Ein ganz normaler Stern also.

Die Oberflächentemperatur wird allgemein mit 5700 °C oder 6000 K (Kelvin) angegeben.

Woher weiß man das? Es war noch nie ein Thermometer auf der Sonne!

Die Lösung: Die Farbe verrät die Temperatur. Man kann die Farbe der Sonne auf der Erde oder besser aus einer erdnahen Position im Weltall bestimmen. Ihre gelblich-weiße Farbe gibt Aufschluss über ihre Temperatur.

Diesen Zusammenhang ergründen wir mit einem einfachen Experiment:

### **Wie heiß wird eine Herdplatte?**



Eine Herdplatte leuchtet mit steigender Temperatur zunächst noch nicht, dann schwach dunkelrot und schließlich kräftig hellrot. Besonders gut ist das bei Ceran-Platten zu sehen.

Es gibt also einen Zusammenhang zwischen der Farbe einer Lichtquelle und ihrer Temperatur. Je heißer, desto kräftiger. Und: Eine dunkelrote Platte ist kälter als eine hellrote. Wer diesen Zusammenhang weiter verfolgt wird schnell zu der Vermutung

gelangen, dass die gleißend helle und fast weiße Sonne viel heißer sein muss als eine Herdplatte je werden könnte.

Die Flamme einer Kerze oder die eines Bunsenbrenners zeigt verschiedenfarbige Areale von rötlich gelb bis blau. Wenn man zum Beispiel ein Stück Metalldraht in eine hölzerne Wäscheklammer steckt kann man es in der Flamme mehr oder weniger stark zum Glühen bringen.

### **Glutfarben zeigen die Temperatur an**

Jemanden zur Weißglut bringen ist sehr schwer, denn richtige Weißglut ist ein Gemisch aus allen Spektralfarben (Regenbogenfarben) entsteht erst bei etwa 7000 °C. So heiß ist nicht einmal die Sonne.

Bei der Metallverhüttung gilt folgende Einteilung der Glutfarben. Sie kann uns helfen, die Temperatur der Herdplatte oder die des glühenden Metalldrahts.

■	< 400 °C:	unsichtbare Infrarotstrahlung
■	400 °C	Grauglut, nur im Dunkeln wahrnehmbar
■	525 °C	Beginnende Rotglut
■	700 °C	Dunkle Rotglut
■	800 °C	Helle Rotglut
■	1100 °C	Gelbglut
■	1300 °C	beginnende „Weißglut“*
■	1500 °C	volle, blendende „Weißglut“*

\*wird vom Auge nur aufgrund der Helligkeit als weiß wahrgenommen.

### Experimente mit der selbst gewickelten Glühwendel

Statt mit der Herdplatte kann man den Versuch auch mit einer selbst gewickelten Glühwendel aus Konstantandraht durchführen. Der Widerstandsdraht aus Konstantan wird eng auf einen Schaschlikspieß oder eine Stricknadel gewickelt. Der Kern wird danach aus der Wicklung herausgezogen. Die Wendel schließen Sie an einen regelbaren Trafo (Niedervolt!) an. Sie wird mit steigender Spannung alle Farben bis zum hellen Gelb durchlaufen. Allerdings brennt Sie durch bevor sie weiß glüht.

Eine alternativ dazu verwendbare Glühlampe kann heißer und damit weißer werden weil ihre Glühwendel aus Wolfram einen höheren Schmelzpunkt hat und kein Sauerstoff vorhanden ist. Glühlampen sind mit Edelgas, z.B. Krypton gefüllt.

### Temperaturmessung mit Infrarot-Thermometer



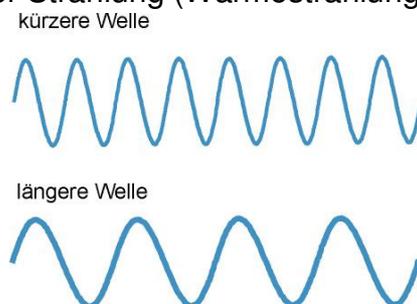
Mit dem IR-Thermometer\* kann man die Temperatur eines Gegenstandes messen ohne ihn zu berühren. Woher „weiß“ das Gerät, wie warm das Objekt ist?

Feste und flüssige Körper die wärmer sind als der absolute Nullpunkt von  $-273\text{ °C}$  (Null Kelvin) geben ein breites Spektrum elektromagnetischer Strahlung (Wärmestrahlung) ab. Je wärmer der Körper, desto kurzwelliger die

Strahlung. Kurzwelliger bedeutet, dass der Abstand von Wellenberg zu Wellenberg kürzer ist und dass pro Zeiteinheit mehr Wellenberge eine bestimmte Länge durchlaufen. Je kürzer die Wellenlänge desto höher die Frequenz.

Die Wärmestrahlung, auch infrarote Strahlung genannt, ist nicht anderes als für das menschliche Auge unsichtbares Licht. Das wird spätestens dann deutlich, wenn die infrarote Strahlung einer Herdplatte bei steigender Temperatur in sichtbares Rot übergeht. Licht ist sichtbare Wärmestrahlung!

Das Infrarotthermometer empfängt die vom zu messenden Objekt ausgesandte Wärmestrahlung, ermittelt ihre Wellenlänge und rechnet den Wert in einen Temperaturwert um.



## Temperaturmessung mit dem Taschenrechner: Das Wiensche Verschiebungsgesetz

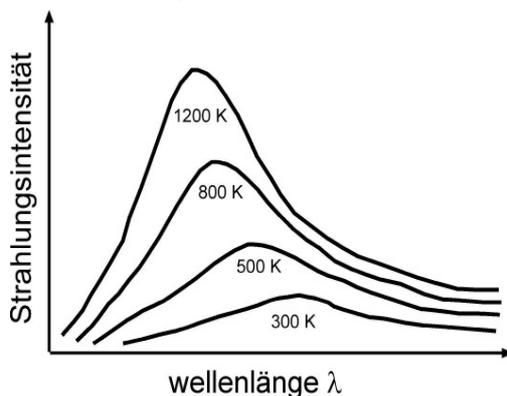
Die von einem Körper ausgehende Wärmestrahlung ist ein Gemisch längerer und kürzerer Wellenlängen. Die Gesamtverteilung stellt eine, in der Schule schwer zu berechnende Kurve mit einem temperaturabhängigen Maximum dar. Dieses Strahlungsmaximum liegt nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz bei  $\lambda_{\max} = 2,898 \text{ mm} / T$ . Für T ist die absolute Temperatur in K (Kelvin) einzusetzen, die Sie leicht sich aus der „üblichen“ Celsiustemperatur errechnen können:

$$K = 273 + T^{\circ}\text{C}$$

Beispiele:  $20^{\circ}\text{C} = 273 + 20 = 293 \text{ K}$ ,  $-20^{\circ} = 273 + (-20) = 253 \text{ K}$

Bei „Normaltemperaturen“ von  $20^{\circ}\text{C}$  (= 293 K) liegt das Wellenlängenmaximum bei  $2,898 \text{ mm} / 293 = 09,99 \text{ mm}$ .

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Strahlungseigenschaften unterschiedlich warmer Körper.



Man sieht,

- dass die Strahlungsintensität mit steigender Temperatur zunimmt,
- dass sich das Wellenlängenmaximum mit steigender Temperatur in den kurzwelligen Bereich verschiebt,
- dass die Kurven mit steigender Temperatur immer asymmetrischer werden: Steile Flanken im kurzwelligen Bereich, lang auslaufende Flanken im langwelligen.

## Unsichtbare Wärmestrahlung



So genannte Wärmebildkameras registrieren die von Objekten ausgehende, für das Auge unsichtbare Wärmestrahlung und bilden die Objekte in Falschfarben ab. Das nebenstehende Bild zeigt einen Mann mit relativ warmen Partien auf der Stirn sowie rund um Nase und Mund. Kühler ist die Nase, die Wangen und der Bart. Die Brille gibt die geringste Wärme ab. Wärmebildkameras werden zum Beispiel genutzt um Energielecks an Häusern aufzuspüren. Als Infrarotkameras sind sie Bestandteil von Nachtsichtgeräten.

## Elektromagnetische Strahlung

Licht ist, physikalisch gesehen nichts anderes als Wärmestrahlung. Aber auch nichts anderes als Mikro- oder Radiowellen. Einige Beispiele:

- „Atomgesteuerte“ Uhren empfangen ein von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt erzeugtes und von einem Sender in Mainflingen auf der Frequenz 77,5 KHz ausgestrahltes Radiosignal. Ein Kilohertz (kHz) sind 1000 Schwingungen (Hz) pro Sekunde.
- Wenn Sie den NDR in Hannover auf der Mittelwelle hören, schwingen die vom Sender in Hemmingen-Westerfeld ausgestrahlten Radiowellen 828000mal pro Sekunde auf und ab (828 kHz).



- Ein Mikrowellenherd „sendet“ auf 2455 Mhz (Megahertz). Ein Hertz (Hz) ist eine Schwingung pro Sekunde, ein Mhz heißt 1000000 Schwingungen pro Sekunde. Der die Wassermoleküle im Essen anregende „Sender“ im Herd schwingt also 2455000000mal pro Sekunde und regt die miteinander vernetzten Wassermoleküle zum Mitschwingen an. Diese Molekülschwingungen nehmen wir als Wärme wahr oder verbrennen uns die Zunge....

- Handybenutzer kommunizieren auf folgenden Frequenzen:

D-Netz 900 Mhz  
E-Netz 1800 Mhz  
GSM1900 1900 Mhz



Die oben genannten Frequenzen (f) lassen sich leicht in die entsprechenden in Wellenlängen ( $\lambda$ ) nach der Formel  $f = \lambda \cdot c$  umrechnen. c ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, hier grob 300000000 m/s. Die Maßeinheit der Frequenz ist das Hertz (Hz). 1 Hz ist eine Schwingung pro Sekunde.  $\lambda$  (Lambda) ist die Wellenlänge in m.

## Licht, Wellenlängen und Farben

Farbe	Wellenlänge in nm*
Violett	400 - 450
Blau	450 - 500
Grün	500 - 570
Gelb	570 - 590
Orange	590 - 620
Rot	620 - 700

\* nm (Nanometer) = 1 Milliardstel m oder 1 Millionstel mm,  
1000 nm = 1  $\mu$ m = 0,001 mm

Durch Umstellen des Wienschen Verschiebungsgesetzes lässt sich zu jeder Farbe die entsprechende Temperatur berechnen:

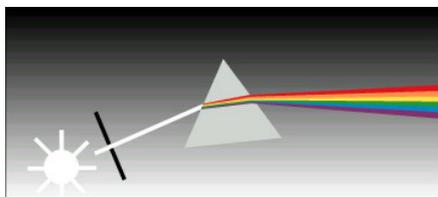
$$T = 2,898 / \lambda_{\max}$$

Violett mit der Wellenlänge 400 nm (0,0004 mm) entspricht 7245 K (= 6972 °C).  
Rot mit der Wellenlänge 700 nm (0,0007 mm) entspricht 4140 K (= 3867 °C).  
Zwischen diesen Werten liegt die Oberflächentemperatur der Sonne. Das Licht der Sonne ist gelblich weiß, ein Gemisch der im Regenbogen vorkommenden Spektralfarben.

