

Universität Würzburg  
Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik  
Fakultät für Physik und Astronomie

Schriftliche Hausarbeit  
im Rahmen zur ersten Staatsprüfung  
für das Lehramt an Gymnasien

„Photosynthese im Biophysikunterricht“

Eingereicht von  
**Hinder, Gerald**  
Richard Strauss Str. 11  
97074, Würzburg  
Geb.: 05.10.1988  
in Schwandorf

Frühjahr 2014

Prüfer: Prof. Dr. Thomas Trefzger  
Betreuer: Markus Elsholz

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	6
2. Sachanalyse.....	7
2.1 Allgemeines zur Photosynthese höherer Pflanzen .....	7
2.1.1 Ort der Photosynthese .....	7
2.1.2 Die Lichtsammelfallen der Chloroplasten .....	8
2.1.3 Die Lichtreaktion der Photosynthese .....	10
2.1.4 Die Dunkelreaktion der Photosynthese.....	13
2.2 Allgemeine Molekülphysik.....	15
2.2.1 Übersicht über die optischen Molekülspektren.....	15
2.2.2 Rotationen.....	16
2.2.3 Schwingungen.....	16
2.2.4 Elektronenzustände .....	18
2.3 Spektralphotometrie im UV- und sichtbaren Bereich .....	20
2.3.1 Lambert-Beersches Gesetz .....	20
2.3.2 Molekülorbitale und deren Übergänge .....	20
2.4 Farbmoleküle in Pflanzen .....	22
2.4.1 Chlorophylle .....	22
2.4.2 Carotinoide.....	23
2.5 Absorption und Emission der Farbmoleküle .....	23
2.6 Energietransfer .....	27
2.6.1 Förster-Energietransfer .....	27
2.6.2 Dexter-Energietransfer .....	28
2.6.3 Excitonen-Wechselwirkung.....	30
3. Arbeitstechniken und Geräte.....	32
3.1 Extraktion von Blattfarbstoffen .....	32
3.2 Chromatographie.....	32
3.3 Messung der Absorption/Emission von Farbstoffen.....	34

3.4 Die Spektrometer im Vergleich .....	35
3.4.1 Vergleich der Handhabung .....	36
3.4.2 Vergleich der Software .....	37
3.4.3 Messergebnisse .....	38
3.5 Chlorophyllfluoreszenz .....	41
4. Lehrplanbezug .....	42
4.1 Vorwissen .....	42
4.1.1 Vorwissen in der Biologie .....	42
4.1.2 Vorwissen in der Physik .....	43
4.1.3 Vorwissen in der Chemie .....	43
4.2 Einordnung in den Lehrplan .....	43
5. Didaktische Überlegungen .....	45
5.1 Motivation zur Konzeption .....	45
5.2 Erste Stunde .....	46
5.3 Zweite Stunde .....	48
5.4 Dritte Stunde .....	50
6. Umsetzung im Unterricht .....	52
6.1 Erste Stunde .....	52
6.1.1 Geplanter Verlauf .....	52
6.1.2 Tatsächlicher Verlauf .....	53
6.2 Zweite Stunde .....	54
6.2.1 Geplanter Verlauf .....	54
6.2.2 Tatsächlicher Verlauf .....	55
6.3 Dritte Stunde .....	57
6.3.1 Geplanter Verlauf .....	57
6.3.2 Tatsächlicher Verlauf .....	58
6.4 Gesamtfazit nach der Durchführung .....	61
6.5 Auswertung der Stunden anhand der Fragebögen .....	61

7. Fazit .....	66
8. Literaturverzeichnis .....	67
9. Anhang.....	69
9.1 Anleitungen zu den Spektrometern.....	69
9.1.1 Amadeus.....	69
.....	70
9.1.2 Leybold .....	74
9.2.3 Phywe.....	77
9.2 Unterrichtsmaterialien .....	82
9.2.1 Schülerhandout .....	82
9.2.2 Lehrerhandout .....	93
9.2.3 Verwendete Folien.....	104
9.3 Fragebogen zur Unterrichtseinheit .....	108
10. Danksagung .....	109
11. Eigenständigkeitserklärung .....	110

Einige in dieser Arbeit wiederkehrende Abkürzungen:

Schülerinnen und Schüler	–	SuS
Gruppenarbeit	–	GA
Lehrervortrag	–	LA
Arbeitsblatt	–	AB
Chlorphyll	–	Chl

„Würde man alle Kohlenhydrate, die in einem Jahr durch die Photosynthese produziert werden, in Zuckerwürfel umwandeln, würde sich ein Berg aus 300 Billionen Würfeln auftürmen. Aneinandergereiht reichten diese Würfel von der Erde bis zum (ehemaligen) Planeten Pluto- eine enorme Photosyntheseleistung also!“ (Campbell,9.Aufl, S.246)

## 1. Einleitung

Die Energie, mit der die Sonne jeden Tag auf die Erde einstrahlt, beträgt ca.  $1,5 \cdot 10^{31}$  kJ. Pflanzen und bestimmte Mikroorganismen haben gelernt sich diese Energie zu Nutze zu machen und sie für ihren Stoffwechsel einzufangen. Sie nutzen ca. 0,01% also  $3,6 \cdot 10^{18}$  kJ der ankommenden Energie der Sonne. Den Prozess, bei dem Lichtenergie zu chemischer Energie umgewandelt wird, nennt man Photosynthese. (E. Strasburger, 2008 S. 275)

Die ersten Nachweise von Photosynthese betreibenden Organismen findet man schon vor 3,5 Milliarden Jahren. Somit ist es einer der ältesten und ausgereiftesten Prozesse, die man auf der Erde finden kann. Auch wurde durch die aerobe Photosynthese unser Leben erst möglich, indem in einem Jahrtausende langen Prozess die Atmosphäre mit Sauerstoff angereichert wurde und sich auch unsere Ozonschicht entwickelte, die uns vor schädlicher Strahlung aus dem Weltall schützt.

Die Forschung an diesem zentralen Prozess unserer Umwelt wird schon seit ca. 200 Jahren betrieben. Dabei ging man von einfachen Erkenntnissen aus, wie der Sauerstoffproduktion und Kohlendioxidfixation und deckte immer detaillierter die Teilprozesse der Photosynthese auf. Mit mikroskopischen, chemischen und physikalischen Methoden erforschte man diesen Prozess immer weiter, bis hin zu Röntgenbeugungsexperimenten an kristallisierten Lichtsammelfallen. Selbst heute wird noch am genauen molekularen Aufbau und den Teilprozessen der Photosynthese geforscht.

In vorliegender Arbeit soll eine Unterrichtseinheit erstellt werden, wie man die Photosynthese im Biophysikunterricht der 11. Klasse Gymnasium unterrichten kann. Dabei liegt der Schwerpunkt auf dem ersten Schritt der Lichtreaktion, bei dem die Lichtquanten von den Lichtsammelfallen eingefangen werden und zum Reaktionszentrum weitergeleitet werden. Dieser Prozess wird mit den Schülerinnen und Schülern (im Folgenden SuS abgekürzt) genauer analysiert und mit einigen Demonstrationsexperimenten nachvollzogen.

Dabei sollen die SuS am anschaulichen Beispiel der Photosynthese die physikalischen Prozesse wie Absorption, Emission und das molekulare Energieniveauschema verstehen und diese in ihrer biologischen Anwendung kennen lernen.

Die Arbeit gliedert sich auf in eine Sachanalyse, in der die fachwissenschaftlichen Grundlagen erläutert werden, gefolgt von der Einordnung in den Lehrplan. Hier werden das Vorwissen der SuS und die zu behandelnden Themen in den Lehrplan des G 8 eingeordnet. Anschließend werden didaktische Überlegungen zum Unterrichtsverlauf angestellt denen sich dann die einzelnen Stundenkonzepte anschließen.

## 2. Sachanalyse

### 2.1 Allgemeines zur Photosynthese höherer Pflanzen

#### 2.1.1 Ort der Photosynthese

Der primäre Ort der Photosynthese sind die grünen Blätter, aber prinzipiell findet diese in allen grünen Pflanzenteilen statt. In all diesen Teilen finden sich Chloroplasten, kleine Zellorganellen von ca. 2-4 x 4-7  $\mu\text{m}$  Größe. Sie haben eine doppelte Hüllmembran, wobei diese in ihrer chemischen Zusammensetzung und somit in ihrer Funktion unterschiedlich gestaltet sind. Die äußere Membran besteht aus einer doppelten Lage an Phospholipidmolekülen, zwischen denen teilweise Proteine eingebaut sind. Sie ist durchlässig für viele Stoffe. Die innere Hüllmembran ist im Gegensatz dazu eine selektive Barriere, welche nur bestimmte Stoffe in die Chloroplasten aufnimmt. Zudem bilden sich aus der inneren Membran sogenannte Thylakoide durch Abschnürung. Diese sind untereinander verbundene Membransäckchen, welche meist in Stapeln übereinander gelegt sind und damit das Grana bilden. In die Thylakoidmembranen sind das Chlorophyll und weitere Farbstoffe mit Hilfe von Proteinen eingelagert. Das Chlorophyll dient zur Absorption von Licht und erscheint aufgrund der Grünlücke im Absorptionsspektrum grün. Zudem finden sich in der Membran noch weitere Proteine, die für die Lichtreaktion der Photosynthese essentiell sind. In den Chloroplasten grüner Pflanzen, z.B. dem Spinat finden sich in einem Chloroplast ca. 50 Granastapel mit je 2-100 Thylakoiden.

Die restliche Flüssigkeit in den Chloroplasten bezeichnet man als Stroma. Hier befinden sich Ribosomen, Stärkekörner und Fetttropfen sowie nötige Enzyme für Stoffwechselforgänge wie den Calvin Zyklus. Insgesamt finden sich auf 1  $\text{mm}^2$  Blattfläche im Durchschnitt 500000 Chloroplasten. (Campbell, et al., 2009 S. 253f.) (Lüttge, et al., 2012 S. 104-110)

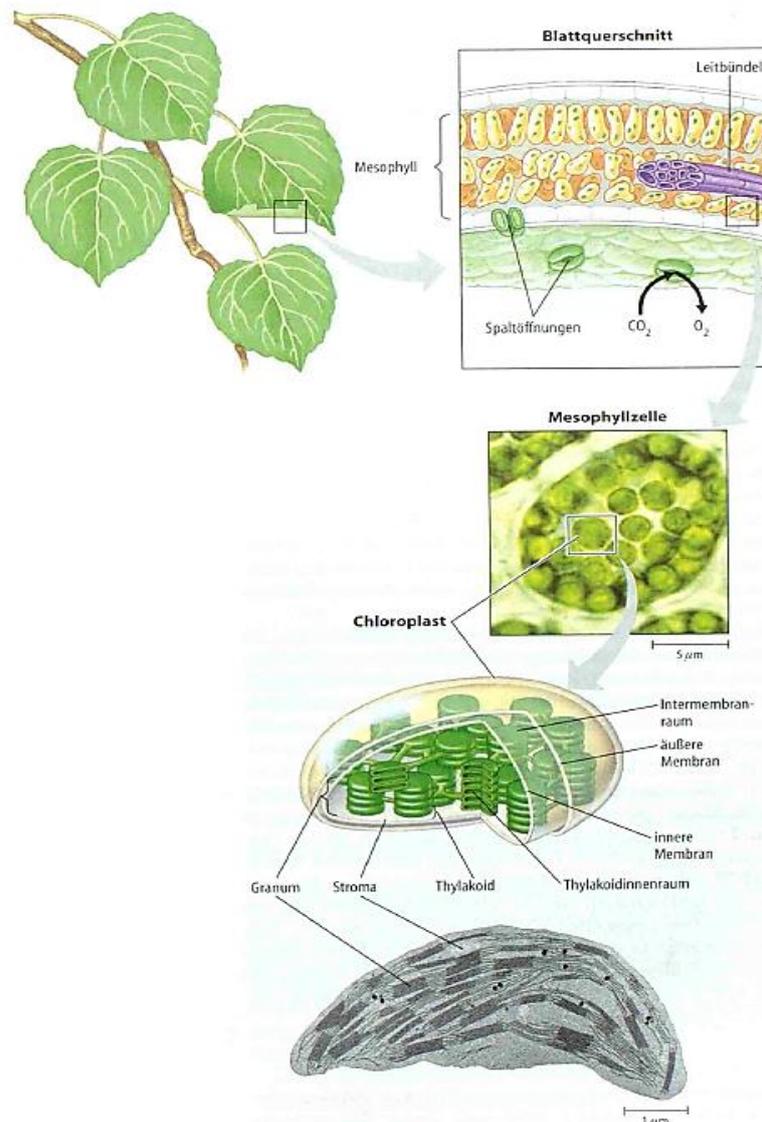


Abb. 1: Ort und Aufbau der Chloroplasten (Campbell, et al., 2009 S. 254)