### Wir zerlegen das Sonnenlicht

Schon mit einfachen Hilfsmitteln lässt sich erkennen, dass das Sonnenlicht aus vielen Farben besteht:

- Schaue durch eine große Vogelfeder auf die Sonne. Du siehst farbige Streifen. Das Licht der Sonne besteht aus allen Regenbogenfarben (Spektralfarben).
- Eine CD leuchtet, wenn du sie ins Sonnenlicht hältst farbig auf. Das Licht wird durch ihre feinen Rillen (Datenspuren) in alle Spektralfarben zerlegt.
- Fülle ein kleines Aquarium mit Wasser, stelle es in eine dunkle Ecke des Raums vor eine weiße Wand und lasse Sonnenlicht mit Hilfe eines Spiegels auf die Ecken scheinen. Das Licht wird „gebrochen“ erscheint als farbiger Streifen auf der Wand. Das Aquarium und das Wasser sind ein Prisma.
- Den gleichen Effekt kann man mit dem durchsichtigen Kästchen erzielen, in dem Deckgläschen für die Mikroskopie geliefert werden. Daraus wird ein Prisma wenn man es mit Wasser füllt.
- Stelle einen Suppenteller auf die sonnige Fensterbank. Fülle ihn mit Wasser und lege einen Spiegel hinein. Mit etwas Geschick kannst du ein Stück „Regenbogen“ auf die Zimmerdecke zaubern.



- Ein Prisma kannst du auch selbst bauen: Lasse dir drei Objektträger geben und klebe ihre Kanten mit Uhu oder (besser!) Silikonkleber zu einem dreieckigen „Schwimmbekken“ auf eine gerade Unterlage. Gut geeignet ist ein kleiner Spiegel (Spiegelkachel aus dem Baumarkt). Lasse

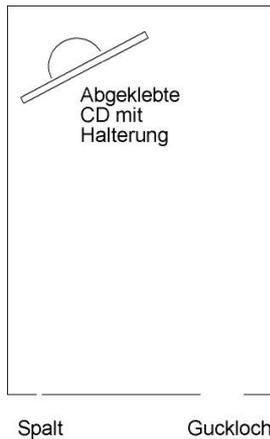
den Klebstoff gut trocknen. Achte darauf, dass die Klebekanten wasserdicht sind. Schneide ein großes Stück Pappe aus und versehe es in der Mitte mit einem schmalen, etwa 3 cm langen Spalt. Fülle das „Schwimmbekken“ mit Wasser und lasse mit einem Spiegel Sonnenlicht durch den Spalt auf das Prisma scheinen. Auf der abgedunkelten, weißen Wand dahinter erscheint ein Regenbogenfarbiges Band, das Spektrum.



### Selbstbau eines Spektroskops

Ein Spektroskop zur Untersuchung der Lichts und der Absorptionseigenschaften des Chlorophylls lässt sich aus einer CD, einem Schuhkarton und etwas Pergamentpapier herstellen. (Ausführliche Bauanleitung und Funktionsweise in der Arbeitshilfe 19.56 „Ein selbst gebautes Spektroskop aus einem Schuhkarton und einer CD“).

Die Zerlegung des weißen Lichtes in Spektralfarben basiert auf wellenlängenabhängigen Interferenzen bei der Reflexion auf der Oberfläche der CD. Dadurch kommt es zur Verstärkung oder Auslöschung verschiedener Wellenlängen (Farben). Für jede Wellenlänge ergibt sich ein optimaler Reflexionswinkel.



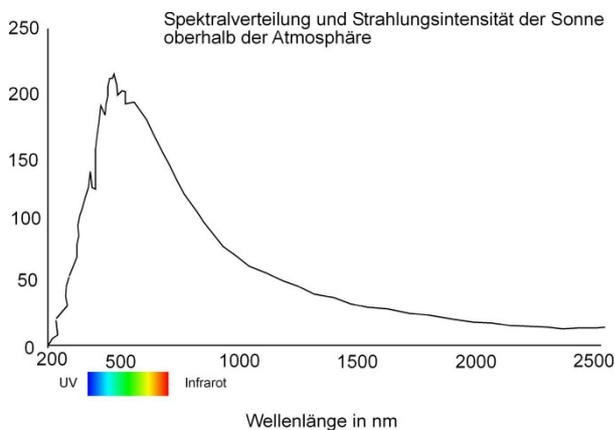
Das von einem Streifen Pergamentpapier gestreute diffuse Sonnenlicht tritt durch einen schmalen, in Aluminiumfolie geschnittenen Spalt in die Dunkelkammer (Schuhkarton) ein. Das von dem CD-Streifen erzeugte Spektrum kann durch das Guckloch betrachtet werden.

Das selbst gebaute Spektroskop eignet sich auch zur Untersuchung von Emissionslinien bei der Verbrennung von Elementen (Spektralanalyse, z.B. D-Linien beim Natrium), zur Untersuchung von Leuchtstoffröhren oder zur Beobachtung der Absorptionslinien (Fraunhofersche Linien) auf der Sonnenoberfläche.

### Langwellige und kurzwellige Strahlung im Spektroskop

Im Spektroskop betrachtet erscheint das Licht einer Rotlichtlampe (Infrarot) gegenüber einer „normalen“ Glühlampe am blau-violetten Ende sehr schwach, bei einer Blaulicht betonten Pflanzenlampe dagegen fällt der rote Bereich schwächer aus. Wegen der Asymmetrie der Emissionskurve (siehe nächsten Abschnitt) ist dieser Effekt allerdings nicht so stark.

### Das Strahlungsspektrum der Sonne



Die spektrale Verteilung des Sonnenlichts reicht vom unsichtbaren kurzwelligen Ultraviolett (UV-A, UV-B, UV-C) bis zum langwelligen, ebenfalls nicht sichtbaren Infrarot.

Das Maximum liegt bei 483 nm. Diese Wellenlänge wird von unseren Augen als blaugrün wahrgenommen. Die Kurve ist zur Spitze asymmetrisch und im langwelligen Bereich stark ausgezogen.

Aus dem Maximum bei 483 nm errechnet sich nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz eine Oberflächentemperatur von 6000° K (5763°C).

Unser (helladaptiertes) Auge ist für blaugrün empfindlicher als für alle anderen Spektralfarben.

nach Hans Häckel, Meteorologie,  
Eugen Ulmer Verlag, 1985/1999

### Streulicht in der Atmosphäre

Warum ist der Himmel blau? Warum geht die Sonne rot auf und unter? Der wolkenlose blaue Himmel ist das Ergebnis der Streuung des weißen Sonnenlichts in der Atmosphäre. Die Wellenlänge des am stärksten gestreuten Lichts ist abhängig der spektralen Verteilung der Lichtquelle (Sonne) und von der Größe der streuenden Teilchen.

Auf der Erde ist es vor allem der blaue Spektralanteil. Ist der Weg des Lichts durch die Lufthülle, bei Sonnenauf- und Untergang, länger geht ein zunehmender Teil des blauen Lichts durch Streuung verloren und die Sonne erscheint rötlich.

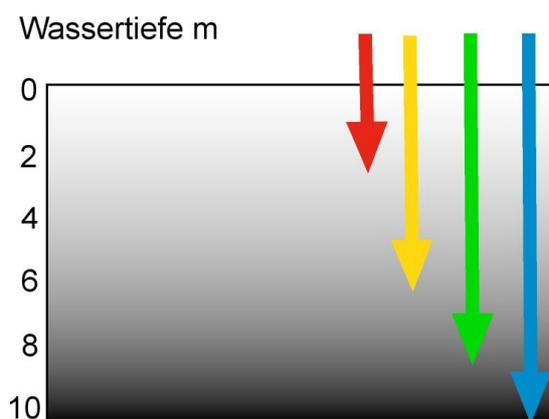
Da das Absorptionsspektrum des Chlorophylls deutliche Parallelen dazu zeigt sollten diese Zusammenhänge mit einem Experiment untermauert werden.

Wenn Wasser mit wenigen (!) Tropfen Milch versetzt wird streut die Milch das Blau im weißen Licht. Von der Seite betrachtet erscheint die Flüssigkeit bläulich, schaut man dagegen durch die „Blaumilch“ auf die Lichtquelle erscheint diese gelblich weil der blaue Anteil fehlt. Es bringt nichts, mehr Milch hinzuzufügen aber reizvoll ist es, mehrere Gläser mit dünner „Blaumilch“ hintereinander zu stellen. Je länger der Weg des Lichtes, desto mehr Blau wird herausgestreut, desto rötlicher erscheint es bei direkter Betrachtung.

### Sonnenlicht unter Wasser

Unterwasseraufnahmen sind oft bläustichig.

Blaues, kurzwelliges Licht ist energiereicher als langwelliges Rotes. Das Rot im Sonnenlicht dringt nur bis zu einer Wassertiefe von drei Metern ins Wasser ein, Orange bis fünf, Gelb bis zehn Metern. Erst in größeren Tiefen verblassen Grün und Blau. Mit der Tiefe nimmt auch die Gesamthelligkeit ab. Grünalgen, Rotalgen und Braunalgen, die in unterschiedlichen Tiefen vorkommen sind durch bestimmte akzessorische Farbpigmente an das dortige Licht- und Energieangebot angepasst.



Das Absorptionsspektrum des Chlorophylls heutiger Landpflanzen trägt die „Erinnerung“ an den Ursprung des Lebens im Wasser in sich. Das Absorptionsmaximum ist in Bezug auf das auf der Erdoberfläche registrierte Strahlungsmaximum der Sonne etwas in Richtung Blau verschoben.

### Messen der Extinktion im Wasser

Die Extinktion des langwelligen Anteils einer weißen Lichtquelle lässt sich mit einem Spektroskop feststellen, allerdings erhält man keine Messwerte. Das rote Ende des Spektrums erscheint lediglich schwächer, was aber nicht sofort ins Auge fällt weil der unmittelbare Vergleich fehlt. Besser geeignet ist folgender Aufbau: Mehrere hintereinander gestellte kleine Aquarien bilden eine „Wassersäule“ die vom Licht einer möglichst weißen Projektionslampe durchstrahlt werden.

Mit einem Luxmeter, vor dessen Sensor nacheinander blaue, grüne und rote Farbfilter gehalten werden wird die Helligkeit zunächst ohne Wasser, dann mit Wasser gemessen und die Werte für jede Farbe miteinander verglichen.

Für eine dritte Variante muss eine einfache Schaltung mit farbigen Leuchtdioden (LEDs) aufgebaut werden. Drei LEDs (rot, grün blau) werden mit Regelwiderständen (Potis) auf gleiche subjektive Helligkeit eingestellt. Dann wird das Licht durch die Wassersäule geschickt. Die Wassersäule kann durch einen am Ende angebrachten Spiegel optisch auf die doppelte Länge gebracht werden.

Alternativ zu der Wassersäule aus Aquarien kann man auch handelsübliche PVC-Wasserrohre zusammenstecken und mit einem Abschlussstopfen versehen. Auf die Innenseite des Stopfens wird ein passender Spiegel geklebt. Das Rohr wird senkrecht aufgestellt und mit Wasser gefüllt. Das am Boden gespiegelte Licht der LEDs kann oben mit dem „Original“ verglichen werden.

## Der grüne Stoff der Leben möglich macht: Chlorophyll

### So stellt man ganz einfach eine Chlorophylllösung her

Zerschneide einige grüne Blätter (im Winter auch Gras) mit der Schere und zerreiße sie zusammen mit etwas Sand (z.B. feinem Quarzsand aus dem Baumarkt) und etwas Brennspritus. Dazu nimmst du am besten ein Porzellanschälchen und einen Mörser. Gieße die grüne Flüssigkeit durch einen Kaffeefilter.

Diese Methode ist für kleinere Mengen gedacht.

Von der Methode, den Brennspritus über einer Kerze zu erwärmen sollte man aus Sicherheitsgründen absehen!

#### •Größere Mengen kann man auch so herstellen:

Koche grüne Blätter in Wasser kurz auf und lasse sie einige Minuten stehen. Durch das Kochen werden die Zellen aufgeschlossen, so dass das Chlorophyll später leichter herausgelöst werden kann.

Lege die Blätter in ein Marmeladenglas, gib Brennspritus dazu und verschraube es ganz fest. Stelle das Glas in das heiße Wasser. Alkohol nimmt die Wärme schnell auf. Nach einiger Zeit hat sich der Brennspritus grün gefärbt. Gib die Chlorophylllösung durch einen Filter.

Beim Filtern bildet sich ein **Farbrand**. Die Chlorophylllösung enthält grünes Chlorophyll a und b sowie gelbe und rötliche Carotinoide die im Filterpapier höher aufsteigen.



### Chromatographie mit Tafelkreide

Stelle ein Stück weiße Tafelkreide aufrecht in einen mit etwas Chlorophylllösung gefüllten Becher. Die grüne Lösung steigt in der Kreide auf, die roten und gelben Carotinoide steigen etwas höher als das Chlorophyll und bilden feine Farbränder.

### Papierchromatographie

Durchbohre einen Rundfilter in der Mitte und stecke einen langen Filterstreifen als Docht durch das Loch. Lasse den Docht unten in ein mit Wasser gefülltes Reagenzglas eintauchen. Male mit einem wasser-löslichen Filzstift einige Ringe auf den Rundfilter. Das Wasser (Laufmittel) steigt am Docht hoch in den Rundfilter und löst die Farbringe auf. Die unterschiedliche Laufgeschwindigkeit des im Filzstift enthaltenen Farbgemisches führt zu einer Auftrennung der Farben. Einfacher noch kann man einen Strich auf einen Streifen Filterpapier zeichnen und den unteren Rand des Papiers ins Wasser tauchen.



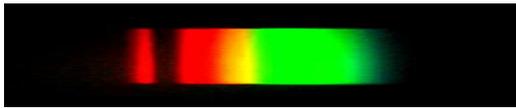
## Spektroskopische Untersuchung der Absorptionseigenschaften von Chlorophyll



Mit einem Handspektroskop\* oder dem CD-Spektroskop lässt sich das Absorptionsverhalten der Chlorophylllösung untersuchen. Dazu gibt man die tiefgrüne Lösung in eine Küvette und bestrahlt den so entstandenen grünen Farbfilter mit einem Diaprojektor oder einer anderen möglichst hellen und weißen Lichtquelle. Ersatzweise lassen sich auch kräftige Halogenleuchten (Baustellenstrahler) verwenden. Weniger geeignet sind normale Glühlampen da deren Blauanteil in der Regel zu gering ist.

Besonders gut gelingt die Analyse, wenn es gelingt Sonnenlicht in den Versuchsaufbau einzuspiegeln. Der Spiegel muss bei längerer Beobachtung wegen der Erddrehung allerdings nachgeführt werden.

- Beobachte das Spektrum des Lichts ohne Filter
- Beobachte das Spektrum des Lichts mit Filter



Als Ergebnis zeigt sich, dass die Chlorophylllösung den blauen Spektralanteil fast vollständig auslöscht. Je weißer die

Lichtquelle, je höher also ihr Blauanteil ist, desto deutlicher wird das. In unmittelbarer Nähe des dunkelroten Endes zeigt sich ein dunkler Balken.

Der Spalt des Spektroskops sollte bei der Analyse so weit wie möglich verengt werden. Dadurch sinkt die Lichtintensität und erhöht sich das Auflösungsvermögen.

### Untersuchung mit einem Luxmeter\*

Durchleuchte die mit klarem Wasser gefüllte Küvette\* mit einer weißen Projektionsleuchte und messe die Helligkeit mit einem Luxmeter. Bringe dann jeweils einen blauen, grünen und roten Farbfilter in den Strahlengang und notiere die Messwerte. Ersetze das Wasser in der Küvette durch Chlorophylllösung und wiederhole die Messungen.

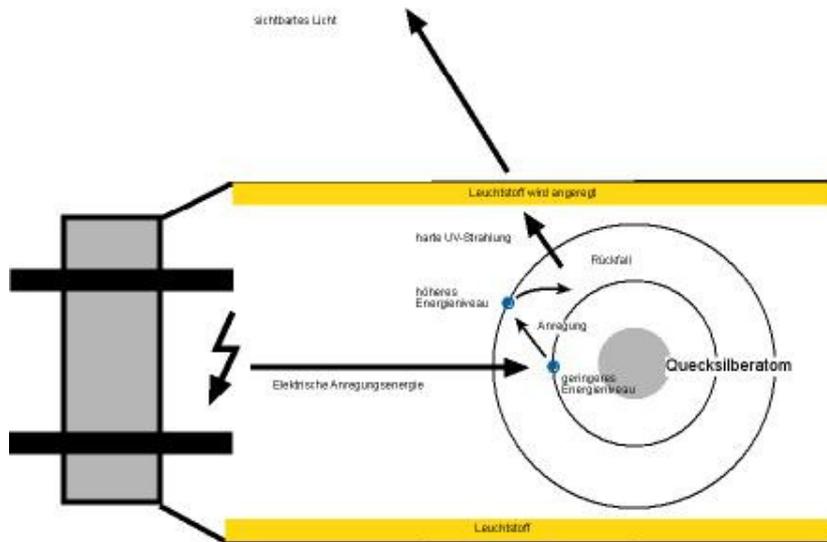
Die anschließende Auswertung zeigt, dass Chlorophyll vor allem das blaue und das rote Licht absorbiert. Das grüne Licht passiert die Lösung nahezu ungehindert.

### Untersuchung mit Hilfe einer Energiesparleuchte

Als Alternative zu diesem Versuchsaufbau empfehlen wir die Verwendung einer Energiesparleuchte. Sie erzeugt kein kontinuierliches, sondern ein Linienspektrum, im sichtbaren Bereich vier deutliche Banden: Rot, gelb, grün und violett.

Es bietet sich an, an dieser etwas näher auf die Physik einer Leuchtstoffröhre einzugehen, weil dadurch später auch die durch UV-Licht hervorgerufene Fluoreszenz besser erklärt werden kann.

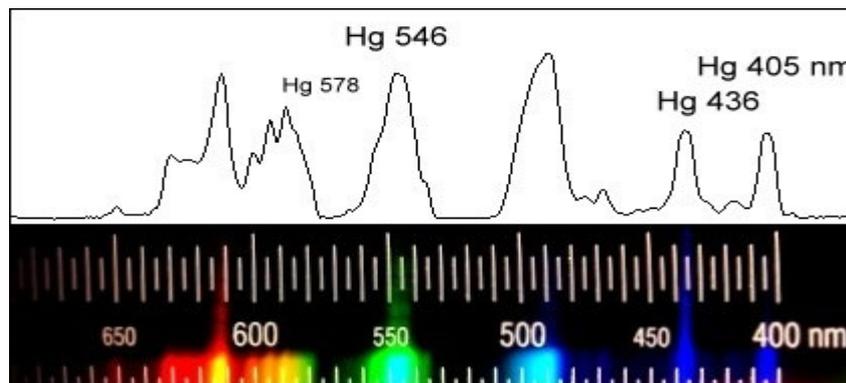
Leuchtstoffröhren sind **Quecksilberdampflampen**. Sie heißen Energiesparleuchten weil die elektrische Energie mit einem viel höheren Wirkungsgrad in Licht umwandeln als herkömmliche Glühlampen mit Wolframglühwendeln, deren Wellenlängenmaximum zwar im sichtbaren Bereich (gelb) liegt, die aber aufgrund der Asymmetrie des Emissionsspektrums etwa 90% der Energie in Form als unsichtbare Wärmestrahlung abgeben.



Die Leuchtstoffröhre enthält Quecksilberdampf der durch elektrische Spannungen zum Leuchten gebracht wird. Dabei werden bestimmte Elektronen der Quecksilberatome angeregt, das heißt unter Energieaufnahme auf ein höheres Energieniveau gehoben. Die Elektronen fallen unter Abgabe eines Quants elektromagnetischer Strahlung zurück

auf ihr ursprüngliches Niveau. Die Wellenlänge der Strahlung resultiert aus der Differenz der Energieniveaus. Diese Energieniveaus sind elementtypisch. Das führt zum Beispiel dazu, dass die gelben zur Straßenbeleuchtung verwendeten Natriumdampflampen nur auf zwei bestimmten nahe beieinander liegenden Wellenlängen strahlen, den D-Linien.

Die Emissionsbanden von Quecksilberdampf (Hg) zeigt folgende Abbildung:



Die Leuchtstoffröhre ist auf der Innenseite mit einem Leuchtstoff beschichtet, der die harte UV-Strahlung in sichtbares, für das Auge „warmes“ Licht verwandelt.

Tritt das Licht einer Leuchtstoffröhre durch

Chlorophylllösung, wird die violette Emissionslinie komplett und die rote recht stark absorbiert. Die gelbe und die grüne bleiben erhalten.

### Messungen mit dem Photometer\*



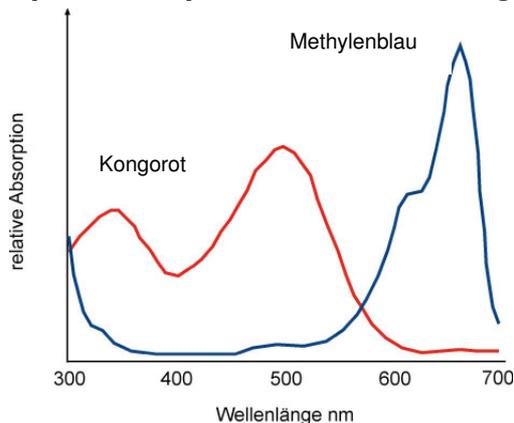
Eine weitere Möglichkeit der Messung ist der Einsatz eines Photometers. Das Photometer wird normalerweise zur Messung der Konzentration chemischer Substanzen in Flüssigkeiten verwendet. Dabei wird die zu prüfende Substanz chemisch behandelt und färbt sich je nach Konzentration unterschiedlich stark. Anschließend wird die Lösung Licht unterschiedlicher Wellenlänge ausgesetzt. Dabei wird Licht absorbiert („verschluckt“). Es zeigt sich ein je nach untersuchter Substanz und Konzentration typisches Absorptionsmuster.