### 2.1.2 Die Lichtsammelfallen der Chloroplasten

Die Photosynthese ist der Prozess des Aufbaus organischer Stoffe aus anorganischen Stoffen mit Hilfe von Lichtenergie. Dazu muss die Energie des ankommenden Sonnenlichts eingefangen werden und in chemische Reaktionsenthalpie umgesetzt werden. Dies geschieht nicht überall auf der Oberfläche der Thylakoide, sondern nur in den Lichtsammelfallen der Thylakoidmembran. In dieser sind über Proteine und andere niedermolekulare Verbindungen ca. 300 Chlorophyllmoleküle zum Komplex angeordnet. Dabei haben fast alle der dort gebundenen Moleküle nur eine Absorptions- und Energieübertragungsfunktion. Ankommende Lichtquanten werden von diesen Molekülen absorbiert und die gewonnene Energie zum Zentrum hin weitergeleitet. Die eigentliche Ladungstrennung erfolgt dann beim sogenannten Special Pair, einem Paar Chlorophyll a Moleküle, die sehr nah beieinander liegen. Durch

diese spezielle Anordnung können die Moleküle des Special Pairs die ankommende Lichtenergie nicht nur zur Anregung von Elektronen sondern auch zu deren Übertragung auf das Reaktionszentrum nutzen, wo die ersten Schritte der Lichtreaktion eingeleitet werden. Durch die Aufnahme eines Elektrons aus der Spaltung von Wasser kehrt das Special Pair wieder in den Grundzustand zurück. Bei normalen Lichtbedingungen findet dieser Kreisprozess ca. 100-200 mal pro Sekunde statt. Bei der hier stattgefundenen Ladungstrennung wurde die kurzlebige Anregungsenergie der Photonen in ein längerlebigeres elektrisches Potential umgesetzt. (E. Strasburger, 2008 S. 279f) In weiteren Schritten der Photosynthese wird dieses dann in ein chemisches Potential überführt. Im System der Photosynthese höherer Pflanzen gibt es zwei verschiedene Lichtsammelfallen, oder auch Photosysteme genannt, die man in der Reihenfolge ihrer Entdeckung als PS I und PS II bezeichnet. In der Reihenfolge der Reaktion der Photosynthese kommt jedoch zuerst PS II zum Einsatz. Die Photosysteme unterscheiden sich vor allem in ihrem Gehalt an Farbstoffmolekülen (Chlorophyll a, Chlorophyll b, Carotinoide und Xanthophylle). So bezeichnet man auch die Photosysteme anhand der Absorptionsmaxima der Reaktionszentren in nm als P 680 (PS II) und P 700 (PS I). Dies ist auch bedingt durch die unterschiedlichen Proteine mit denen die Farbmoleküle gebunden sind. Isoliert haben die Chlorophyll Moleküle andere Absorptionsspektren als in den Lichtsammelfallen. (Campbell, et al., 2009 S. 262f.)

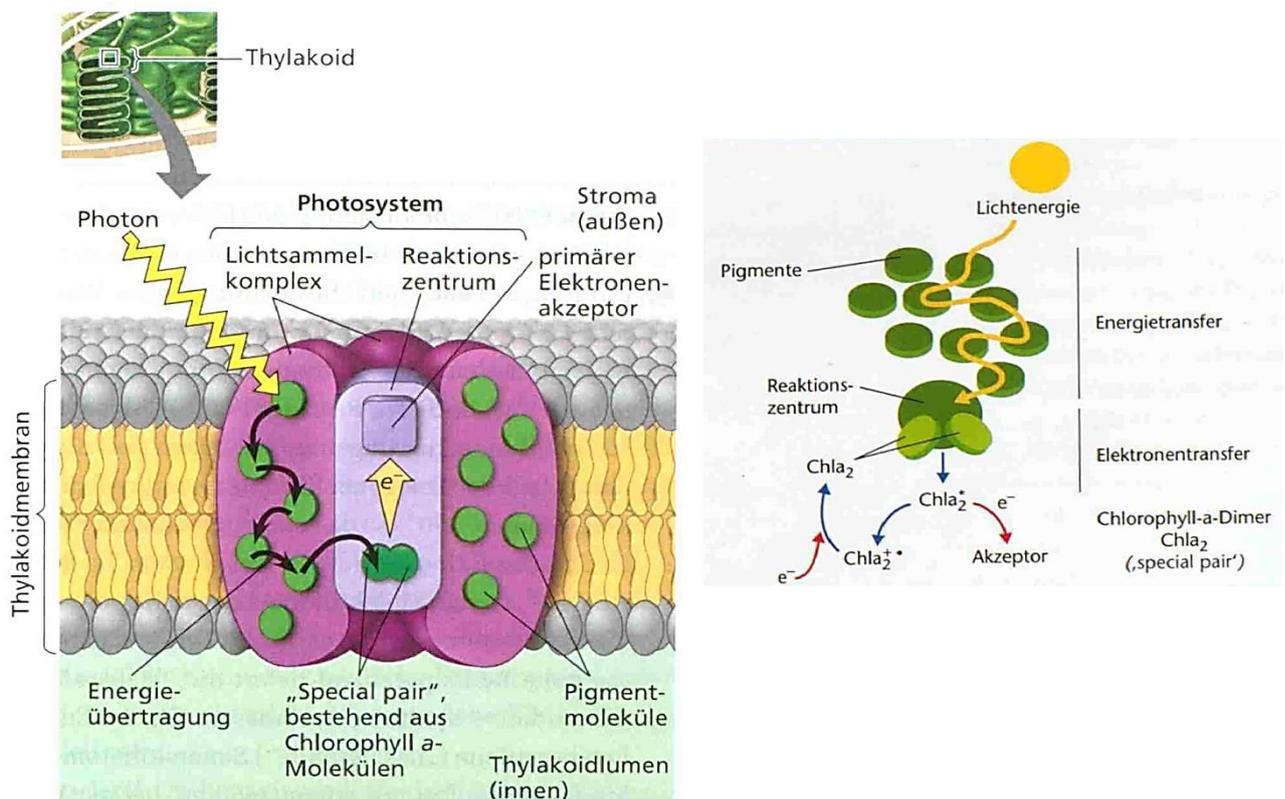


Abb. 2: Aufbau einer Lichtsammelfalle und Funktionsprinzip (Campbell, et al., 2009 S. 263) (E. Strasburger, 2008 S. 279)

### 2.1.3 Die Lichtreaktion der Photosynthese

Die Lichtreaktion ist der erste Teilschritt der Photosynthese und benötigt, wie der Name schon sagt, Licht, um ablaufen zu können.

Man kann sie in vier Teile gliedern, die aber maßgeblich zusammenhängen:

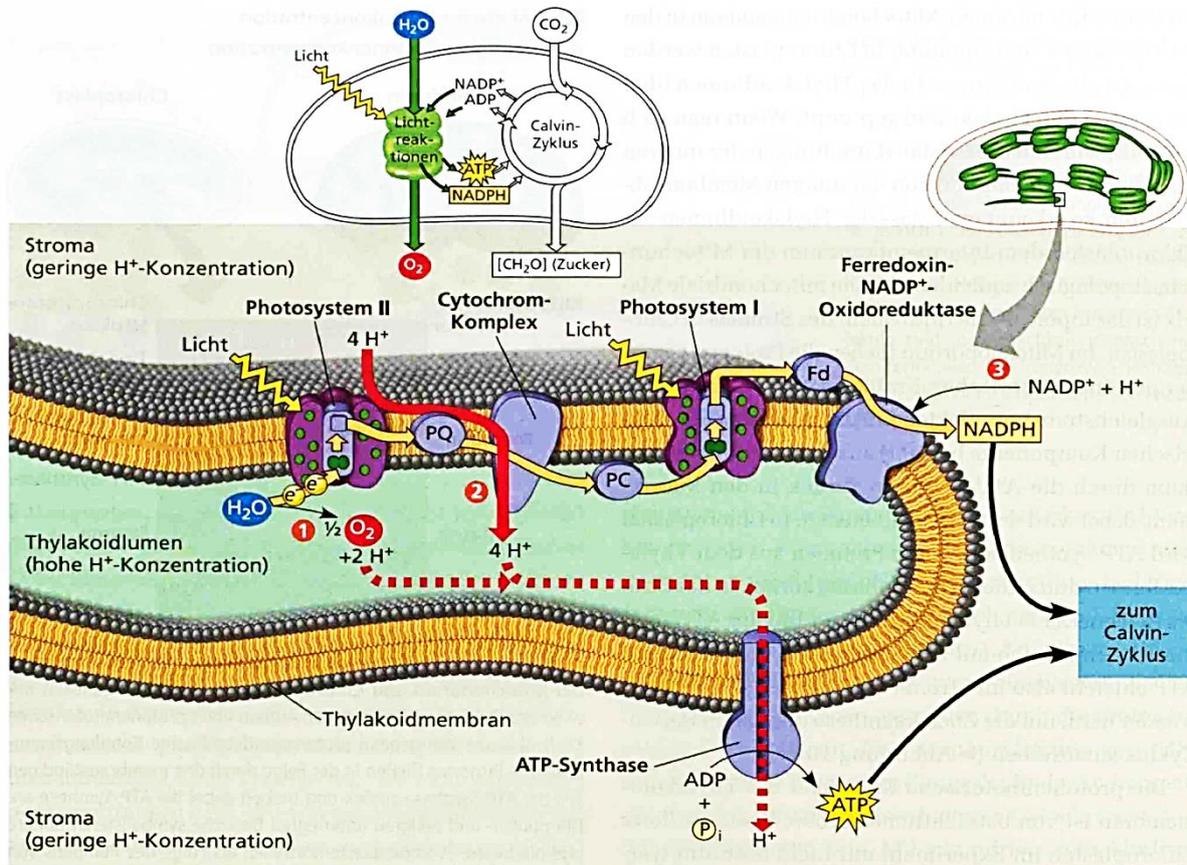


Abb. 3: Übersicht über die Lichtreaktion der Photosynthese (Campbell, et al., 2009 S. 268)

#### 1) Das Photosystem II (PSII)

Ausgehend von einem Photon, das im Photosystem II absorbiert wird, findet eine Energieübertragung zum Special pair hin statt, wo die Ladungstrennung stattfindet. Das dort freigegebene Elektron wird vom Reaktionszentrum auf Plastochinon, den primären Elektronenakzeptor der Elektronentransportkette, übertragen. Das fehlende Elektron kann durch die Spaltung von Wasser aufgefüllt werden, da das oxidierte Reaktionszentrum  $P680^+$  das stärkste bekannte biologische Oxidationsmittel ist. Dieses Redoxpotential wird genutzt um Wasser in 2 Elektronen, 2 Protonen und ein Sauerstoffatom im Mangankomplex zu spalten. Dieser besteht aus vier Manganatomen die von einem MSP (Mangan-stabilisierenden Protein) gebunden werden. (Lüttge, et al., 2012 S. 119) Die 2 Elektronen können nun die Lücke im Reaktionszentrum auffüllen, während sich das Sauerstoffatom mit einem Zweiten zu einem

Sauerstoffmolekül verbindet. Der hier entstandene Sauerstoff ist für die Pflanze ein Abfallprodukt und wird über die Spaltöffnungen der Blätter an die Umgebung abgegeben. Die Protonen verbleiben im Innenraum der Thylakoide.

## 2) Die Elektronentransportkette

Das freigesetzte Elektron wird nun über die Elektronentransportkette zum PS I transportiert. Die Kette besteht aus drei Teilen: Plastochinon, Cytochrom-Komplex und Plastocyanin. Im Verlauf dieser Kette wird die Energie des Elektrons bis zum Reaktionszentrum von PS I stufenweise abgegeben. Das Plastochinon ist als freier Pool in der Membran vorhanden und dient als Hauptelektronentransporter. Jedes Molekül kann zur Oxidation zwei Elektronen und zwei Protonen aufnehmen und bei einer Reoxidation wieder abgeben. Der Cytochromkomplex ist ein Tetrapyrrolysystem mit einem Eisenzentrum. Dieses kann ein Elektron aufnehmen und wieder abgeben. Die Elektronen werden vom Plastochinon auf den Cytochromkomplex übertragen, die zusätzlich frei werdenden Protonen in das Innere der Thylakoide abgegeben. Vom Cytochromkomplex aus werden die Elektronen auf Plastocyanin übertragen, welches zwei Kupferatome enthält. Dieses gibt dann im letzten Schritt der Elektronentransportkette die Elektronen an das Photosystem I ab. (Lüttge, et al., 2012 S. 95, 123f)

## 3) Das Photosystem I (PS I)

Am Photosystem I wird ebenfalls ein Photon absorbiert und mit dessen Energie im Reaktionszentrum ein Elektron des Special Pairs angeregt, welches dann übertragen wird. Die hier entstehende Elektronenlücke wird mit dem vom PS II ankommenden Elektron aufgefüllt. Das angeregte Elektron wird nun auf das Molekül Ferredoxin übertragen, das mit Hilfe des Enzyms Ferredoxin-NADP<sup>+</sup>-Oxidoreduktase NADP<sup>+</sup> zu NADPH reduziert. Dafür werden zwei Elektronen und ein Proton benötigt. Dieser Vorgang findet im Stroma der Chloroplasten statt, sodass die zur Reduktion notwendigen Protonen von dort bezogen werden. (Campbell, et al., 2009 S. 264f.)