Einfache Photometer\* durchstrahlen die Prüflösung mit drei oder vier verschiedenen Wellenlängen, z.B.

- Blau 480 nm, Grün 565 nm, Gelb 585 nm, Rot 635 nm

Wird Chlorophylllösung in die durch eine Kappe verdunkelte Messküvette gegeben zeigt sich eine starke Auslöschung (Extinktion) im Blauen und Roten, das grüne und gelbe Licht dagegen wird kaum beeinflusst. Der Vorteil des Photometers ist, dass es quantitative Aussagen ermöglicht.

### Spektroskopische Untersuchung anderer Farblösungen



Zum Vergleich mit Chlorophyll eignen sich zum Beispiel Methylblau, Kongo- oder Neutralrot und schwarze Tusche. Methylblau-Lösung absorbiert den roten Bereich nahezu vollständig, gelöstes Kongo-/Neutralrotpulver zeigt, dass es nur blau völlig undurchlässig ist. Schwarze Tusche reduziert die Gesamthelligkeit des sonst nicht veränderten Spektrums.

### Euglena, ein „Arbeitspferd“ für Photosyntheseexperimente

Die einzellige Grünalge Euglena\* bewegt sich mit Hilfe einer peitschenartigen Geißel durch das oft dann grün gefärbte Wasser von Pfützen oder kleinen Tümpeln. Euglena wird als Reinkultur im Schulbiologiezentrum gehalten und ist dort auf Vorbestellung erhältlich.

Detaillierte Angaben finden Sie in unserer Arbeitshilfe 15.20 „Euglena“



Die Aufzucht ist denkbar einfach: Es reicht, eine kleine Handvoll Gartenerde in ein hitzefestes Glasgefäß (z.B. Erlenmeyerkolben) zu geben und mit einem Liter destillierten oder demineralisierten Wasser aufzufüllen. Das Gefäß wird mit Alufolie verschlossen der Ansatz in einem Dampfdrucktopf etwa eine halbe Stunde sterilisiert. Die so gewonnene Erdbekochung wird stehen gelassen bis sie Zimmertemperatur angenommen hat. Dabei

setzen sich die schwereren Erdbestandteile am Boden ab. Gießen Sie den Überstand zweimal durch einen Kaffeefilter. Jetzt kann die Erdbekochung mit Euglena beimpft werden.

Um Euglena mit dem von ihr nicht selbst produzierten aber notwendigen Vitamin B12 zu versorgen wird noch ein erbsengroßes Stück Hartkäse (z.B. Parmesan oder Reggiano) hinzugegeben.



Stellen Sie das Zuchtgefäß an einen hellen, aber nicht der direkten Sonne ausgesetzten Ort. Nach wenigen Tagen beginnt sich die bräunlich trübe Erdabkochung grün zu färben. Dabei reichern sich die ja beweglichen Euglenen an der hellen Seite des Gefäßes an.

### **Euglena kann schreiben...**

Euglena sucht das zur Photosynthese notwendige Licht aktiv auf („Phototaxis“). Das klassische Experiment, bei dem Euglena „schreibt“ besteht aus einer mit den Einzellern gefüllten und mit einer dunklen Maske versehenen Küvette. Diese Maske kann aus dünnem Sperrholz hergestellt werden. In die Vorderseite wird das Wort „EUGLENA“ oder einfach nur ein „E“ als Reihe von Löchern gebohrt. Nach etwa einem Tag haben sich die Euglenen hinter den Löchern versammelt. Wenn Sie den Versuch mehrere Tage stehen lassen, wird ein Teil der Euglenen das Chlorophyll verlieren und zu heterotropher Ernährung übergehen.

### **Euglena kann Farben sehen**

In Abwandlung dieses Experiments lässt sich auch das Farbsehvermögen des „Augentierchens“ Euglena testen.



Dazu bohren Sie in die Vorderseite einer aus Pappe oder Holz gefertigten Maske drei Löcher und hinterkleben diese mit Farbfolien. Die Farbechtheit der Folien sollte zuvor mit dem Spektroskop\* überprüft werden. Ideal wäre, wenn die rote Folie tatsächlich nur rotes Licht passieren ließe und alle anderen Bestandteile des Sonnenlichts absorbiert würde. Folien für Disco- oder Bühnenscheinwerfer erfüllen meist diese Anforderung.

Wir haben die Maske zunächst mit einem roten, gelben, grünen und blauen Fenster versehen. Das grüne Fenster wurde vollständig ignoriert, während sich die meisten Euglenen sich hinter dem blauen und nur wenige hinter dem roten Fenster ansammelten. Auch Gelb wirkt anziehend, was allerdings daran lag, dass die von uns verwendete Folie einen erheblichen Rotanteil hindurch ließ. Der abgebildete Versuchsaufbau enthält nur noch drei Fenster (rot, grün, blau). Achten Sie auf den rechts oben hinter dem blauen Fenster entstandenen grünen Fleck!

## Farbfilter aus Farblösungen selbst hergestellt

Farbfilter lassen sich selbst herstellen. Dazu kann man mit verschiedenen Farbpigmenten (z.B. Kongorot), fertigen Farblösungen (z.B. Methylenblau) oder aus Lebensmittelfarben Lösungen experimentieren. Auch sie sollten spektroskopisch auf Farbechtheit geprüft werden damit man weiß, welche Bereiche hindurchgelassen werden.

Die Lösungen werden in Petrischalen mit einem Deckel als Verdunstungsschutz gegeben. Sie passen auf kleine Blumentöpfe in denen zum Beispiel Kresse oder andere kleinsamige und schnell keimende Pflanzen ausgesät werden. Weniger geeignet sind Pflanzen mit relativ großen Nährvorrats im Samen..

Viele dieser Farblösungen sind allerdings nicht lichtecht oder ihre Farbpigmente flocken aus und müssen immer wieder aufgerührt werden.

Wer den Aufwand scheut kann natürlich auch die bereits genannten – lichtechten - Farbfolien für Disco- und Bühnenscheinwerfer benutzen.

## Fluoreszenz



Wenn die grüne Chlorophylllösung mit UV-Licht bestrahlt wird, leuchtet sie tiefrot. Dazu kann man einen UV-A Gesichtsbräuner\* oder eine Prüfleuchte\* für Geldscheine verwenden. Die Kappe eines Textmarkers oder ein „selbst leuchtender Stern“ leuchtet im UV-Licht hell auf, auch damit im Text unterstrichenen Stellen. Weiße Hemden, die fluoreszierende so genannte „Weißmacher“ enthalten leuchten hell bläulich. Zifferblätter von Armbanduhren zeigen Phosphoreszenz, sie glühen noch eine Zeit lang nach.

Manchmal kann auch beim Chlorophyll nach Abschalten des UV-Strahlers im Dunkeln noch ein „Nachglühen“ beobachten.

Die Chlorophylllösung wird auf die übliche Weise mit warmem Brennspritus hergestellt, in einen Kolben gefüllt und dunkel aufgestellt.

Der Versuch gelingt auch mit einem lichtstarken **Diaprojektor** mit hinreichend hohem Blauanteil.

Das rote Fluoreszenzlicht entsteht, wenn das Chlorophyllmolekül durch energiereiche („harte“) UV-Strahlung angeregt wird. Dabei werden Elektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben. Dieser Zustand ist nicht stabil. Beim Zurückfallen in den „Normalzustand“ wird ein Teil der aufgenommenen Energie als langwelliges Rotlicht abgestrahlt dessen Wellenlänge der Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen entspricht.

Lebende grüne Pflanzen fluoreszieren nicht. Die in organische Strukturen eingebundenen Chlorophyllmoleküle geben die angeregten Elektronen auf so genannte Elektronentransportketten (Redoxsysteme). Sie leiten die Dissoziation von Wassermolekülen ein, die Spaltung in Wasser- und Sauerstoff (Hydrolyse).

## Energie aus Sonne und Wasser

Nahezu alles Leben auf der Erde erklärt sich - energetisch gesehen – aus der Energiedifferenz zwischen Wasserstoff und Sauerstoff. Einige materialistisch orientierte Naturphilosophen bezeichnen das Leben eine hoch organisierte Knallgasreaktion.

Da auch viele technische Einrichtungen, z.B. Autos, ihre Energie daraus gewinnen, dass im Treibstoff enthaltener Wasserstoff mit dem aus der Luft stammenden Sauerstoff verbunden wird und, im Falle des Autos als Wasser aus dem Auspuff tropft oder bei Flugzeugen als Kondensstreifen sichtbar wird, sollte der Hydrolyse und der Knallgasreaktion ein eigener Abschnitt gewidmet werden.

### Hydrolyse

Ein Solarmodul, bestehend aus vielen Solarzellen, liefert Gleichstrom der zur Hydrolyse verwendet werden kann. Dazu bedarf es lediglich zweier getrennt angeordneter Elektroden aus einem reaktionsträgen Edelmetall (Platin) und Wasser, dass zur Erhöhung der Leitfähigkeit mit einigen Tropfen verdünnter Schwefelsäure angereichert wird.

Schon wenn man zwei an den positiven und negativen Gleichstromausgang eines Netzgerätes\* angeschlossene Stecker ins Wasser taucht sieht man Bläschen aufsteigen. Mit steigender Spannung nimmt ihre Zahl zu.

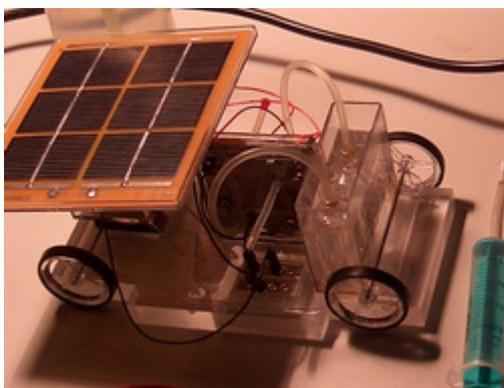
Mit dem „Hoffmannschen Wasserzersetzungsgesetz“ lässt sich der Vorgang genauer untersuchen, zumal die mit Skalen versehenen Auffanggefäße eine Quantifizierung des Prozesses ermöglichen und die Elektroden aus korrosionsfestem Platin bestehen. Im Schulbiologiezentrum Hannover kann das elektrische Energie liefernde „Muskelkraftwerk“ – ein umgebauter Heimtrainer – direkt an das Hydrolysegerät angeschlossen werden. Damit wird auch körperlich erfahrbar wie viel Energie zur Erzeugung der für die spätere Knallgasreaktion notwendigen Gase nötig ist.

### Knallgasreaktion

Die bei der Hydrolyse entstandenen Gase werden nacheinander mit dem Kolbenprober über Gummischläuche abgezogen. Wir empfehlen, zunächst den Sauerstoff, dann erst den leichter flüchtigen Wasserstoff abzuziehen.

Das Gasgemisch wird in eine mit Wasser und etwas Spülmittel versehene flache Schale gegeben. Die Blasen werden mittels eines langen Stabes, an dessen Ende sich ein mit Knetmasse befestigtes Streichholz befindet, zur Explosion gebracht. Dabei sollten alle Umstehenden zum Druckausgleich zwischen Mittelohr und Mundraum den Mund weit aufmachen! Am besten sagen alle staunend „Aaah“!

### Brennstoffzellentechnik



Die Brennstoffzelle spaltet unter elektrischem Energieeinsatz Wasser und nutzt den entstandenen Wasser- und Sauerstoff um daraus elektrischen Strom zu machen. Der Vorteil ist, dass die beiden umweltfreundlichen und relativ ungefährlichen Gase als Energieträger bis zu ihrer Nutzung zwischengespeichert werden können.

Ein von einer Brennstoffzelle betriebenes Modellauto (Schul-LAB IGS Mühlenberg) macht die Technik deutlich: Ein auf dem Modell

angebrachtes Solarmodul erzeugt in der Sonne Gleichstrom, der in der Brennstoffzelle zur Hydrolyse des Wassers verwendet wird. Die beiden, unterschiedlich großen Tanks füllen sich mit Wasserstoff bzw. Sauerstoff im Verhältnis 2:1. Sobald der Motor mit der Brennstoffzelle verbunden wird beginnt diese, die beiden Gase wieder zu Wasser zu vereinen. Dabei entsteht der zum Antrieb des Motors nötige Strom.

Die mit einem Solarmodul verbundene Brennstoffzelle stellt eine ideale Analogie zu den energetischen Prozessen in lebenden Systemen dar: In den Blättern (Solarmodul!) wird durch die Photosynthese (Brennstoffzelle) Wasser (im System) in Wasserstoff (großer Tank) und Sauerstoff (kleiner Tank) getrennt. Der Sauerstoff wird von der Pflanze über die Spaltöffnungen, anders als bei der Brennstoffzellentechnik (!) abgegeben. Bei der Dissimilation (Atmung) werden der Wasser- und der Sauerstoff wieder zu Wasser vereinigt. Die Brennstoffzelle nimmt dafür die in den Tank gespeicherten Gase, bei der Atmung muss Sauerstoff von außen ins System eingeführt werden (Spaltöffnungen). Für Konsumenten (Bakterien, Pilze, Tiere) gilt nur der zweite Teil der Analogie, sie sind auf die Treibstoffherzeugung der Produzenten (Pflanzen) angewiesen.

## Abfallprodukt Sauerstoff

### Künstliche Biosphären

Im Schulbiologiezentrum Hannover steht seit 1995 ein luftdicht verschlossenes Terrarium in dem ein kleiner „Urwald“ aus Tradescantien wuchert. Herabfallende Tropfen am Glasdeckel weisen darauf hin, dass das zu Beginn eingefüllte Wasser im Terrarium einen ständigen Kreislauf von Verdunsten und Kondensation durchläuft. Das Wasser kann ja nicht heraus. Die Frage nach einem möglichen Erstickungstod der Pflanzen stellt sich allerdings den wenigsten spontan werden doch Pflanzen in erster Linie als Sauerstoffproduzenten wahrgenommen.

Wir haben manchmal im Unterricht eine brennende Kerze und dann - unter heftigen Schülerprotesten - eine Maus in ein großes Marmeladenglas gesetzt, es fest zugeschraubt und die Maus natürlich lange, bevor sie irgendwelchen Schaden hätte nehmen können wieder herausgenommen. Dieser Impuls eignet sich gut zum Einstieg in die Frage, wie viel „Luft“ (Sauerstoff) ein Lebewesen eigentlich braucht und wie man das feststellen kann.



In einem zweiten „Regenwald“ halten wir, ebenfalls unter Luftabschluss ein Tier, einen in den Tropen beheimateten Schnurfüßer (Ein „Tausendfüßer“ mit etwa 280 Beinen). Er ernährt sich von den Wurzeln und welken Blättern der Pflanzen sowie von organischem Material im Boden. Sein hinter den Glasscheiben zu beobachtendes normales Wachstum deutet darauf hin, dass ihm offenbar an nichts fehlt. Sein Sauerstoffbedarf wird gering sein, er ist wechselwarm, sein Grundumsatz ist gering und er

bewegt sich nur langsam. Spätestens hier stellt sich die Frage, welchen Regeln diese Koexistenz unterworfen ist.

### Leben zwischen Himmel und Erde

Das Leben auf der Erde findet in einer dünnen Schicht zwischen dem Erdboden und dem Weltall statt. Schon in 10 km Höhe ist diese Lufthülle bereits so dünn und so kalt, dass menschliches Leben ohne die Sauerstoffflasche nicht mehr möglich ist. Nimm einen Globus zur Hand und überlege, wie dick die Lufthülle wäre...

Wie hoch sind die Alpen? Beschreibe mit dem Finger den Weg eines Flugzeuges von Deutschland nach Australien...

Die Lufthülle ist selbst auf einem großen Globus nur so dick wie ein Blatt Papier.

Um das herauszufinden kann man entweder den Äquatorumfang des Globus oder einen bekannten Abstand (z.B. Köln – Berlin) ausmessen und in einen Maßstab umrechnen.

### **Sauerstoffproduktion bei der Wasserpest Elodea**

Die Wasserpest (*Elodea canadensis*) erzeugt unter bestimmten Bedingungen Sauerstoff, die unter einer Assimilationsglocke\* als auszählbare Bläschen im Wasser aufsteigen. Zu diesen Bedingungen zählen: Eine helle weiße Lichtquelle (Sonne, Tageslicht- oder Diaprojektor), Raumtemperatur und mit etwas CO<sub>2</sub> angereichertes Wasser. CO<sub>2</sub> kann durch schwach kohlenstoffhaltiges Mineralwasser hinzugefügt werden was allerdings zu Interpretationsproblemen führt: Auch am Gefäßrand entstehen Bläschen die unzweifelhaft keinen Sauerstoff enthalten. Bestehen die an der Pflanze aufsteigenden Bläschen aus Sauerstoff oder aus CO<sub>2</sub>?

Man kann dem Wasser auch etwas Natriumbicarbonat hinzugeben. Nachteilig ist hier, dass erst einmal geklärt werden muss, wie dieser Stoff im Wasser CO<sub>2</sub> abzugeben vermag. Besser ist es, das CO<sub>2</sub> vorsichtig mit einem Trinkhalm „hineinzublubbern“, das vorzugsweise nachdem die ausgeatmete Luft mit dem Kalkwassertest auf CO<sub>2</sub> getestet wurde. Dadurch wird der Schüler auch persönlich – pädagogisch sinnvoll – in den ökologischen Gesamtzusammenhang einbezogen: Wir leben von den Pflanzen und geben ihnen etwas zurück.

Ohne CO<sub>2</sub>, zum Beispiel in abgekochtem und bis zu Versuchsbeginn verschlossenen Wasser gibt *Elodea* keine Bläschen ab.

### **Photosynthese in blauem, grünem und rotem Licht**

Im Dunklen hört *Elodea* auf, Sauerstoff zu produzieren, ein klarer Hinweis auf den photosynthetischen Ursprung der Bläschen. CO<sub>2</sub> und schon vorher im Wasser gelöste Luft dagegen wird auch im Dunklen ausgeföhlt.

Wird *Elodea* mit blauem oder rotem Licht bestrahlt, erzeugt sie Sauerstoff, wenn auch im geringeren Maße. Bei grünem Licht hingegen passiert nichts.

### **Sauerstoffnachweis mit der Glimmspanprobe**

Der klassische Sauerstoffnachweis bei dem das sich unter der Assimilationsglocke ansammelnde Gas zum Aufflammen eines glühenden Holzspans führt ist in Unterrichtsfilmen besser zu sehen als in der Praxis. Das im Laufe einer Unterrichtsstunde unter einer Assimilationsglocke erzeugte O<sub>2</sub>-Volumen ist gering und die Flamme ist kaum geeignet wirklich zu überzeugen.

### **Sauerstoffnachweis mit dem „Blauen Wunder“**

Sehr überzeugend dagegen fällt der Nachweis mit dem durch Methylenblau ausgelösten „Blauen Wunder“ aus. Das „Blaue Wunder“ ist eine chemische Reaktion, bei der eine farblose Lösung im Reagenzglas blau wird und sich nach einiger Zeit wieder entföhrt.

Erforderlich sind: Eine Assimilationsglocke, Wasserpest, Methylenblau-Lösung, Natronlauge (aus Natriumhydroxid\* und destilliertem Wasser), Traubenzucker aus dem Supermarkt, Reagenzgläser mit Stopfen, ein Kolbenprober, ersatzweise eine Einwegspritze und eine Schlauchverbindung zur Assimilationsglocke.



Die gering konzentrierte Methylenblau\*-Lösung wird im Reagenzglas mit dem doppelten Volumen gesättigter Traubenzuckerlösung vermischt. Es wird so viel Natronlauge dazugetrofft bis das blaue Lösungsgemisch farblos wird. Das Methylenblau geht dabei in die transparente Leukoform über. Durch Schütteln des mit einem Stopfen versehenen Reagenzglases wird die Lösung wieder blau. Der im Reagenzglas verbleibende Sauerstoff reagiert mit Leuko-Methylen zum

blauen Methylenblau. Nach kurzer Zeit verwandelt sich das Methylenblau wieder zurück zum Leuko-Methylen. Der Vorgang kann unter Umständen so lange wiederholt werden bis die Lösung durch Oxidation gelb wird.

Wird das von Elodea unter der Assimilationsglocke erzeugte Gas mit dem Kolbenprober abgezogen und in das farblos gemachte „Blaue Wunder“ gegeben färbt es sich schlagartig blau um.

Diesen Versuch können die Schüler unter Schutzvorkehrungen (Schutzbrille!) selbst durchführen.

### **Sauerstoffnachweis mit Indigokarmin\* und Natriumdithionit\***

Ein Zweig Elodea wird in ein gut verschließbares Becherglas mit abgestandenem Wasser gegeben. Gib 20 ml schwach konzentrierte Indigokarminlösung\* dazu und entfärbe sie durch tropfenweise Zugabe von 2,5%iger Natriumdithionit\*-Lösung. Beleuchte den Ansatz.

Indigokarmin kann in einer tiefblauen oxidierten und in einer blassgelben reduzierten Leuko-Form auftreten. Durch Zugabe von Natriumdithionit wird dem Indigokarmin Sauerstoff entrissen. Eine in diesem Lösungsgemisch photosynthetisch aktive Pflanze führt dem Leuko-Indigokarmin Sauerstoff zu worauf dieses wieder in den oxidierten blauen Zustand übergeht. Idealerweise ziehen dann blaue Schwaden um die Pflanze herum. Dieser aus Unterrichtsfilmen bekannte Versuch ist in der Praxis schwierig offenbar weil der pH-Wert stark verändert wird.

### **Elektrochemischer Nachweis mit dem Sauerstoffmessgerät**

Das Schulbiologiezentrum Hannover leiht Ihnen auf Vorbestellung ein Sauerstoffmessgerät mit digitaler Anzeige aus, das den  $O_2$ -Gehalt des Wassers elektrochemisch erfasst. Die Anzeige erfolgt in ppm (parts per million) oder mg pro Liter Wasser. Das Gerät erfasst auch die Temperatur, was die Ermittlung des maximalen  $O_2$ -Gehalts (Saturation) vor Ort erleichtert. Da der Sauerstoffgehalt luftdruckabhängig ist enthält der Gerätesatz zusätzlich ein Barometer.