## 4) Die ATP Synthase

Betrachtet man die Verteilung der Protonen zwischen dem Inneren der Thylakoide und dem Stroma, fällt auf, dass sich diese im Verlauf der bisher besprochenen Reaktionen im Thylakoidinnenraum ansammeln: Durch die Spaltung von Wasser verbleiben Protonen im Innenraum, das Plastochinon transportiert neben Elektronen auch Protonen vom Stroma nach Innen und durch die Reduktion von NADP<sup>+</sup> zu NADPH werden Protonen aus dem Stroma entnommen. Durch all diese drei Vorgänge entsteht

ein Konzentrationsgradient für Protonen, dessen protonenmotorische Kraft an der ATP-Synthase genutzt wird, um ATP herzustellen (Adenosintriphosphat). Hierbei werden die Protonen gemäß ihres Konzentrationsgradienten über den ATPase-Komplex in das Stroma entlassen und lassen diesen dadurch rotieren. Die hierbei entstehende Energie, die drei Protonen beim Durchgang abgeben wird genutzt um ADP (Adenosindiphosphat) zu ATP umzuwandeln. Dieses ist der Kurzzeitspeicher für Energie in den Zellen. Ein Teil der ankommenden Lichtenergie wurde also in chemische Energie umgewandelt. In der Lichtreaktion entstanden mit Hilfe der Energie der Photonen somit die beiden Stoffe ATP und NADPH. Da aber ATP nur ein kurzzeitiger Energieträger ist wird nun im folgenden Schritt, der Dunkelreaktion, die Energie in den Aufbau eines Langzeitspeichermoleküls, den Traubenzucker, gesteckt. (Campbell, et al., 2009 S. 264f.) (Lüttge, et al., 2012 S. 125f)

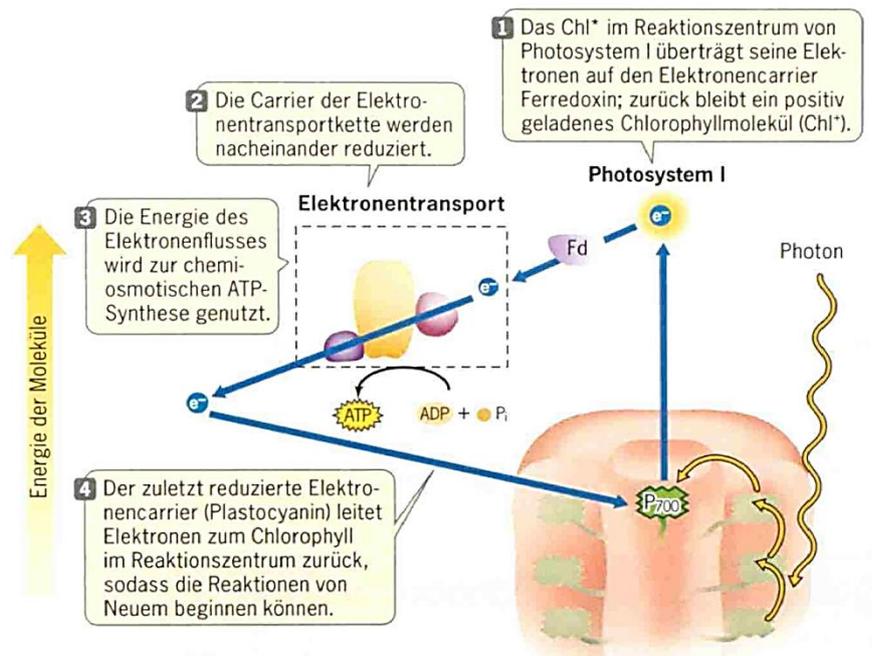


Abb. 4: Darstellung des zyklischen Elektronentransportes (David Sadava, 2011 S. 257)

Anzumerken ist hier noch, dass es zwei verschiedene Möglichkeiten des Elektronentransportes geben kann. Der hier vorgestellte Weg ist der sog. lineare oder nicht-zyklische Elektronentransport, bei dem die am Reaktionszentrum des PS II freigesetzten Elektronen über die Elektronentransportkette und das PS I im Reduktionsäquivalent NADPH verbaut werden. Es kann jedoch auch ein zyklischer Elektronentransport stattfinden, bei dem nur PS I aktiv ist. Hier werden die angeregten Elektronen des PS I auf Ferredoxin und weiter zum Cytochrom Komplex transportiert. Von dort aus gelangen sie wieder zum Reaktionszentrum des PS I. Bei diesem Zyklus werden kein NADPH und kein O<sub>2</sub> produziert,

jedoch Protonen ins Innere der Thylakoide gebracht. So kann über die ATP Synthase ATP produziert werden. Den zyklischen Elektronentransport findet man vor allem bei Bakterien. Diese sind evolutionsbiologisch sehr nahe verwandt mit den ursprünglichen Bakterien, in denen sich die Photosynthese entwickelte. Aber auch höhere Pflanzen nutzen den zyklischen Elektronentransport bei starkem Lichteinfall um Photoschäden zu vermeiden bzw. zu verringern. (Campbell, et al., 2009 S. 265f)

## 2.1.4 Die Dunkelreaktion der Photosynthese

Dieser zweite Schritt der Photosynthese hängt nicht direkt von Licht ab und kann auch im Dunkeln ablaufen. Jedoch besteht eine indirekte Abhängigkeit, da für die hier ablaufenden Prozesse die Produkte aus der Lichtreaktion benötigt werden. Die Dunkelreaktion läuft als sogenannter Calvin Zyklus im Stroma der Chloroplasten ab. Hier wird nun aus  $\text{CO}_2$ , welches aus der Luft aufgenommen wird, schrittweise unter Verbrauch von ATP und NADPH Zucker aufgebaut.

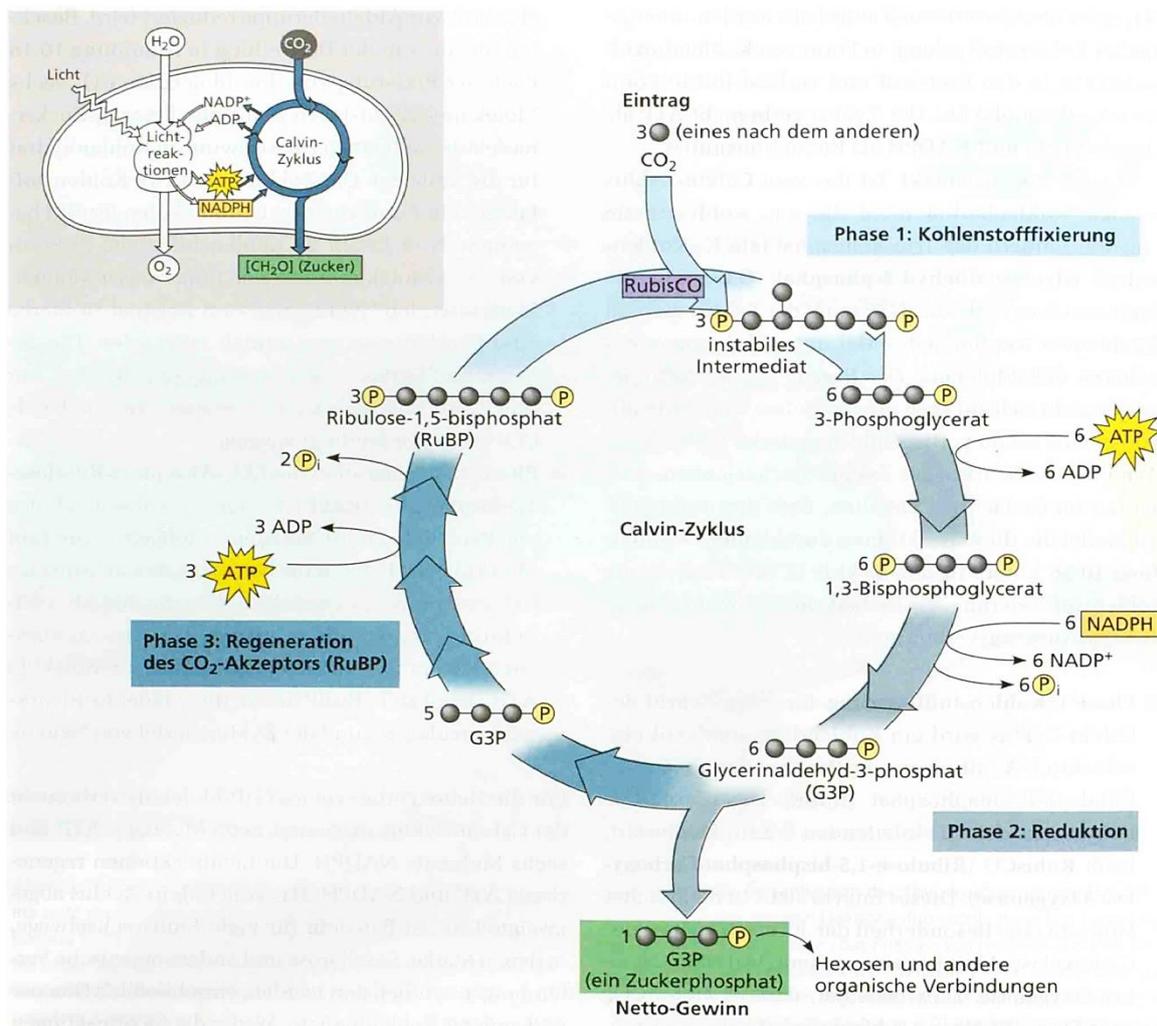
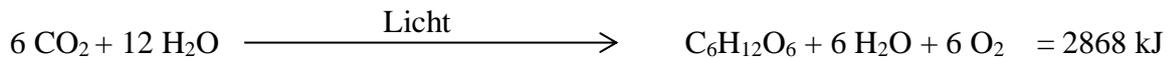


Abb. 5: Der Calvin Zyklus (Campbell, et al., 2009 S. 270)

Man kann drei Hauptphasen unterscheiden:

- 1) Kohlenstofffixierung: Mit Hilfe des Enzyms Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase/Oxygenase (RubisCO) wird CO<sub>2</sub> auf Ribulose-1,5-bisphosphat übertragen. Der so entstehende C<sub>6</sub> Körper ist sehr instabil und zerfällt in 2 C<sub>3</sub> Körper (3-Phosphoglycerat).
- 2) Reduktion: Unter Verwendung von ATP und NADPH wird schrittweise Glycerinaldehyd-3-Phosphat (G3P) aufgebaut. Dabei entstehen pro 3 CO<sub>2</sub> 6 Moleküle G3P, jedoch wird davon nur eines in Saccharose umgewandelt, während die restlichen 5 Moleküle für die Regeneration des CO<sub>2</sub> Akzeptors benötigt werden.
- 3) Regeneration des CO<sub>2</sub> Akzeptors: In vielen Schritten wird unter ATP Verbrauch aus den C<sub>5</sub> Molekülen wieder der CO<sub>2</sub> Akzeptor Ribulose-1,5-bisphosphat gebildet, um den Zyklus zu schließen.

In der Dunkelreaktion wurde somit das Endprodukt der Photosynthese, Saccharose, aus CO<sub>2</sub> hergestellt. Es ergibt sich die Grundgleichung der Photosynthese zu:



Der hergestellte Zucker versorgt über die Leitgefäße der Pflanze (Xylem und Phloem) alle Teile mit der nötigen Energie zum Leben. Überproduktion wird in Form von Stärke entweder in den Chloroplasten oder gleich in Zellen der Wurzeln, Knollen, Samen und Früchten gespeichert. (Campbell, et al., 2009 S. 269f)

## 2.2 Allgemeine Molekülphysik

### 2.2.1 Übersicht über die optischen Molekülspektren

Da Moleküle eine Einheit aus mindestens zwei oder mehr Atomen bilden, können sie ,wenn sie energetisch angeregt werden, auch Bewegungen wie Rotationen und Schwingungen ausführen. Somit ergibt sich die Gesamtenergie eines Moleküls aus der Summe der Rotation, Schwingung und der Elektronenanregung:

$$E = E_{el} + E_{vib} + E_{rot}$$

Durch diese drei Möglichkeiten der Energieanregung findet man bei Molekülen auch drei verschiedene optische Spektren:

- Rotationsspektren entstehen durch Übergänge verschiedener Rotationsniveaus bei gleichbleibendem Schwingungs- und Elektronenzustand. Somit ändert sich hier nur die Quantenzahl  $J$  der Rotation. Die Wellenlängen dieser Spektren befinden sich im Bereich der Mikrowellen und des Ferninfrarot.
- Rotationsschwingungsspektren dagegen sind Übergänge eines Rotationszustandes von einem Schwingungszustand zu einem anderen. Dabei ändern sich die Quantenzahlen  $J$  der Rotation, und  $v$  des Schwingungsniveaus. Hier befindet man sich im Infrarotbereich des optischen Spektrums.
- Elektronenspektren sind nun Übergänge von Rotationen und Schwingungen eines Elektronenzustandes zu einem anderen. Hier ändern sich alle drei Quantenzahlen:  $J$ ,  $v$  und die des Elektronenzustandes. Das Spektrum geht vom Nahinfrarot über das Sichtbare bis zum Ultravioletten Bereich.

Für die Energieunterschiede der einzelnen Übergänge gilt:  $\Delta E_{el} \gg \Delta E_{vib} \gg \Delta E_{rot}$   
(Haken, et al., 2006 S. 156-164)

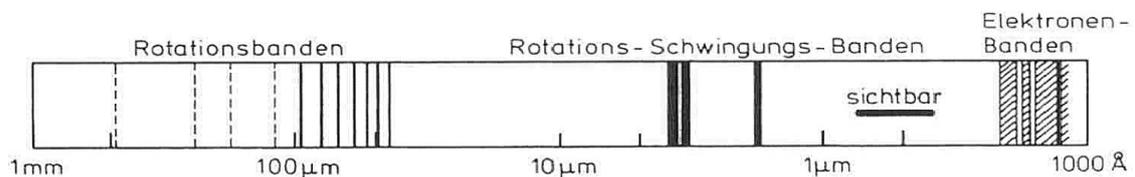


Abb. 6: Übersicht über die Spektrale Lage der Absorptionsspektren am Beispiel von HCl (Haken, et al., 2006 S. 157)

### 2.2.2 Rotationen

Bei Molekülen finden Rotationsübergänge nur durch Aufnahme bzw. Abgabe von Energiequanten statt, da die zugehörigen Rotationsenergien gequantelt sind. Die beobachtbaren Rotationsspektren findet man jedoch fast ausschließlich bei Absorption, da die spontane Übergangswahrscheinlichkeit einer Emission aufgrund der kleinen Übergangsfrequenz sehr gering ist. Allgemein findet man Rotationsspektren nur bei Molekülen mit einem permanenten elektrischen Dipolmoment, da ein solches Molekül bei Rotation ein veränderliches Dipolmoment zu haben scheint und somit elektromagnetische Strahlung absorbieren kann. Moleküle wie  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  oder  $\text{CCl}_4$  sind ohne ein festes Dipolmoment, zeigen also auch keine Rotationsspektren, außer die Rotation des Moleküls führt zu einer Verzerrung, die ein induziertes Dipolmoment verursacht. In biologischen Molekülen, die meist über Proteine gebunden sind, spielen Rotationen keine große Rolle im Absorptionsspektrum. (Haken, et al., 2006 S. 159f)

### 2.2.3 Schwingungen

Da Moleküle aufgrund ihres Aufbaus mehrere innere Freiheitsgrade haben, können sie Schwingungen durchführen, welche von außen angeregt werden. Dabei wird die Energie genutzt, um Atome um ihre Ruhelage im Molekül schwingen zu lassen. Beobachtet man nun ein Schwingungsspektrum, findet man bei hoher Auflösung für jede Serie von Obertönen auch eine Unterstruktur aus fast äquidistanten Linien, die den Rotationsspektren ähneln. Moleküle zeigen also eine Koppelung von Rotationen und Schwingungen, was zu Rotationsschwingungsspektren führt. Jedoch kann die Rotationsstruktur verschwinden, wenn bei stark kondensierter Phase die Wechselwirkung mit anderen Molekülen die Linien stark verbreitert und so inhomogene Schwingungsbanden entstehen, also ohne Rotationsstruktur. Für erlaubte Übergänge von Schwingungen gilt ebenfalls, wie bei den Rotationen, dass ein elektrisches Dipolmoment vorhanden sein muss, um Strahlung absorbieren zu können. Bei einem zweiatomigen Molekül kann man das Potential mit einem Morsepotential annähern:  $V = D_e [1 - e^{-a(R-R_e)}]^2$ . Dabei ist  $D_e$  die Dissoziationsenergie, bei welcher der Abstand der Atome so groß wird, dass sich das Molekül auftrennt.

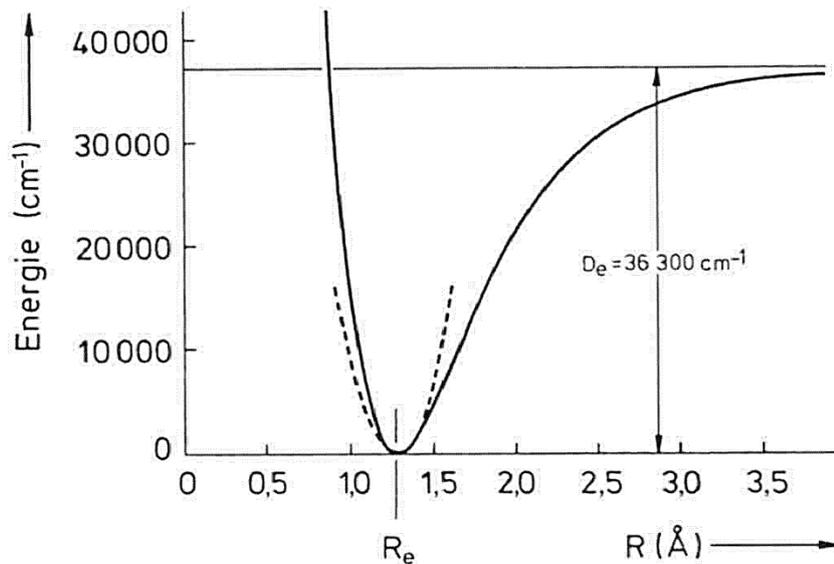


Abb. 7: Das Morsepotential für HCl. Die gestrichelte Linie entspricht dem Potential des harmonischen Oszillators. (Haken, et al., 2003 S. 184)

Im Potential sitzen nun die Energieniveaus ausgehend von der Nullpunktsenergie, die , aufgrund der Unschärferelation von Ort und Impuls, ungleich Null ist. Betrachtet man nun vielatomige Moleküle hat man mehrere Freiheitsgrade der Schwingung, bei der sich z.B. auch die Bindungswinkel ändern können (Deformationsschwingung). Man beschreibt das Schwingungsverhalten solcher Moleküle anhand von Normalschwingungen, die dadurch definiert sind, dass alle Massepunkte des Systems mit der gleichen Frequenz und einer festen Phasenbeziehung schwingen. Diese Normalschwingungen sind voneinander unabhängig anregbar, also entkoppelt. Die Anzahl der möglichen Normalschwingungen ist abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade des Systems. Da die Atome in einem Molekül miteinander gekoppelt sind, ergeben sich für die Translation 3 Freiheitsgrade und für die Rotation ebenfalls 3 (wenn es kein lineares Molekül ist). Somit ergibt sich für die Anzahl der Normalschwingungen:  $f = 3N - 6$ . Zu beachten ist hier, dass aber nicht alle möglichen Schwingungen auch im Infrarotspektrum auftreten, da sie kein veränderliches Dipolmoment aufweisen. So ist z.B. das  $\text{CO}_2$  Molekül im Ruhezustand elektrisch neutral und bleibt es auch bei einer symmetrischen Streckschwingung. Eine asymmetrische Streckschwingung oder eine Biegeschwingung dagegen hat ein induziertes Dipolmoment und kann Strahlung absorbieren. (Haken, et al., 2006 S. 179-200)

## 2.2.4 Elektronenzustände

Bei der Betrachtung der Elektronenzustände findet man Spektren mit sehr vielen Linien, die bei geringer Auflösung auch als Banden zu erkennen sind. Diese haben eine dreifache Struktur aus getrennten Gruppen von Banden (Bandensysteme), welche aus mehreren Banden bestehen, die sich wiederum in viele Bandenlinien aufteilen. Diese Dreiteilung entspricht den drei Teilen der Gesamtenergie des Moleküls. Die Lage des Bandensystems ist durch die Elektronenzustände festgelegt, während die unterschiedlichen Banden verschiedenen Schwingungszuständen entsprechen. Die Bandenlinien entsprechen dann den unterschiedlichen Rotationszuständen des Moleküls. (Haken, et al., 2006 S. 255f) Betrachtet man einen Elektronenzustand, so kann man ihn als eine spezifische Potentialkurve darstellen, die vor allem auch vom Gleichgewichtsabstand  $R_e$  der Atome im Molekül abhängt. Im Normalfall ist dieser im angeregten Zustand größer, da bei einer Elektronenanregung die Bindung der Atome meist schwächer wird. In diesen Potentialkurven liegen auch die unterschiedlichen Schwingungszustände, welche unterschiedlich stark angeregt werden. Das erklärt man anhand des Frank-Condon-Prinzips, welches davon ausgeht, dass die Bewegung der Elektronen sehr schnell stattfindet, im Vergleich zur Kernbewegung. Man geht also davon aus, dass im E-r-Diagramm die Elektronenübergänge meist senkrecht, bei gleichem Kernabstand stattfinden. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs dort am größten, wo sich die Kerne am längsten aufhalten, also an den Schnittpunkten der Schwingungsniveaus mit der Potentialkurve. Da die Wahrscheinlichkeitsbereiche jedoch endlich breit sind, gibt es keinen scharfen Übergang zu einem definierten Schwingungsniveau, sondern unterschiedlich wahrscheinliche Übergänge zu benachbarten Schwingungszuständen. Somit führt eine Absorption zu einem angeregten Elektronenzustand mit unterschiedlich stark angeregten Schwingungszuständen.

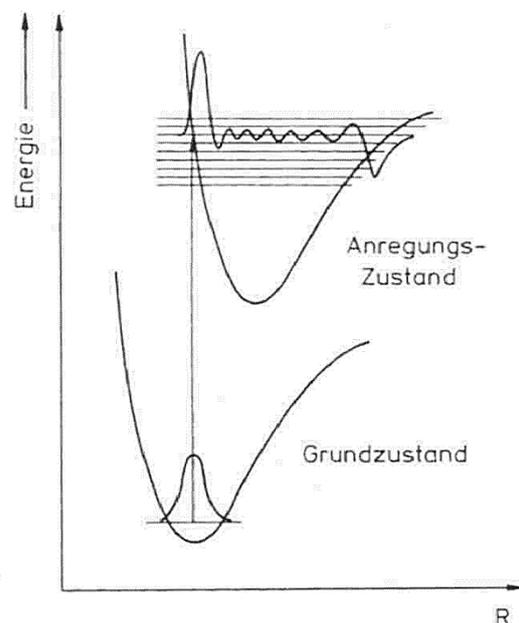


Abb. 8: Schematische Darstellung einer Elektronenanregung anhand des Franck-Condon Prinzips (Haken, et al., 2006 S. 275)

Bei der Emission gilt ebenfalls das Frank-Condon-Prinzip mit senkrechten Übergängen im E-r-Diagramm. Man erhält also die gleichen Bandenspektren wie bei der Absorption, jedoch meist mit kleineren Energien. Dies liegt daran, dass die Fluoreszenz meist aus dem niedrigsten Schwingungsniveau des angeregten Elektronenzustandes stattfindet, der jedoch bei einem größeren Kernabstand liegt. Die Übergänge der Schwingungsniveaus im angeregten Elektronenzustand zum niedrigsten Niveau, also Relaxation, erfolgen durch Stöße mit anderen Molekülen, wobei Energie abgegeben wird. Wie schnell diese Relaxation stattfindet hängt davon ab, wie die Wechselwirkungsmöglichkeit mit der Umgebung ist. Diese Übergänge finden bei kondensierter Phase der Moleküle im Bereich von Picosekunden statt. (Haken, et al., 2006 S. 273-280)

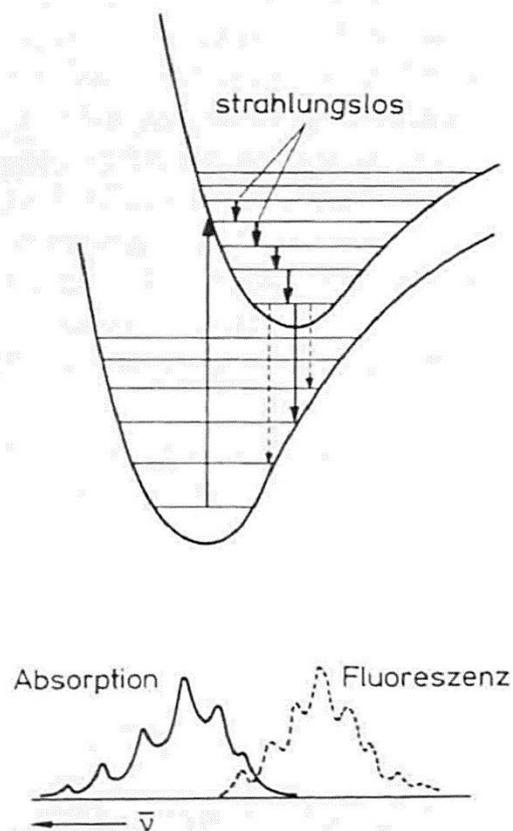


Abb. 9: Absorption und Fluoreszenz eines Moleküls (Haken, et al., 2006 S. 279)

## 2.3 Spektralphotometrie im UV- und sichtbaren Bereich

### 2.3.1 Lambert-Beersches Gesetz

Das Gesetz von Lambert-Beer gibt einen Zusammenhang zwischen der Intensität einer auf das Messobjekt fallenden Strahlung und der dort stattfindenden Absorption wieder. Zur Herleitung geht man von einer auftreffenden Strahlung mit Intensität  $I_0$  aus, die bei einem Durchgang durch eine Messküvette einen Teil ihrer Intensität durch Absorption verliert:

$$I = I_0 - I_A$$

Betrachtet man ein kleines Volumenelement der Dicke  $dl$  und der Querschnittsfläche  $F$  geht man davon aus, dass dort  $dI$  Photonen absorbiert werden. Die  $n$  Moleküle sind homogen verteilt und unabhängig voneinander, jedes besitzt einen Wirkungsquerschnitt  $q$ .