# Chemisch gebundene Energie

## „Solenergix“ – Enthalten Kartoffeln Sprengstoff?



Dem in Brötchen, in der Pizza oder in Kartoffeln versteckten Sonnenlicht kommt man durch folgende, ganz bewusst etwas geheimnisvoll inszenierte Mehlstaubexplosion auf die Spur. Das Wort „Mehl“ sollte allerdings zunächst nicht fallen!

Die den Schülern unbekanntes weiße Substanz wird Anlass zu vielerlei Spekulationen geben, besonders wenn Sie – ohne viel Worte zu verlieren – so vorgehen:

Schütten Sie das möglichst feine und trockene weiße Pulver auf eine flache Unterlage und schieben sie es mit einer Rasierklinge zu einem Damm zusammen. Nehmen Sie einen Trinkhalm zur Hand und blasen Sie damit das Pulver in die Flamme eines Gasbrenners. Wenn das Mehl

trocken ist werden Sie mit etwas Übung eine meterhohe Stichflamme erzeugen.

Daran werden sich Ihre Schüler noch nach Jahren erinnern!

Kaum jemand kommt spontan auf „Mehl“. Wir haben den Stoff SOL-ENERGIX® genannt und als Lieferquelle den nächsten Supermarkt angegeben...

Der „Sprengstoff“ fällt auch als Abfallprodukt bei der Kartoffelpufferherstellung an, muss aber gut getrocknet und fein gesiebt werden.

Der bei der Verbrennung auftretende Geruch nach frischen Brötchen allerdings ist deutlich.

An die Mehlstaubexplosion sollte sich natürlich die Untersuchung der Quelle des „weißen Pulvers“ anschließen. Dazu werden gequollene und im Naturzustand belassene Getreidekörner aufgeschnitten und mit verdünnter Lugolscher Lösung\* (Jod-Kaliumjodid-Lösung) behandelt. Die Amyloplasten (Stärkeköerner) färben sich damit tiefviolett (Stärkenachweis).

## Alkohol aus Getreide- oder Kartoffelstärke

Wenn Sie Mehl mit Wasser und etwas Bäckerhefe versetzen, die Mischung in Reagenzgläser geben und diese verkorken treibt das bei der Gärung entstehende CO<sub>2</sub> den Korken nach einiger Zeit explosionsartig heraus. Diese „Hefekanone“, bei der das in die Photosynthese investierte Kohlenstoffdioxid wieder frei wird ist für sich genommen schon ein guter Einstieg der zu Hause sicher viele Nachahmer findet. Ein weiteres Gärungsprodukt ist der Alkohol der im Zuge einer einfachen Destillation konzentriert und abgefackelt werden kann. Vom Probieren raten wir jedoch explizit ab, denn die Siedepunkte von Ethyl und Methylalkohol mit 78,4 °C bzw. 63,5 °C liegen nicht weit genug auseinander um mit diesen einfachen Mitteln sicher getrennt zu werden.

Einem mit einer reifen und nach Bier riechenden Hefelösung gefüllten Glasgefäß wird ein etwa 1,5 m langer Glasstab aufgesetzt. Dann wird das Gefäß auf ein Dreibein über einen gut regulierbaren Gasbrenner gestellt. Aus der erhitzten Hefelösung steigen zunächst die Alkohole auf, zunächst das Methanol, dann das Ethanol, später folgt bei Temperaturen um 100 °C der Wasserdampf. Alkohole und Wasserdampf sind optisch gut voneinander zu unterscheiden: Bei der Kondensation im Glasrohr rinnen die Alkohole flächig herab ohne vorher Tropfen zu bilden. Die Kohäsion der Wassermoleküle dagegen führt zur Tropfenbildung und zum Herabfließen in dünnen Rinnsalen.

Das Auskondensieren der Alkohole und des Wassers erfolgt in verschiedenen Abschnitten des Glasrohrs, im Idealfall fällt der Wasserdampf schon im mittleren Bereich aus weil die Temperaturen schon dort die 100 °C Marke unterschreiten. Es folgt nach oben hin der Ethylalkohol, dann der Methylalkohol. Dieses Idealverhältnis kann mit etwas Geschick über den Gasbrenner eingestellt werden.

Wird die Temperatur so hoch eingestellt, dass der Alkohol das Glasrohr in gasförmiger Phase verlässt kann er dort abgefackelt werden.

Dieser Versuch bietet sich besonders an, wenn das Thema Biosprit für Autos ansteht. Mehr dazu in unserer Arbeitshilfe 19.37 „Vom Korn zum Bier“

### **Stärkenachweis in Elodea**

Die Stärkebildung im Licht kann mit Elodea unter dem Mikroskop gezeigt werden. Abgedunkelt bzw. im Licht gehaltene Wasserpestzweige werden kurz in kochendes Wasser gelegt. Dadurch werden die Zellwände zerstört und das Zellinnere für die nachfolgende Behandlung aufgeschlossen: Warmer Brennspiritus bleicht die Chloroplasten aus die die Amyloplasten sonst überdecken würden. Verdünnte Lugolsche Lösung\* (Jod-Kaliumjodid-Lösung) färbt die Amyloplasten tiefviolett. Das wird besonders dort deutlich wo Elodeablättchen quer durchgerissen wurden. An den Risskanten dringt die Lugolsche Lösung besonders gut ein. Die im Licht gehaltene Elodea zeigt blaue Stärkekörner, die vorher im Dunklen stehende nicht.

### **Stärkenachweis mit anderen Blättern**

Die bei der Chlorophyllgewinnung (siehe dort) ausgebleichten Blätter kann man ohne weitere Behandlung in Lugolsche Lösung legen, worauf sie sich – abhängig vom Grad der vorhergehenden Assimilation - blau färben. Gut geeignet sind zum Beispiel Buchenblätter oder die Blätter der Zimmerlinde.

Wenn man auf den Blättern vorher mit Büroklammern schwarze Streifen oder farbige Folienstücke befestigt sind deutliche Unterschiede in der Blaufärbung zu beobachten. So zeigt sich, dass im Grünlicht keine Stärkebildung erfolgt. Die Filter sollten vorher mit dem Spektroskop auf Farbechtheit geprüft werden.

Teilweise chlorophylllose, „panaschierte“ Blätter liefern den Beweis, dass die Stärkebildung an den grünen Blattfarbstoff gebunden ist. Hierzu sind zum Beispiel Buntnesseln (Solenostemon) gut geeignet.

Durch das Einlegen in Alkohol (Brennspiritus) wird dem Blatt viel Wasser entzogen und es wird schrumpelig. Das lässt sich durch Wässern und anschließendes Pressen zwischen Zeitungspapier rückgängig machen. Das in den Stärkemolekülen eingeschlossene Jodkaliumjodid bleibt davon kaum berührt.

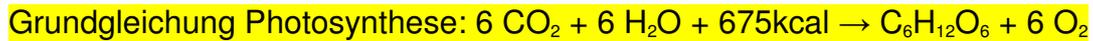
## **Überlegungen zur Energieeffizienz:**

### **Wirkungsgrad von Photosynthese und Solarzelle**

Wie viel Sonne vermag eine Pflanze einzufangen? Die im Kurs „Experimente zur Photosynthese“ mehrfach aufgeworfene Frage nach dem Wirkungsgrad der Photosynthese ist eine in der Schule experimentell kaum zu lösende Aufgabe. Hier wird man sich in erster Linie mit „nackten“ Zahlen, etwas Quantenphysik und einer Menge Rechnerei begnügen müssen.

Etwa 20% der Energie des vom Chlorophyll eingefangenen blauen Lichtes (400 nm) und etwa 35% des roten Lichts (700 nm) werden in Form von Glucose gebunden.

Diese Zahlen lassen sich aus folgender Überlegung herleiten: Zur Bildung von 1 mol Glucose müssen 675 kcal investiert werden.



Die veraltete Einheit „Kalorie“ sei nur deshalb genannt, weil sie Millionen von Lernenden (und viele der heutigen Lehrern) in der Schule auswendig gelernt haben, ohne – wie in meinem Falle – damit irgendetwas Bekanntes, Sinnvolles oder Nützlichendes verbinden zu können. Die heute gültige Maßeinheit Joule (J) erhält man durch Multiplikation mit 4,21. Aus 675 kcal wird 2842 kJ.

Ein Molekül Glucose ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) besteht aus

6 Kohlenstoffatomen	relative Atommasse 12,0107 x	6 =	72,0642
12 Wasserstoffatomen	relative Atommasse 1,00794 x	12 =	12,0953
6 Sauerstoffatomen	relative Atommasse 15,9994 x	6 =	95,9964
Summe	relative Molekülmasse		180,1559

1 Mol Glucose, was heißt das? „Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht wie 0,012 kg des Kohlenstoffnuklids  $\text{C}^{12}$ “ heißt es im Normblatt DIN 1301 von 1971. Und: Das Mol enthält  $6,0221353 \cdot 10^{23}$  solcher elementaren Einheiten (AVOGRADOSche oder LOSCHMIDTsche Zahl).

In einem Mol Glucose sind also über  $6 \cdot 10^{23}$  Teilchen enthalten. Das Molgewicht (besser Molmasse!) beträgt 180,16 g/mol. Der Zahlenwert ist identisch mit der oben aufsummierten Molekülmasse.

Ein Quant (Photon) des blauen Lichts mit der Wellenlänge von 400 nm trägt ein winziges Energiepaket von  $4,97 \cdot 10^{-19}$  Joule, ein Quant (Photon) rotes Licht mit 700 nm  $2,84 \cdot 10^{-19}$  Joule. Diese Beträge kann man Büchern entnehmen oder selbst berechnen.

Der Energiegehalt eines Quants ist wellenlängenabhängig nach der Formel

$$E = h \cdot \nu$$

E ist der Energiegehalt in Joule,  $\nu$  (ny) ist die Frequenz in Hz und h das Planck'sche Wirkungsquantum mit dem Wert  $6,626176 \cdot 10^{-34}$  Js. Die Frequenz  $\nu$  ist der Quotient aus der Vakuumlichtgeschwindigkeit c ( $2,997925 \cdot 10^8$  m/s), und der Wellenlänge  $\lambda$  (Lambda). Im Ergebnis liefert selbst die „harte“ UV-Strahlung so geringe Werte, dass man auf den ersten Blick geneigt ist, sie als nichtig abzutun.

Zur Synthese eines Moleküls Glucose werden in den Photosystemen I und II 48 Lichtquanten absorbiert und lösen dort jeweils einen „Elektronensprung“ aus. Aber auch die Multiplikation mit 48 erhöht die geringen Energiebeträge nicht wesentlich. Wenn man aber die unvorstellbar große Zahl der in einem Mol eines Stoffes enthaltenen Teilchen ins Auge fasst ergeben sich schon ganz beachtliche Werte.  $48 \times 6 \cdot 10^{23}$  in einem Mol angeregte Elektronen stehen jetzt 14304 kJ/mol (bei 400 nm) bzw. 8064 kJ (700 nm) Strahlungsenergie gegenüber.