Durch Multiplikation von  $q$  mit der Wahrscheinlichkeit  $w$ , dass ein Photon von einem Molekül absorbiert wird, erhält man den Absorptionsquerschnitt  $k$ :

$$k = w \cdot q \text{ [cm}^2\text{]}$$

Somit erhält man für die im Volumenelement absorbierte Intensität:

$$-dI = k \cdot n \cdot dl \cdot I$$

oder durch Integration beider Seiten:

$$I = I_0 \cdot e^{-knl}$$

In der Forschung verwendet man auch oft eine andere Form dieser Gleichung:

$$I = I_0 \cdot 10^{-\epsilon cl}$$

Hier ist  $c$  die Konzentration der gemessenen absorbierenden Substanz in Mol und  $\epsilon$  der molare Extinktionskoeffizient in  $1/\text{Mol} \cdot \text{cm}$ , welcher für jede Molekülart unterschiedlich ist. Zu beachten ist, dass Moleküle bei verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich gut absorbieren, wodurch  $\epsilon$  auch eine Funktion der Wellenlänge ist. (Hoppe, et al., 1982 S. 107)

### 2.3.2 Molekülorbitale und deren Übergänge

Analog zu den Orbitalen der Atome existieren auch molekulare Orbitale, die durch die Bindung der Atome entstehen und in denen sich Elektronen bewegen können. In biologischen Molekülen unterscheidet man hier drei Grundzustandsorbitale:

- Bindende  $\sigma$ -Orbitale: Diese Orbitale bewirken eine Einfachbindung zwischen Atomen, welche sehr stark ist. Dadurch sind die Elektronen hier nicht delokalisiert und rotationssymmetrisch zur Bindung verteilt.

- Bindende  $\pi$ -Orbitale: Diese Orbitale treten bei Mehrfachbindungen der Atome auf, bedingt durch eine Überlagerung der atomaren p-Orbitale. Die Elektronen sind hier sehr frei, also delokalisiert, und können leicht in Wechselwirkung mit der Umgebung treten.
- n-Orbitale: Dies sind Orbitale, die durch Heteroatome wie Sauerstoff entstehen und ihren atomaren Charakter behalten haben, da sie nicht zur Bindung beitragen. Sie haben die höchste Energie.

Dazu gibt es zwei Typen an angeregten Orbitalen, in die Elektronen von den Grundorbitalen durch Absorption gelangen können:

- $\sigma^*$ -Orbitale: Da hier ein Knotenpunkt der Elektronenverteilung zwischen den Atomen vorliegt, spricht man von einem antibindenden Zustand. Die nötige Energie für eine  $\sigma \rightarrow \sigma^*$  Anregung ist sehr hoch (im Bereich von UV Strahlung). Bei Wasser, Äther, gesättigten Alkoholen und Aminen treten auch Anregungen von n zu  $\sigma^*$  auf.
- $\pi^*$ -Orbitale: Diese angeregten Orbitale sind ebenfalls wie der Grundzustand delokalisiert und antibindend. Energetisch sind  $\pi \rightarrow \pi^*$  Übergänge niedriger als  $\sigma$  Übergänge, weisen aber einen hohen Extinktionskoeffizienten auf. Die energetisch niedrigsten Übergänge sind  $n \rightarrow \pi^*$ .

Im Energiediagramm kann man die verschiedenen möglichen Übergänge und deren energetische Lage gut darstellen:

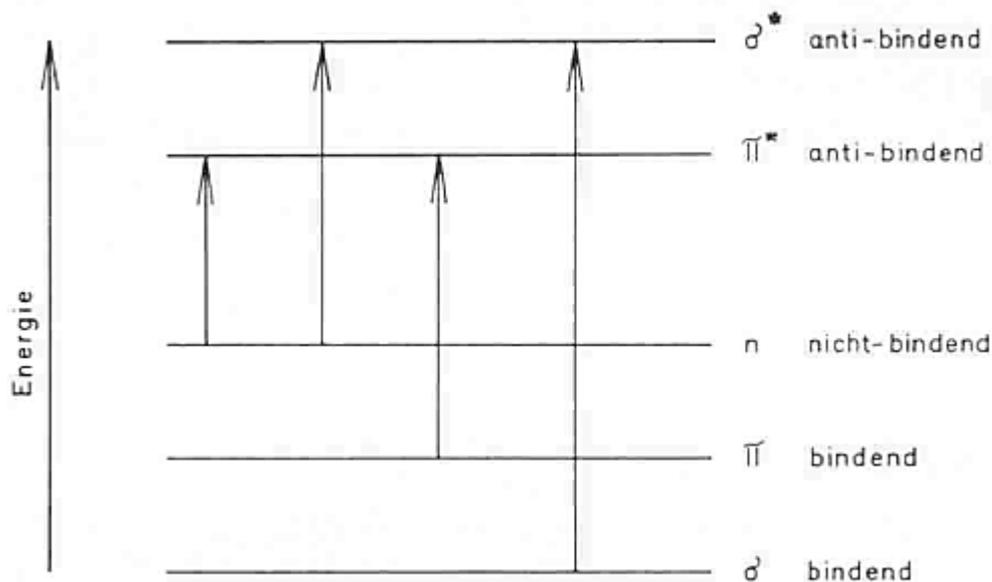


Abb. 10: Vereinfachte Darstellung der Übergänge zwischen Molekülorbitalen (Hoppe, et al., 1982 S. 108)

(Hoppe, et al., 1982 S. 108f) (Schünemann, 2005 S. 121f)

## 2.4 Farbmoleküle in Pflanzen

### 2.4.1 Chlorophylle

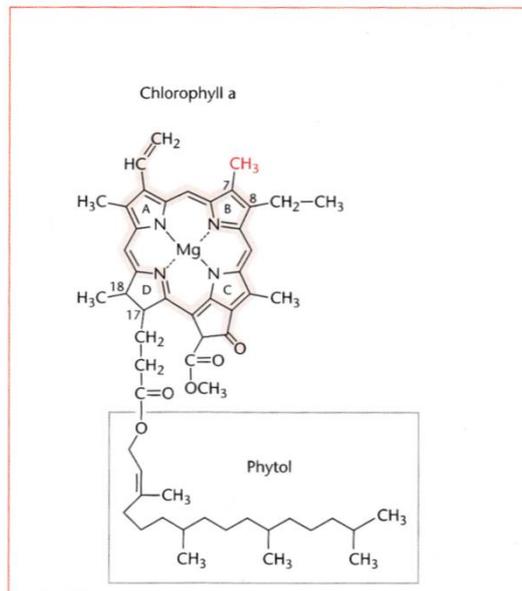


Abb. 11: Chemische Struktur des Chlorophyll a (E. Strasburger, 2008 S. 275)

Chlorophylle sind die wichtigsten Moleküle der Photosynthese und kommen in fast allen photosynthetisch aktiven Organismen vor. In ihrer chemischen Struktur sind Chlorophylle zyklische Tetrapyrrole mit einem isozyklischen Fünfering und einem zentralen Magnesiumion. Sie besitzen ein konjugiertes  $\pi$ -Elektronensystem, welches für die starken Absorptionen im blauen und roten Spektralbereich verantwortlich ist. Es handelt sich hierbei hauptsächlich um  $\pi \rightarrow \pi^*$  Übergänge, wobei aufgrund der Anwesenheit von Heteroatomen wie Stickstoff und Sauerstoff, auch  $n \rightarrow \pi^*$  Übergänge auftreten können. Diese haben jedoch eine sehr viel kleinere Oszillatorstärke und spielen in der Photosynthese somit eine untergeordnete Rolle. In höheren Pflanzen ist das Chlorophyll a (Chl a) am häufigsten vertreten, mit einer Absorption bei ca. 430 nm und 680 nm. Um die Lücke im grünen Bereich etwas zu verringern, bilden Pflanzen zudem noch Chlorophyll b (Chl b) aus, welches mit seinen Absorptionsmaxima von ca. 460 nm und 650 nm eher in den grünen Bereich geht. Zudem gibt es noch wenige strukturelle Varianten, wie z.B. Phaeophytine, die kein zentrales Metall-Ion aufweisen. Diese sind im Photosystem II im Reaktionszentrum lokalisiert und haben ein um ca. 200 mV geringeres Reduktionspotential als Chl a. Damit sind sie ein guter Elektronenakzeptor sind für den Anfang der Elektronentransportkette. Wichtig ist auch, dass die Chlorophylle im Proteinkomplex der Lichtsammelfallen durch die Wechselwirkung mit den Proteinen andere Spektren aufweisen als isoliert. Durch Überstrukturen in diesen Proteinkomplexen ist auch ein Ferntransport von Anregungsenergie möglich, der wichtig für die Photosynthese ist. (siehe 2.6) (Häder, et al., 1999 S. 71-74) (Hoppe, et al., 1982 S. 534f)

## 2.4.2 Carotinoide

Ebenfalls häufig in Pflanzen sind Carotinoide, Diterpene aus der Kondensation von zwei Molekülen Geranylgeranyl-pyrophosphat. Durch Variation der Anzahl an konjugierten Doppelbindungen der Moleküle kennt man heute mehr als 600 verschiedene Carotinoide. Die wichtigsten drei für die Photosynthese sind das  $\beta$ -Carotin, das Zeaxanthin und das Zeaxanthin. Neben der Lichtsammelfunktion wie die Chlorophylle haben Carotinoide durch ihre besondere elektronische Struktur die Möglichkeit, die Pflanze vor Lichtschäden zu schützen. Die genauen Vorgänge dazu werden im folgenden Abschnitt näher erläutert. (Häder, et al., 1999 S. 76ff)

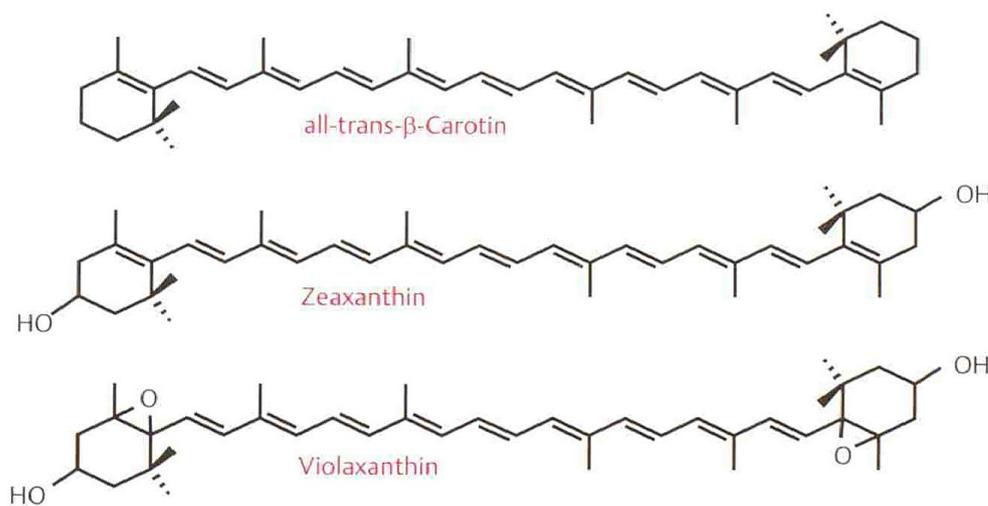
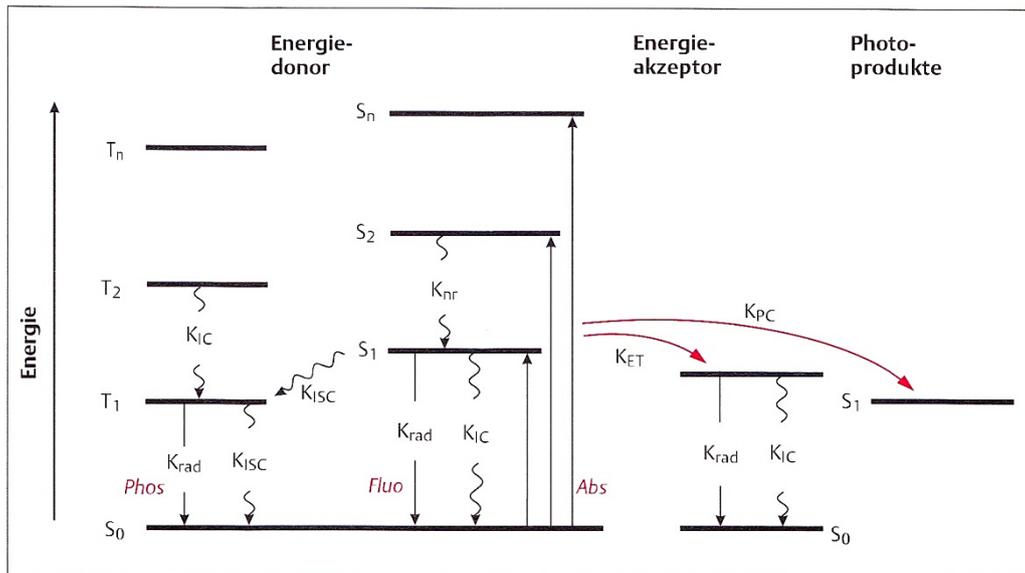


Abb. 12: Strukturformel der drei wichtigsten Carotinoide (Häder, et al., 1999 S. 77)

## 2.5 Absorption und Emission der Farbmoleküle

Um die Vorgänge der Strahlungsprozesse wie Absorption und Emission besser verstehen zu können, bedient man sich des Jablonski-Diagramms. Hier werden schematisch alle elektronisch/vibronischen Zustände der Moleküle und die photophysikalischen Prozesse, die die Zustände miteinander verbinden, dargestellt. Das photophysikalische Verhalten eines Moleküls, lässt sich durch genaue Festlegung der relativen energetischen Lagen der Zustände und der Geschwindigkeitskonstanten der Prozesse auch qualitativ beschreiben



**Abb. 13: Allgemeines Jablonski Diagramm mit den relevanten Elektronischen Zuständen.** Singulettzustände werden mit S und Triplettzustände mit T bezeichnet. Gerade Pfeile entsprechen Strahlungsprozessen (Absorption, Fluoreszenz und Phosphoreszenz mit der Geschwindigkeitskonstanten  $k_{\text{rad}}$ . Gewellte Pfeile sind strahlungslose Prozesse mit den Geschwindigkeitskonstanten  $k_{\text{ic}}$  für interne Konversion und  $k_{\text{isc}}$  für Intersystem Crossing. Die roten Pfeile sind photochemische Prozesse und Elektronentransfer ( $k_{\text{pc}}$ ) und Energietransfer ( $k_{\text{et}}$ ) (Häder, et al., 1999 S. 3)

Die angeregten Zustände entstehen durch Lichtabsorption aus dem Grundzustand. Da i.A. bei einem Übergang zwischen Zuständen nur ein Lichtquant pro Molekül ausgetauscht werden kann, muss dessen Energie genau der Differenz zwischen dem Grundzustand und dem angeregten Zustand entsprechen. Man nennt dies auch die Resonanzbedingung für Absorption:  $\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu_{\text{abs}}$  Der Grundzustand der meisten Photosynthesemoleküle ist der Singulettzustand mit einer geraden Zahl an Elektronen, bei dem jedes Orbital von zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin besetzt ist. Wird bei einer Anregung ein Elektron von einem besetzten in ein unbesetztes Orbital angehoben ohne, dass sich der Spin umkehrt hat man wieder einen Singulettzustand. Bei der Photosynthese ist dabei der niedrigste angeregte Zustand S<sub>1</sub> am interessantesten, da von ihm aus fast alle wichtigen photochemischen Prozesse ausgehen. Höhere angeregte Zustände des Chlorophyll relaxieren im ps-Bereich auf den ersten angeregten Zustand S<sub>1</sub>, welcher eine Lebensdauer von ca. 5 ns besitzt. Ohne photosynthetische Prozesse besteht von hier aus eine 1/3 Wahrscheinlichkeit, unter Strahlungsemission in den Grundzustand zurückzukehren (Fluoreszenz), und zu 2/3 die Möglichkeit, unter Intersystem Crossing in den niedrigsten Triplettzustand zu gehen. Kehrt ein Elektron bei einem Übergang seinen Spin um, spricht man von einem Triplettzustand. Dies ist nur möglich, wenn ein Orbital nur von einem Elektron besetzt ist, da aufgrund der Hundschen Regel zwei Elektronen in einem Orbital unterschiedlichen Spin haben müssen. Triplettzustände benennt man beginnend bei T<sub>1</sub>, da sie i.d.R. angeregte Zustände sind und

somit energetisch über dem Grundzustand  $S_0$  liegen. Da die Wahrscheinlichkeit einer Spinumkehr bei Absorption eines Lichtquants sehr gering ist, entstehen die meisten Triplettzustände nicht über Lichtanregung, sondern durch Intersystem Crossing aus dem  $S_1$  Zustand. Als Interne Konversion (IC) oder Intersystem Crossing (ISC) bezeichnet man eine strahlungslose Relaxation zwischen elektronischen Zuständen. Dabei steht IC für einen Übergang zweier Zustände mit gleicher Spinmultiplizität (z.B. von  $S_2$  zu  $S_1$ ) während ISC eine Relaxation zwischen zwei Zuständen unterschiedlicher Spinmultiplizität beschreibt (z.B. von  $S_1$  zu  $T_1$ ). Die Geschwindigkeit dieser Übergänge hängt von mehreren Faktoren ab. So ist die Geschwindigkeitskonstante bei IC sehr viel größer als beim ISC, da hier keine Spinumkehr stattfindet. Zudem ist der Energieunterschied der beteiligten Zustände wichtig, da die Relaxation umso langsamer abläuft, je größer dieser ist. Dies liegt daran, dass bei kleinerem Abstand der Überlapp der Wellenfunktion größer ist. So werden hohe angeregte Zustände meist sehr schnell ( $< 1$  ps) über strahlungslose Prozesse abgebaut, bis man bei den niedrigsten Anregungszuständen angelangt ist. Diese haben eine höhere Lebensdauer, da der Energieunterschied zum Grundzustand groß ist. Sie können somit auch über Fluoreszenz abgebaut werden oder ihre Anregungsenergie wird weitergeleitet. Daraus folgt auch, dass nicht die ganze Energie eines Photons für die Photosynthese nutzbar gemacht werden kann, sondern nur der Anteil, der den untersten angeregten Zuständen der Photosynthesepigmente entspricht.

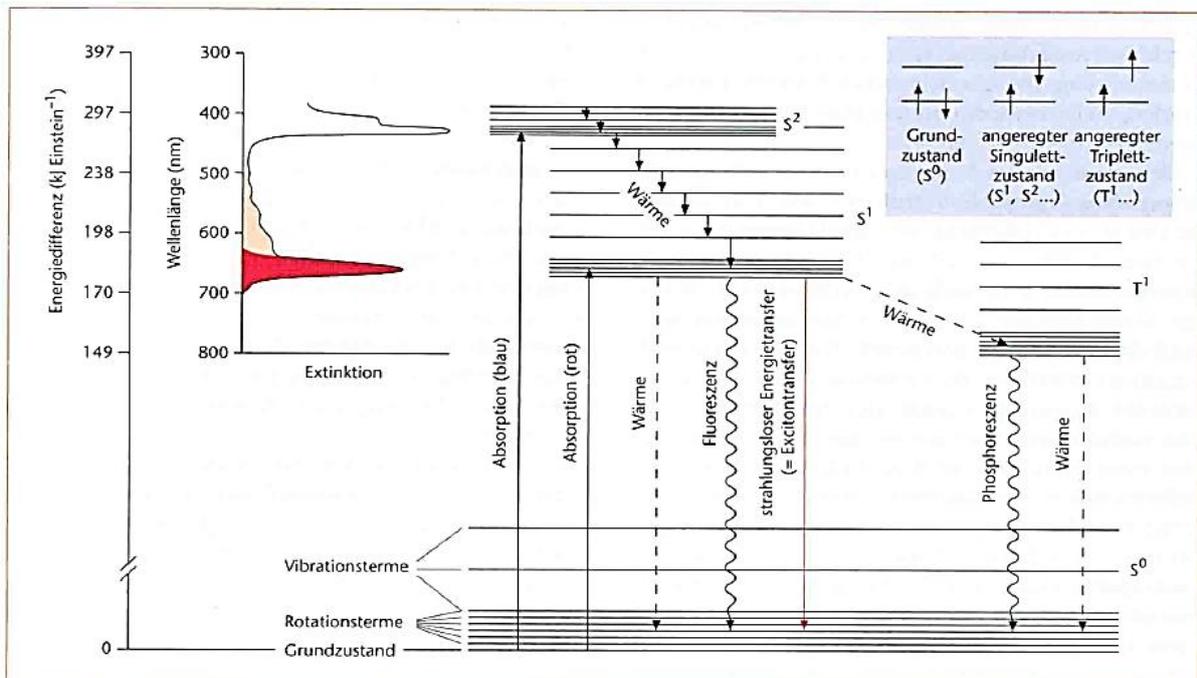


Abb. 14: Jablonski Diagramm des Chlorophyll a mit relevanten Elektronenzuständen und Übergängen (E. Strasburger, 2008 S. 279)

Betrachtet man z.B.  $\beta$ -Carotin im Jablonski-Diagramm, kann man sehen, dass hier der  $T_0$  Zustand eine sehr niedrige Energie (nur ca. 40 % der Energie des  $S_1$  Zustandes) aufweist. Dadurch kann das  $\beta$ -Carotin einerseits schädliche Tripletzustände des Chlorophylls aufnehmen und als Wärmestrahlung abbauen und andererseits auch schädliche Singulettzustände des Sauerstoffs aufnehmen. Sauerstoff ist eine Ausnahme, bei der im Grundzustand ein Triplet vorliegt und der erste Anregungszustand ein Singulett ist. Da der Übergang spinverboten ist, hat der Singulettzustand, wenn er einmal erreicht wurde, eine sehr lange Lebensdauer. Der Singulett Sauerstoff ist ein Zellgift, weil er sehr reaktiv ist und viele andere Moleküle schädigen kann. So können über  $\beta$ -Carotine größere Schäden vermieden werden, indem der Singulett-Sauerstoff in einem spinerlaubten Übergang seine Anregungsenergie auf  $\beta$ -Carotin überträgt.

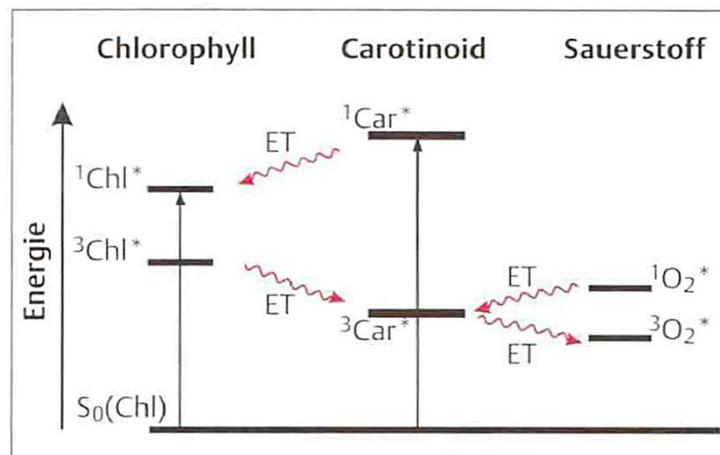


Abb. 15: Jablonski Diagramm zur Darstellung der Schutzfunktion von Carotinoiden gegen Triplets von Chlorophyll und Singulets von Sauerstoff (Häder, et al., 1999 S. 11)

Über den sog. Violaxanthinzyklus dienen Carotinoide zudem als Schutz bei übermäßiger Lichtintensität. Die beiden Enzyme Violaxanthin und Zeaxanthin lassen sich durch eine einfache chemische Reaktion ineinander umwandeln. Im Normalzustand liegt Violaxanthin vor, welches eine etwas höhere  $S_0$  Energie besitzt als Chlorophyll. So kann es als Donor wirken. Bei zu viel Lichtenergie werden in der Lichtreaktion ständig Protonen in das Lumen der Chloroplasten gepumpt. Die ATPase kann nur eine bestimmte Zahl an Protonen pro Zeit wieder nach außen lassen. Somit häufen sich die Protonen im Inneren an und führen zu einem niedrigeren PH Wert. Durch diesen wird die Umwandlung von Violaxanthin in Zeaxanthin aktiviert. Zeaxanthin hat einen niedrigeren  $S_0$  Zustand als Chlorophyll und kann nun als Akzeptor für Überschussenergie dienen.

Es bleibt noch die Frage offen, in welcher Weise die Energie der Anregungen zum Reaktionszentrum transportiert wird. Dies soll im Folgenden dargestellt werden.

(Häder, et al., 1999 S. 2-5) (Hoppe, et al., 1982 S. 535)

## 2.6 Energietransfer

Da angeregte Zustände nur eine begrenzte Lebensdauer haben, ist es nötig, die Energie schnell zum Reaktionszentrum zu transportieren um sie zur Ladungstrennung zu nutzen. Dabei müssen zum Teil auch große Entfernungen überwunden werden (mehrere Hundert Å), die meist in mehreren Schritten bewältigt werden. Die Übertragung der Anregungsenergie erfolgt über strahlungslose Prozesse, die sehr viel schneller ablaufen können als z.B. Fluoreszenz. Bei der Photosynthese gibt es zwei Mechanismen des Energietransfers, die sich stark unterscheiden: Der Förster-Energietransfer und der Dexter-Energietransfer. (Häder, et al., 1999 S. 4f)

### 2.6.1 Förster-Energietransfer

Grundlage des Förster-Energietransfers ist eine Dipol-Dipol Wechselwirkung zwischen den Übergangsmomenten des Donors und des Akzeptors. Wie bei der Van-der-Waals Bindung ist hier das Wechselwirkungspotential und auch die Geschwindigkeitskonstante proportional zur  $1/R^6$ . Man kann daran schon erkennen, dass der Förster-Energietransfer über weite Entfernungen möglich ist. Die Energie kann in einem Schritt bis zu 100 Å weit transportiert werden. Ein weiterer Faktor des Förstermechanismus ist der Orientierungsfaktor  $\kappa^2$ , welcher die relative Orientierung der Übergangsmomente der beiden Moleküle beschreibt. Er kann Werte von 0 bis 4 annehmen und beträgt bei einer statistischen Verteilung der Moleküle  $2/3$ . Um die Energie auch weitergeben zu können, muss zwischen dem Donator und dem Akzeptor eine energetische Resonanz der Übergänge bestehen. Dazu findet sich in der Gleichung für die Geschwindigkeitskonstante ein Term, der für ein Überlappungsintegral zwischen den beiden Molekülen steht. Die Gesamtgleichung zur Beschreibung der Geschwindigkeitskonstanten für den Förster Mechanismus ist:

$$k_{ET} \sim \frac{\kappa^2}{R^6 * n^4} * \frac{\Phi_F}{\tau_F} \int_0^\infty \frac{\epsilon_A(\nu) * I_F(\nu)}{\nu^3} d\nu = k_{rad} \frac{R_0^6}{R^6} \quad \epsilon_A : \text{Absorptionsspektrum Akzeptor}$$

$I_F$  : Fluoreszenzspektrum Donor, R: Abstand der Moleküle,  $\tau_F$  : Lebenszeit des angeregten Zustandes, n : Brechungsindex des Mediums,  $k_{rad}$  : Geschwindigkeitskonstante der Emission des Donors,  $\Phi_F$  : Fluoreszenzquantenausbeute des Donors.