Da zur Bildung von Glucose „nur“ 2842 kJ/mol benötigt wird, wird die in 48 blauen Lichtquanten/mol steckende Energie von 14304 kJ nur zu etwa 20% und die in den roten Photonen enthaltene Energie von 8064 kJ zu 35% genutzt. Der Wirkungsgrad im blauen, energiereicheren Licht ist also viel geringer als im roten, energieärmeren.

Der auf die nutzbaren Wellenlängen bezogene Wirkungsgrad liegt damit deutlich höher als beim Ottomotor (25%) oder bei Solarzellen (5 - 17% je nach verwendetem Material).

Bezogen auf das gesamte Spektrum ergeben sich aber erheblich niedrigere Werte, da der grüne, gelbe und weitgehend auch der rote Bereich überhaupt nicht genutzt werden.

Für Solarzellen lässt sich der Wirkungsgrad auch in der Schule ermitteln wenn man die auf eine bestimmte Fläche unter einem bestimmten Winkel einfallende Strahlungsleistung der Sonne misst und den Wert der zur gleichen Zeit von der Solarzelle abgegebenen Leistung misst. Der erste Schritt geschieht entweder mit einem auf ein Photoelement geeichten Vielfachmessgerät (enthalten in unseren ausleihbaren IKS-Experimentierkoffern zur Photovoltaik\*) oder durch eine von der aktuellen Schattenlänge ausgehende geometrische Berechnung. Ein auf dieser Methode basierendes einfach nachzubauendes Messgerät ist in der Arbeitshilfe 19.44 „Sonnenenergie-Uhr – Abschätzen der solaren Strahlungsleistung“ dargestellt. Der zweite Schritt geschieht entweder durch Ablesen der auf dem Typenschild angegebenen Leistungsangaben und durch Umrechnung auf eine gemeinsame Fläche

**Beispiel:** Wir messen an einem wolkenlosen Sommertag auf einer senkrecht zur Sonne ausgerichteten Fläche eine Leistung von  $800 \text{ W/m}^2$ . Ein  $845 \times 510 \text{ mm}$  großes Solarmodul liefert laut Typenschild eine elektrische Leistung von 50 Watt. Dann könnte die Rechnung grob vereinfacht so aussehen:

$$845 \times 510 \text{ mm} = 0,43 \text{ m}^2$$

$$\text{Leistung bezogen auf } 1 \text{ m}^2 = 50 \text{ W} : 0,43 \text{ m}^2 = 116 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Wirkungsgrad: } 116 : 800 \times 100 = 14,5\%$$

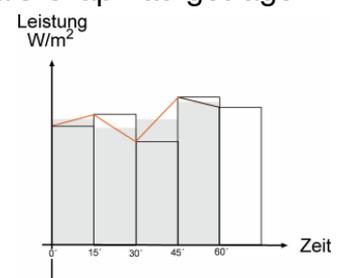
Die tatsächliche Leistung lässt sich durch Spannungs- und Strommessung an einem an das Solarmodul angeschlossenen und ausreichend belastbaren Lastwiderstand ermitteln. Spannung (U) und Strom (I) werden zu Leistung (P) multipliziert.

Eindrucksvoller, aber aufwändiger ist es, schrittweise so lange immer mehr Leuchten – parallel - an das Solarmodul anzuschließen bis die Spannung deutlich sinkt. Der Leistungswert auf Leuchten muss dann nur noch mit der Zahl der Leuchten multipliziert werden. Achten Sie darauf, dass die Ausgangsspannung des Moduls zur Nennspannung der Leuchten passt!

Der Ertrag eines 50W-Solarmoduls kann im Sommer bei 200 Wh (0,2 kWh) pro Tag liegen. Die Erträge über einen bestimmten Zeitraum hinweg können experimentell ermittelt werden indem die Leistungswerte in regelmäßigen Intervallen bestimmt und in ein Achsenkreuz eingezeichnet werden. Addieren Sie dann die darunter liegenden Flächeninhalte oder addieren Sie Durchschnittswerte der Messintervalle.

Im nebenstehend abgebildeten Beispiel wird die auf einen Quadratmeter Fläche eingestrahlte Leistung ( $\text{W/m}^2$ ) alle 15 Minuten abgelesen und als Graph aufgetragen. Die Werte lauten zum Beispiel:

0´	→ 500 W	Die mittleren Werte für die vier Messintervalle sind 530, 500, 550 und 640 W (grau unterlegte Flächen). Der Durchschnittswert ist $(530 + 500 + 550 + 620)/4 = 555 \text{ Wh}$
15´	→ 560 W	
30´	→ 440 W	
45´	→ 660 W	
60´	→ 620 W	



Das hier gewählte Messintervall ist natürlich viel zu grob, weil es beispielsweise sich zwischenzeitlich vor die Sonne schiebende Wolken unberücksichtigt lässt. Die so weit auseinander liegenden Messzeitpunkte geben nur zufällige Werte wider.

1 Watt ist die Energie, die im Laufe einer Sekunde umgesetzt wird. Energie wird in Joule (J) angegeben.

$$W = \frac{J}{s}$$

1 Wattstunde (Wh) ist die über eine Stunde (3600 s) gemessene Leistung. Sie entspricht einer Energie von 3600 J. Im obigen Fall fällt im Laufe von einer Stunde  $555 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 1998000 \text{ J} = 1998 \text{ KJ} = 1,998 \text{ MJ}$  auf einen Quadratmeter.

Im Falle eines 50-Watt-Moduls heißt das, dass 50 J Energie pro Sekunde umgesetzt werden und sich bei gleich bleibender Leistung der Energieumsatz in einer Stunde auf  $50 \text{ J} \times 3600 \text{ s} = 180000 \text{ J}$  oder 180 kJ (Kilojoule) addiert. Diese Energie kann sofort, z.B. durch Leuchten umgesetzt oder aber in Akkus gespeichert werden.

Wie lässt sich der auf das gesamte Lichtspektrum bezogene Wirkungsgrad der pflanzlichen Photosynthese in der Schulpraxis ermitteln?

Die von der Pflanze dem Sonnenlicht entnommene Energie lässt sich nicht wie im obigen Beispiel mit Messgeräten direkt ablesen. Darüber hinaus hat die Pflanze im Gegensatz zur isoliert betrachteten Solarzelle einen nicht unerheblichen Eigenverbrauch (Atmung), ähnlich einer Solaranlage mit Verbrauchern, deren Verbrauch man aber leicht erfassen kann.

In der Schule werden wir nur den Ertrag, also die Kartoffelknollen erfassen können, die nur einen Teil der Pflanze ausmachen. Setzen wir die Speicherknolle – eingeschränkt und grob vereinfacht - mit den Akku der Solaranlage gleich.

Man kann im Schulgarten bei der Kartoffelernte die an einer Pflanze „hängenden“ Kartoffeln auszählen, wiegen und Durchschnittswerte das ganze Beet ermitteln. Der so ermittelte Ertrag lässt sich auf eine Fläche, beispielsweise auf 1 ha = 10000 m<sup>2</sup> umrechnen. Der Energiegehalt der Kartoffel lässt sich aus Nährstofftabellen ablesen. Angegeben werden Werte um 300 kJ/100g (vermeiden Sie bitte den veralteten Begriff „Kalorien“!). Das ist etwa die Energie, die ein 50 Watt-Solarmodul in etwas weniger als zwei Stunden in den Akku schicken kann.

Diese Zahl 300 ist natürlich nur ein Richtwert: Kartoffeln enthalten je nach Sorte unterschiedlich viel Stärke. Als Beispiel seien die stärkearmen festkochenden Salatkartoffeln (etwa Hansa, Linda, Sieglinde) und die stärkereichen Industriekartoffeln (z.B. Adretta oder Aukla) genannt.

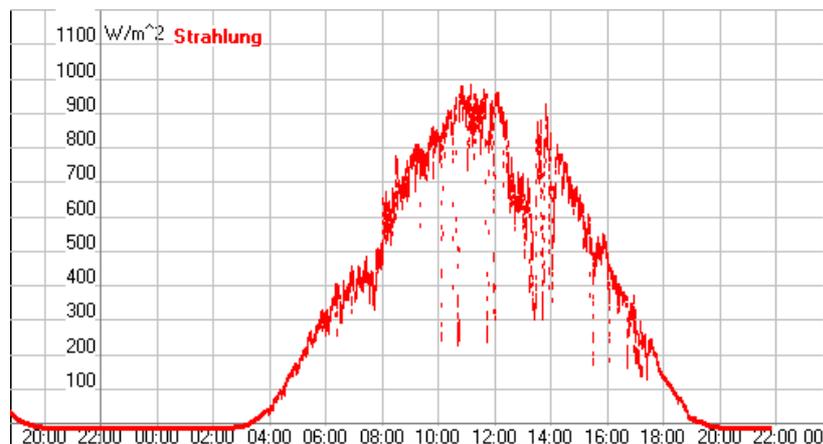
Man kann pro Quadratmeter mit 4 Pflanzen und einem Durchschnittsertrag von 1 – 1 ½ Kilogramm pro Pflanze rechnen. Das entspräche 12 – 15 MJ Energieertrag pro Quadratmeter.

Für Mitteleuropa rechnet man mit etwa 1000 kWh solarer Strahlungsleistung auf einen waagrecht liegenden Quadratmeter und Jahr, entsprechend 3600 MJ/m<sup>2</sup>a. Das sind 101 Liter Diesel oder 113 Liter Benzin (vergleiche nächsten Abschnitt)! 2003 lauteten die Mittelwerte in Hannover:

Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
18	45	84	129	152	176	161	150	108	57	27	17	1124 kWh/m <sup>2</sup>
65	162	302	464	547	634	580	540	389	205	97	61	4046 MJ/m <sup>2</sup>

Quelle: Deutsche Gesellschaft für Solarenergie (verändert)

Für die für Kartoffeln relevante Vegetationsperiode von April – September sind das  $876 \text{ kWh/m}^2$  oder  $3154 \text{ MJ/m}^2$ .



Die aktuellen Tagesgänge der Globalstrahlung vor Ort werden von vielen Instituten im Internet veröffentlicht. Man kann die Werte auch selbst erfassen, vergleiche Seite 26.

Tagesverlauf Globalstrahlung in Hannover 24.06.06  
Quelle: Institut für Meteorologie und Klimatologie Universität Hannover.

### **Kartoffeln, Biodiesel und Photosynthese: Wie viel Acker braucht ein Auto?**

Nehmen wir an, es gäbe eine Möglichkeit, die in Kartoffeln enthaltene Stärke ohne Energieverluste in Biodiesel zu verwandeln. Wie viele Kartoffelpflanzen und welche Flächen wären nötig um damit ein Auto fahren zu lassen?