Üblicherweise vereinfacht man die Formel für ein gegebenes Donor-Akzeptor-Paar, indem man alle Parameter zum sog. Förster-Radius  $R_0$  zusammenfasst. Dieser gibt den Abstand der Moleküle an, bei dem die Energieübertragungswahrscheinlichkeit gerade 50 % beträgt. Schematisch dargestellt in Abbildung 16 kann man die Energieübertragung nachvollziehen: Während ein angeregtes Elektron des Donors in den Grundzustand zurückkehrt, wird ein Elektron des Akzeptors aufgrund der Resonanzkopplung in einem strahlungslosen Prozess in den angeregten Zustand gehoben. Es erfolgt dabei also keine Elektronenübertragung, sondern nur eine Übertragung der Anregungsenergie. Der häufigste Fall ist ein Singulett-Transfer bei dem Donor und Akzeptor Singulettzustände vorweisen. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass der in der Photosynthese vorherrschende Energietransfermechanismus der Förster-Transport ist. Es gibt jedoch Ausnahmen, z.B. beim Transport von Energie von Carotinoiden zu Chlorophyllen. Da der  $S_1$  Zustand von Carotinoiden sehr kurzlebig ist (ca. 10 ps), kann der Energietransport nicht über den Förster-Mechanismus ablaufen. Weil Carotinoide zudem meist in sehr kleinem Abstand zu Chlorophyllmolekülen liegen, geht man hier von einem anderen Energietransfermechanismus aus. (Häder, et al., 1999 S. 5-7)

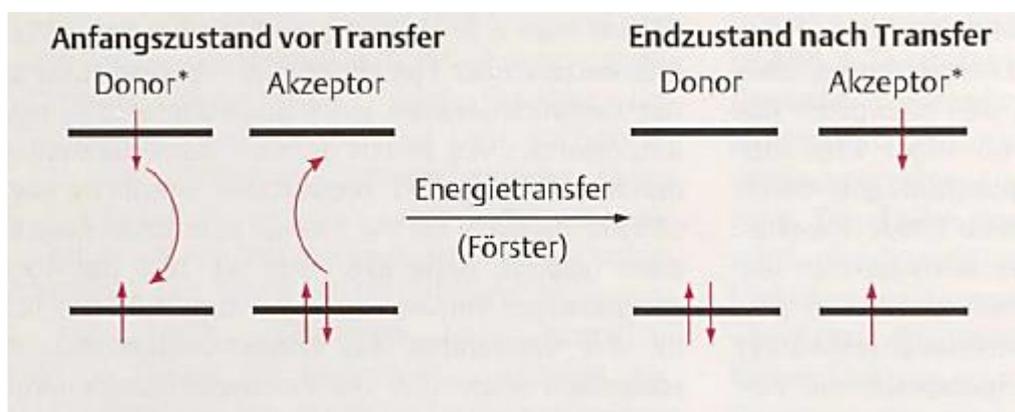


Abb. 16: Prinzip des Förster Energietransfers (Häder, et al., 1999 S. 8)

## 2.6.2 Dexter-Energietransfer

Der Dexter-Energietransfer wird auch Austauschtransfer genannt, da hier, im Gegensatz zum Förster-Mechanismus, Elektronen zwischen Donor und Akzeptor ausgetauscht werden. Grundlage dafür ist ein direkter Überlapp der Wellenfunktionen der beiden Moleküle. Da diese außerhalb eines Moleküls normalerweise sehr schnell gegen Null gehen, benötigt man für den Dexter Energietransfer einen sehr geringen Abstand zwischen Donor und Akzeptor. Auch hier ist die Resonanz zwischen den Energieübergängen der beiden Moleküle wichtig, damit der Energietransfer funktioniert. Die Beziehung der Geschwindigkeitskonstanten für

diesen Mechanismus ist einfacher als beim Förster-Energietransfer:  $k_{ET} = e^{-\alpha R}$

( $\alpha$ : Dexterkoeffizient, R: Abstand Donor-Akzeptor)

Man sieht hieran, dass die Geschwindigkeitskonstante exponentiell mit dem Abstand abnimmt, was die Reichweite des Energietransportes einschränkt.

Findet man gleichartige Moleküle, die sich in sehr geringem Abstand zueinander befinden ( $<6-8 \text{ \AA}$ ) wie z.B. bei Chlorophyllmolekülen im Reaktionszentrum (Special Pair), ist eine messbare Veränderung im Spektrum des Donors und des Akzeptors erkennbar. Es kommt zu einer starken Kopplung der elektronischen Zustände, der sog. Excitonen Wechselwirkung.

(Häder, et al., 1999 S. 6f)

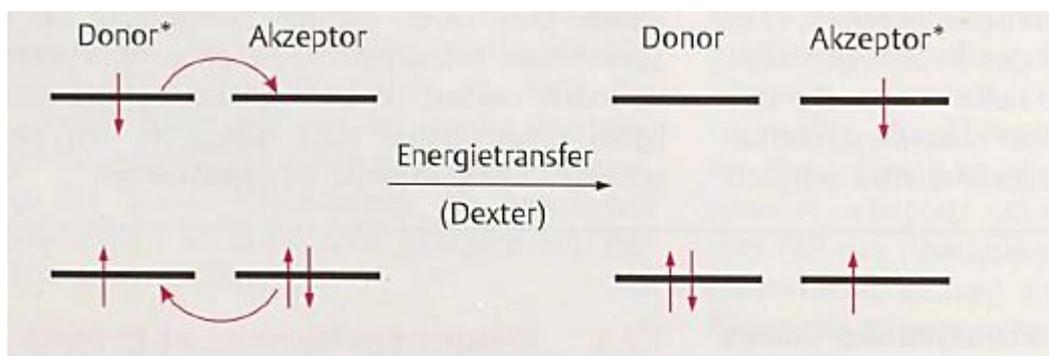


Abb. 17: Prinzip des Dexter Energietransfer (Häder, et al., 1999 S. 8)

### 2.6.3 Excitonen-Wechselwirkung

Da sich die energetischen Zustände zweier gleicher Moleküle in perfekter Resonanz befinden, findet bei sehr geringem Abstand eine starke elektronische Kopplung statt. Man beschreibt diese Zustände nicht mehr mit zwei getrennten Molekülen, sondern verbindet die Elektronensysteme beider Moleküle zu einem Supermolekül. Die Dipol-Dipol-Wechselwirkung ist auf diesem geringen Abstand so stark, dass sich die Energiezustände der Moleküle aufspalten und sich neue excitonische Energiezustände für das Supermolekül finden. Eine Anregung bzw. Weitergabe von Energie wird hier auch nicht mehr als Energietransfer beschrieben, sondern vielmehr als eine Interne Konversion des Supermoleküls. Es verändern sich also die photophysikalischen Eigenschaften der Moleküle mit anderen Geschwindigkeitskonstanten und auch anderen elektrochemischen Eigenschaften. Dies ist wichtig für die Elektronenweitergabe des Special Pairs zum Primären Donor der Elektronentransportkette. (Häder, et al., 1999 S. 9f)

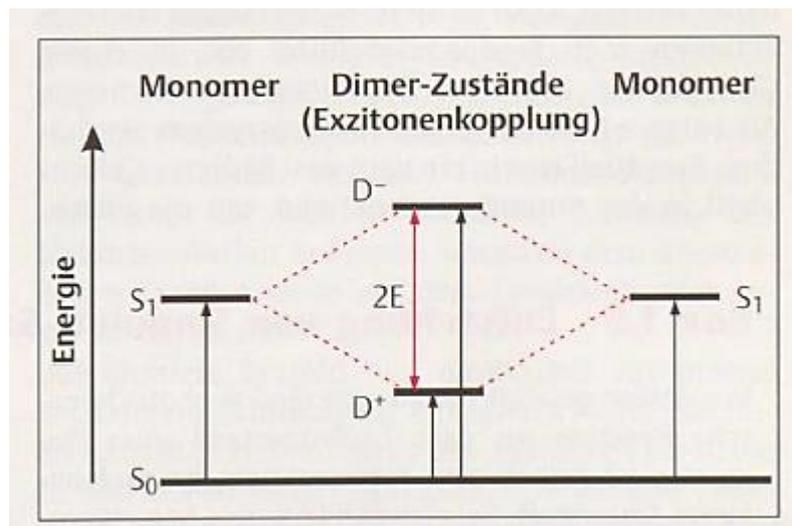


Abb. 18: Schematische Darstellung der Excitonenwechselwirkung (Häder, et al., 1999 S. 9)

## 2.7 Das Charge-Coupled Device

Die Entwicklung des Charge-Coupled Device oder kurz CCD fand in den 70er Jahren in den USA statt. Willard Boyle und George Smith waren in einer Forschungsgruppe, die nach neuen magnetischen Speichern suchte. Man wollte elektrische Ladungen in Form von Bits, also 0 oder 1, in magnetischen Domänen ablegen und diese zum Auslesen an den Rand des Speicherelements transportieren lassen. Die beiden Forscher konzipierten ein Speichermodell mit Elektroden über einem Halbleiter, die bei Anlegen einer entsprechenden Spannung im Halbleiter einen Potentialtopf formen. Über eine Reihe von drei Spannungspulsen können die Ladungen in den nächsten Topf transportiert werden, so dass man am Ende den Bit am Rand auslesen kann. Die ersten solcher Bauelemente bestanden nur aus einer Zeile und waren noch kein flächenhaftes Element. Man erkannte jedoch bald die Möglichkeit das CCD auch für optische Zwecke zu nutzen. So werden je nach Wellenlänge und Lichtintensität unterschiedlich viele Elektronen im Halbleiter über den Photoeffekt freigesetzt. Dies kann man nutzen, um über die ausgelesene Ladung an den Elektroden Rückschlüsse über diese beiden Faktoren zu machen. In Japan wurde sehr stark an dieser Möglichkeit geforscht und schließlich 1980 die erste CCD Kamera hergestellt. Heutzutage ist die Technik, mit Hilfe von CCDs digitale Bilder zu erzeugen oder spektroskopische Untersuchungen zu betreiben, sehr weit entwickelt und aus der heutigen Welt nicht mehr wegzudenken. Boyle und Smith bekamen 2009 den Nobelpreis für die Entwicklung des CCD. (Queisser, 2009)

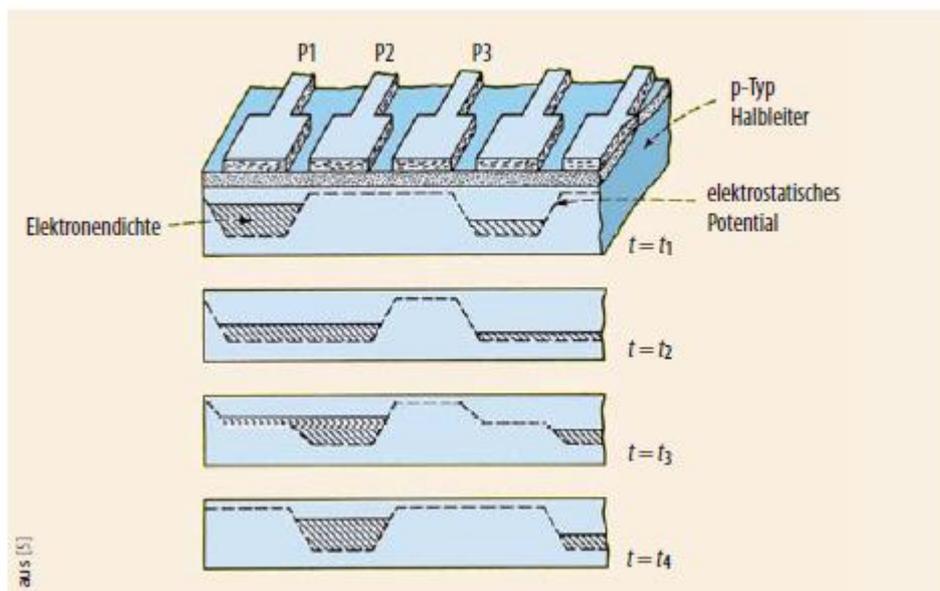


Abb. 19: Darstellung eines CCD. Die Elektroden P1 etc. erzeugen Potentialtöpfe im Halbleiter in denen Ladungen gefangen sind. Über drei Pulse lassen sich die Ladungen von einer Elektrode zur Nächsten transportieren. (Queisser, 2009)

### 3. Arbeitstechniken und Geräte

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Arbeitstechniken und Geräte, die in der konzipierten Unterrichtseinheit zum Einsatz kommen, vorgestellt. Für Bilder zur Chromatographie und der Extrakterstellung siehe Anhang (Schüler- und Lehrerhandout, Verwendete Folien).