Zunächst: Wie viel Stärke ist in Kartoffeln enthalten? Stärke lernen wir beim Kartoffelpufferreiben als weißes pulvriges „Abfallprodukt“ kennen. Beim Reiben wird auch deutlich, dass Kartoffeln in erster Linie aus Wasser (75%) bestehen, die Trockensubstanz – in erster Linie Stärke - macht nur ein Viertel des Rohgewichts aus. Um die Stärke mengenmäßig zu erfassen sollten wir so vorgehen:

- Kartoffeln waschen, schälen und fein in eine Schüssel reiben
- Den Brei abwiegeln
- Den Brei mit Wasser versetzen, gut aufrühren
- Den Brei in ein sauberes Leinentuch\* geben und gut auspressen.
- Das trübe Filtrat mit Wasser aufgießen einige Minuten stehen lassen
- Den klaren Überstand vorsichtig abgießen
- Die Stärke auf einer großen Fläche ausbreiten und trocknen lassen
- Schließlich die trockene Stärke abwiegen

\*)Die Rohfaser soll im Leinentuch zurückbleiben und keine Stärke mehr enthalten. Gegebenenfalls mehrfach filtrieren und auspressen!

Eine weitere, etwas anspruchsvollere aber genauere Methode ist die Zuhilfenahme des archimedischen Prinzips: Stärke ist wasserunlöslich und sinkt in Wasser eingerührt bald zu Boden, ist also schwerer als Wasser. Man lasse sich nicht dadurch täuschen, dass Stärke nur halb so viel Gewicht auf die Waage bringt wie das gleiche Volumen Wasser. Zwischen den Stärkekörnchen ist viel Luft enthalten! Geben Sie Kartoffeln eine mit Wasser gefüllte Schüssel. Sie sinken zu Boden, da ihr spezifisches Gewicht größer ist als das des Wassers. Wird jetzt Salz hinzugefügt, steigen sie an die Oberfläche. Wenn die Mehrzahl der Kartoffeln an der Oberfläche schwimmt hat das Wasser annähernd das gleiche spezifische Gewicht der Kartoffeln. Das spezifische Gewicht des Salzwassers lässt sich mit einem Aerometer\* (Dichtemesser) bestimmen.

Einfacher noch ist es, den Versuch auf einer genauen Waage durchzuführen!

Um Salz zu sparen sollten wir uns auf einen Viertel Liter Wasser beschränken, der bequem in einen tiefen Teller passt. Schneiden Sie einige Kartoffeln in kleine Streifen. Von jeder Kartoffel wird nur „Vertreter“ ins Wasser gegeben. Dieser „repräsentativen Auswahl“ wird jetzt langsam unter Rühren so viel Salz hinzugefügt, bis die Streifen aufschwimmen oder schweben.

Gießen Sie das Wasser vorsichtig, ohne das nicht aufgelöste Salz am Boden aufzuwirbeln bis zur 100, 150 oder 200 ml Marke eines Messgefäßes auf und wiegen Sie es auf einer Feinwaage ab.

Der Versuch sollte mit Wasser und Kartoffeln durchgeführt werden, die Raumtemperatur haben. Temperaturänderungen verfälschen das Ergebnis.

Ein Versuch mit einer Handvoll im Juni geernteten „Gloria“-Kartoffeln ergab für 150 ml Salzwasser ein Gewicht von 164 g. Bezogen auf 1000 ml Wasser (Dreisatz!) ergibt sich ein spezifisches Gewicht von 1,093 g/cm<sup>3</sup>.

Dieser Wert gilt, da die Kartoffelstreifen in beliebiger Höhe frei im Wasser schwebten, für das Wasser und die Kartoffeln.

**Gehaltbestimmungstabelle für Kartoffeln (nach Märcker)**

Spez. Gewicht	Trocken- substanz Proj.	Stärke- mehl Proj.	Spez. Gewicht	Trocken- substanz Proj.	Stärke- mehl Proj.
1,080	19,7	13,9	1,120	28,3	22,5
1,081	19,9	14,1	1,121	28,5	22,7
1,082	20,1	14,3	1,122	28,7	22,9
1,083	20,3	14,5	1,123	28,9	23,1
1,084	20,5	14,7	1,124	29,1	23,3
1,085	20,7	14,9	1,125	29,3	23,5
1,086	20,9	15,1	1,126	29,5	23,7
1,087	21,2	15,4	1,127	29,8	24,0
1,088	21,4	15,6	1,128	30,0	24,2
1,089	21,6	15,8	1,129	30,2	24,4
1,090	21,8	16,0	1,130	30,4	24,6
1,091	22,0	16,2	1,131	30,6	24,8
1,092	22,2	16,4	1,132	30,8	25,0
1,093	22,4	16,6	1,133	31,0	25,2
1,094	22,7	16,9	1,134	31,3	25,5
1,095	22,9	17,1	1,135	31,5	25,7
1,096	23,1	17,3	1,136	31,7	25,9
1,097	23,3	17,5	1,137	31,9	26,1
1,098	23,5	17,7	1,138	32,1	26,3
1,099	23,7	17,9	1,139	32,3	26,5
1,100	24,0	18,2	1,140	32,5	26,7
1,101	24,2	18,4	1,141	32,7	27,0
1,102	24,4	18,6	1,142	33,0	27,2
1,103	24,6	18,8	1,143	33,2	27,4
1,104	24,8	19,0	1,144	33,4	27,6
1,105	25,0	19,2	1,145	33,6	27,8
1,106	25,2	19,4	1,146	33,8	28,0
1,107	25,5	19,7	1,147	34,1	28,3
1,108	25,7	19,9	1,148	34,3	28,5
1,109	25,9	20,1	1,149	34,5	28,7
1,110	26,1	20,3	1,150	34,7	28,9
1,111	26,3	20,5	1,151	34,9	29,1
1,112	26,5	20,7	1,152	35,1	29,3
1,113	26,7	20,9	1,153	35,4	29,6
1,114	26,9	21,1	1,154	35,6	29,8
1,115	27,2	21,4	1,155	35,8	30,0
1,116	27,4	21,6	1,156	36,0	30,2
1,117	27,6	21,8	1,157	36,2	30,4
1,118	27,8	22,0	1,158	36,4	30,6
1,119	28,0	22,2	1,159	36,6	30,8

Die prozentuellen Anteile der Trockensubstanz und der Stärke können folgender Tabelle entnommen werden, die sich in „Meyers Großes Konversations-Lexikon“ von 1905 (6. Auflage, Band 10) findet.

Der gefundene Wert von 1,093 g/cm<sup>3</sup> lässt auf einen Stärkegehalt von etwa 16% schließen, was für eine festkochende Frühkartoffel recht realistisch erscheint.

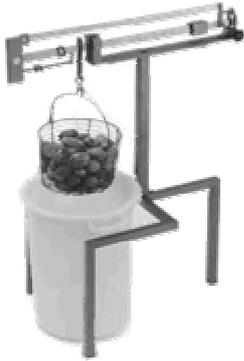
Die Dichte der Kartoffel (spezifisches Gewicht) lässt sich auch durch Ermittlung ihrer Masse (Gewicht) und des von ihr verdrängten Wassers bestimmen.

Die Dichte eines Festkörpers ist

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Wiegen Sie die Kartoffel und lassen Sie sie dann vollständig in ein randvoll mit Wasser gefülltes Gefäß gleiten. Das überschüssige Wasser wird aufgefangen und in einen Messzylinder gegeben. Damit sind Masse (Gewicht in der Luft) und das Volumen der Kartoffel (=Volumen des verdrängten Wassers) bekannt.

Eine weitere Methode ist die Feststellung des „Untergewichts“ im Wasser. Nach diesem Prinzip arbeiten die in der Landwirtschaft benutzten „Kartoffelstärkewaagen“.



Kartoffelstärkewaagen sind auf 0,1% Stärkegehalt genau.

Nach Archimedes ist die Dichte eines Festkörpers gleich dem Quotienten aus seinem Gewicht an der Luft und der Gewichts­differenz in Luft und Wasser.

$$\rho = \frac{m}{m_{\text{Luft}} - m_{\text{Wasser}}}$$

Hängen Sie die Kartoffel an eine Federwaage (Kraftmesser) und bestimmen Sie ihr Gewicht. Lassen Sie sie dann an der Waage hängend vollständig ins Wasser eintauchen und lesen Sie erneut ab.

Nehmen wir an, die Kartoffelpflanzen in unserem Gemüsegarten liefern durchschnittlich 1 kg Kartoffeln pro Pflanze. Nehmen wir weiterhin an, die Kartoffelsorte bringt es auf einen Stärkeanteil von 20%, was experimentell mit Hilfe der obigen Methode nachprüfbar wäre. Dann ließen sich pro kg etwa 200 g Stärke gewinnen. Stärke, ein Gemisch aus etwa 23% Amylose und 77% Amylopektin hat einen Brennwert von 1412 kJ/100g oder 14,1 MJ/kg Die Energiedichte von Dieseldieselkraftstoff liegt bei 35,5 MJ/l (bei Benzin „nur“ 32 MJ/l). Wollte aus Kartoffeln Diesel machen wären etwa 2,5 kg Kartoffelstärke aus 12,5 kg Kartoffeln. Auf dem Wochenmarkt kostet das Kilo Kartoffeln etwa 0,80 €, der Dieselpreis läge (ohne Verarbeitungskosten) bei 10 €. Mein elfjähriger Golf-Diesel verbraucht bei sehr niedertouriger Fahrweise 5 Liter/100 km. Auf 100 km werden also 177,5 MJ umgesetzt, entsprechend etwa 12,5 kg Kartoffelstärke oder 125 kg Kartoffeln. Der Wirkungsgrad des Dieselmotors liegt zwischen 35 und 45% (Direkteinspritzer). Es werden daher nur etwa 50 kg Kartoffeln in Bewegung umgesetzt, der Rest entweicht als Wärme.

Nehmen wir an, die jährliche Fahrleistung liegt bei 15000 km bei einem Durchschnittsverbrauch bei 5 Litern/100 km. Das sind 150 x 177,5 MJ = 26625 MJ. Die pro Jahr notwendige Kartoffelmenge beläuft sich dann auf 150 x 125 kg = 18750 kg oder die gleiche Anzahl Kartoffelpflanzen. Der Landwirt auf dem Wochenmarkt kalkuliert mit 40000 Saatkartoffeln und einem Ertrag von 500 Doppelzentnern (50000 kg) pro Hektar, also 1,25 kg pro Pflanze.

In Deutschland wurden 2004 auf 293000 ha 12,6 Mio. t Kartoffeln geerntet (Quelle Wikipedia), was einem Hektarertrag von etwa 43000 kg Kartoffeln oder 8600 kg Stärke mit einem Energieinhalt von 121260 MJ Energie entspricht.

Daraus ließen sich, immer noch vorausgesetzt, dass sich der Energiegehalt der Kartoffel 1:1 in Biodiesel umsetzen ließe etwa 3416 Liter Treibstoff machen mit denen der alte Golf bei sparsamer Fahrweise rund 68000 km fahren könnte.

Für eine Jahresfahrleistung von 15000 km wäre bei meinem Spar-Diesel fast ein Viertel Hektar Fläche nötig.

Was kostet ein Grundstück von dieser Größe? Wie lange muss der Landwirt für die Kartoffeln arbeiten? Wie lange muss ich dafür arbeiten? Noch leben wir von der Photosynthese lang vergangener und vor allen Dingen sehr, sehr langer Zeiten. Doch das Öl ist endlich und trotz neuer Funde irgendwann verbraucht.

Es gibt viel zu tun...

Wenn uns beim Tanken

ab und zu die „Photosynthese“ einfallen würde,

wäre schon etwas erreicht!