#### 3.1 Extraktion von Blattfarbstoffen

Zur Untersuchung des Absorptions- und Emissionsverhaltens von Blattfarbstoffen müssen diese erst aus der Pflanze gewonnen und anschließend aufgetrennt werden. Der Großteil der Farbstoffe der Blätter ist in den Lichtsammelfallen der Chloroplasten gebunden. Es gibt jedoch auch andere Zellorganellen, wie die Vakuole, in denen Farbstoffe gespeichert sind. Um nun an die Farbstoffe zu kommen, muss man zuerst die Zellen und die Zellorganellen mechanisch aufbrechen und die austretenden Farbstoffe in eine Lösung aufnehmen. Die hier verwendete Methode ist eine sehr einfache, jedoch auch nicht allzu genaue Möglichkeit, die Farbstoffe zu extrahieren. Dazu werden ca. 5 g Blätter einer Pflanze mit 1 TL feinem Sand, unter Zugabe von einer Spatelspitze Calcium-Carbonat, im Mörser gemahlen, um die Zellen aufzubrechen. Das Calcium-Carbonat dient hier zur Pufferung des sauren Pflanzensaftes, um die Farbstoffe vor Zerstörung zu schützen. Unter Zugabe von 10 ml Aceton werden die frei werdenden Farbstoffe gelöst und es entsteht eine gefärbte Acetonlösung. Anschließend filtrierte man das Gemisch durch einen Papierfilter um die größten Zellbestandteile zu entfernen. Der hergestellte Extrakt enthält neben vielen anderen Pflanzenstoffen, die nicht vom Filter abgehalten werden, ein Gemisch aller verschiedener Farbstoffe, die im Blatt enthalten waren. Um aus diesem Extrakt das Chlorophyll einzeln zu isolieren bedient man sich im Folgenden der Chromatographie. (Röka Wiki)

#### 3.2 Chromatographie

Allgemein bezeichnet man als Chromatographie Verfahren, um chemische Verbindungen voneinander zu trennen. Dabei kann man sich die unterschiedliche Ladung, Größe und Form oder Bindung an andere Materialien der Verbindungen zur Selektion zu Nutze machen. Zur Trennung wird die Probe in einer mobilen Phase, eine Flüssigkeit oder ein Gas, gelöst. Diese wird über eine stationäre Phase (in einer Säule oder einem Flachbett) bewegt und je nach Wechselwirkung der Komponenten der Probe mit der stationären Phase werden diese bei genügend langer Laufzeit aufgetrennt. Man unterscheidet allgemein zwischen einem inneren

Chromatogramm, bei dem die Komponenten der Probe in gleicher Zeit unterschiedlich weit wandern und sich am Ende noch in der stationären Phase befinden, in der sie detektiert werden, und einem äußeren Chromatogramm. Hier handelt es sich um Säulenchromatogramme, bei denen die Komponenten der Probe alle die gleiche Wegstrecke zurücklegen, jedoch zu verschiedenen Zeiten am Ende der Säule ankommen, wo sie auch äußerlich detektiert werden können. Die beiden wichtigsten Trennmechanismen bei der Wechselwirkung zwischen stationärer und mobiler Phase sind die Adsorption und die Verteilung. Bei der Adsorption findet eine direkte Wechselwirkung der Komponenten der Probe mit der stationären Phase statt. Sie überwiegt vor allem bei GSC (Gas-Solid-Chromatography) und LSC (Liquid-Solid-Chromatography). Bei der Verteilungschromatographie hingegen, die vor allem bei GLC (Gas-Liquid-Chromatography) und LLC (Liquid-Liquid-Chromatography) vorkommt, ist die stationäre Phase immobilisiert und flüssig verteilt. Um ein Chromatogramm genau beschreiben zu können, bedient man sich verschiedener Kenngrößen, wie der Wanderungsgeschwindigkeit, der Retentionszeit, des Verteilungskoeffizienten und dem Trennfaktor. Auf diese Größen soll aber hier im Weiteren nicht eingegangen werden, da sie für die Anwendung in vorliegender Arbeit nicht nötig sind. (Otto, 2000 S. 367-374)

Eine der einfacheren Methoden ist die Dünnschichtchromatographie (DC), bei der man die Substanzen aufgrund ihrer Wechselwirkung mit zwei verschiedenen Phasen an Lösungsmitteln auftrennt. Es gibt eine polare und eine apolare Phase im Lösungsmittel, in das eine DC-Platte gestellt wird. Aufgrund der stärkeren Wechselwirkung mit der Oberfläche der DC-Platte wird die polare Phase über Kapillarkräfte langsamer die Platte hochlaufen, man nennt sie deshalb auch stationäre Phase. Dahingegen wird die apolare Phase schneller laufen und deswegen als mobile Phase bezeichnet. Chemische Verbindungen, die stärker mit der polaren Phase wechselwirken, werden also langsamer auf der DC-Platte laufen als solche die eher in der mobilen Phase gelöst sind. In dieser Arbeit wurde als DC-Platte eine Kieselgelplatte mit einer molaren Masse von 60 g/mol (Kieselgel 60) verwendet. Das Laufmittel war ein Gemisch aus Petrolbenzin und Isopropanol im Verhältnis 10:1. Spinat enthält vier Farbstoffe: Chlorophyll a ( $R = -CH_3$ ), Chlorophyll b ( $R = -CHO$ ),  $\beta$ -Carotin und mehrere Xantophylle. Aufgrund der verschieden geladenen Restgruppen der Moleküle werden diese in einer DC-Chromatographie aufgetrennt. Dabei läuft das  $\beta$ -Carotin fast komplett mit der mobilen Phase, während Chl a und b stärker mit der stationären Phase wechselwirken und sich weiter unten auf der DC-Platte auftrennen. Unterhalb der Chlorophylle findet man noch mehrere Xantophylle aufgetrennt. (Kalbacher) (Röka Wiki)

### 3.3 Messung der Absorption/Emission von Farbstoffen

Um das Absorptionsverhalten von Chlorophyll a zu analysieren wurden drei verschiedene Schulspektrometer verwendet. Diese messen die Transmission bzw. Extinktion von Lösungen gegenüber einer Referenzlösung. Der Messbereich der Spektrometer geht dabei von 350nm bis 1000nm, umfasst also den ganzen sichtbaren Bereich des Lichts und geht noch in den Infrarotbereich hinein. Um nun einen bestimmten Farbstoff analysieren zu können, wurde die entsprechende Bande auf den Kieselgelplatten mit einem Spatel abgekratzt und in eine Küvette mit Ethanol überführt. Als Referenzlösung diente eine Küvette mit reinem Ethanol ohne Farbstoffbande.

Die Messung mit den verschiedenen Programmen folgt einem gleichen Schema:

- Zuerst wird mit dem Messprogramm das Untergrundspektrum des Umgebungslichtes herausgenommen.
- Anschließend wird das Messlicht des Spektrometers angeschaltet.
- Mit + und – wird die Integrationszeit des CCD Array so geändert, dass das komplette Spektrum des Messlichtes sichtbar ist. (ca. bei 18 ms)
- Als nächstes wird die Referenzlösung hineingestellt und mit Klick auf den Reiter „Referenz“ diese Lösung als Referenz für die Extinktionsmessung festgelegt.
- Nun kann die eigentliche Messküvette mit dem Farbstoff in den Küvettenhalter gestellt werden und mit Klick auf den Reiter „Extinktion“ das Absorptionsspektrum dargestellt werden.
- Gegebenenfalls muss eine Skalierung der Messachsen vorgenommen werden um das Spektrum besser sichtbar zu machen.
- Mit Pause bzw. Speicherausgang kann man das gemessene Spektrum speichern und in Ruhe genauer betrachten.

Bei den gemachten Messungen von Chlorophyll a konnten deutlich die beiden Absorptionsmaxima bei ca. 430 nm und bei ca. 660 nm gemessen werden. Jedoch fand sich in den ersten Messungen ein breites Untergrundspektrum bei allen Wellenlängen. Dieses lässt sich jedoch teilweise durch das Kieselgel erklären: Reines Kieselgel in Ethanol gelöst ergab ein ähnliches Untergrundspektrum. Da beim Abkratzen der Farbstoffbanden auch Kieselgel mit in die Lösung gelangt, erhält man dieses Untergrundspektrum. Achtet man darauf, beim Abkratzen der Chlorophyll Banden möglichst wenig Kieselgel mitzunehmen, erhält man ein aussagekräftiges Spektrum.

### 3.4 Die Spektrometer im Vergleich

Die drei verwendeten Spektrometer sind von den Firmen Leybold, Phywe und Pasco/Conatex. Hier eine tabellarische Kurzübersicht:

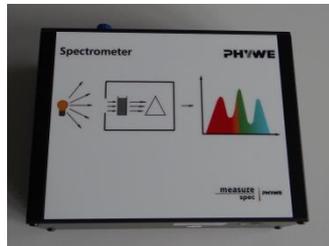


Tabelle 1: Kurzübersicht über die Daten der drei Verwendeten Spektrometer (Conatex) (Phywe) (Leybold)

	<b>Phywe</b>	<b>Leybold</b>	<b>Pasco / Conatex</b>
<b>Ausstattung</b>	Messgerät, Lichtleiter, Küvettenhalter, USB Kabel Stromanschluss	Messgerät, Lichtleiter, Küvettenhalter, USB Kabel	Messgerät, Lichtleiter, Küvettenhalter, USB Kabel Stromanschluss
<b>Messprogramm</b>	MeasureSpec	SpectraLab	Quantum
<b>Messbereich</b>	350-850 nm	350-1000 nm	350-850 nm
<b>Auflösung</b>	4 nm	2 nm	3 nm
<b>Messlicht</b>	Wolframlampe	Wolframlampe + blaue LED	Wolframlampe
<b>Preis</b>	1963,50 €	2391,90 €	968,06 €



Abb. 20: Externen Küvettenhalter der Firma Phywe



Abb. 21: Die mitgelieferten Lichtleiter mit 40 bzw. 400 µm Fenster

### 3.4.1 Vergleich der Handhabung

Alle drei Geräte werden mit vollständigem Zubehör geliefert, sodass eine sofortige Inbetriebnahme möglich ist. Die Spektrometer von Phywe und Pasco (Vertriebspartner in Deutschland: Conatex) sind im Prinzip baugleich von derselben Firma (Ocean Optics) gefertigt. So ist die Bedienung dieser beiden Spektrometer auch äquivalent. Bei dem mitgelieferten Küvettenhalter handelt es sich ebenfalls um das gleiche Modell, sodass die Bedienung auch hier gleich verläuft. Bei beiden Modellen ist der Küvettenhalter extern an eine Stromquelle anzuschließen, um die Wolfram Glühbirne zu betreiben. Diese hat keinen extra Schalter sondern brennt kontinuierlich, sobald der Stromanschluss besetzt ist. Der Halter hat zwei Anschlüsse für Lichtleiter: der hintere befindet sich genau gegenüber der Lampe und dient zur Messung von Absorptionsspektren während der seitliche Anschluss im 90° Winkel zur Lichtquelle steht und für Fluoreszenzmessungen benutzt werden kann. Bei dem Anschluss an das Spektrometer ist vor allem darauf zu achten, den Lichtleiter nicht zu knicken und in einem maximalen Radius von 10 cm zu legen, um eine optimale Weiterleitung des Signals zu gewährleisten. Das Spektrometer selbst wird über einen einfachen USB Port an den Computer angeschlossen. Im Zubehör zu den Küvettenhaltern findet sich ein kleiner Imbusschlüssel, um eine defekte Glühbirne austauschen zu können, sowie ein kleiner Rechteckspiegel, der bei Fluoreszenzmessungen in den Halter eingebracht wird und das Signal verstärken soll. Die Handhabung beider Geräte ist intuitiv einsichtig und erfordert kein großes Geschick. Nur der Anschluss des Küvettenhalters erfordert etwas Vorsicht und ist aufgrund der extra Stromquelle etwas eingeschränkt in der Mobilität.

Das Gerät von Leybold wird mit einem Küvettenhalter geliefert, welcher über Schrauben direkt an den Lichtleitereingang des Spektrometers befestigt werden kann. Es gibt hier nur einen Ausgang zur Messung eines Absorptionsspektrums. Ein externer Stromanschluss ist nicht nötig, da die Messlampe über den USB Port des Computers betrieben wird. Außerdem wird das Messlicht bei dem Gerät von Leybold über die Software ein- und ausgeschaltet und läuft nicht im Dauerbetrieb. Man muss hier das Spektrometer nur über USB anschließen, um eine Messung zu starten, was eine bessere Mobilität gewährt. Ein Nachteil durch den festen Anschluss des Küvettenhalters ist, dass ein schneller Wechsel zum einfachen Lichtleiter hin, (um z.B. ein Sonnenspektrum aufzunehmen) Zeit und Fingerspitzengefühl erfordert, um die Schrauben zu lösen.

Insgesamt, im Vergleich aller drei Spektrometer, ist das Gerät von Leybold am einfachsten zu handhaben und auch am mobilsten einsetzbar. Vor allem die Tatsache, dass hier kein externer Stromanschluss notwendig ist und das Messlicht manuell gesteuert werden kann, sprechen für

dieses Gerät. Auch bei den Messungen zeigte sich die bessere Auflösung dieses Gerätes als positiv. Während bei den anderen beiden Geräten das Spektrum oft stark schwankte, gerade im Blauen, konnte man bei dem Spektrometer von Leybold schönere Messergebnisse erzielen. Die Möglichkeit bei den beiden anderen Spektrometern am seitlichen Ausgang die Fluoreszenz zu messen wurde getestet, brachte jedoch kein aussagekräftiges Ergebnis. Das Gerät von Leybold ist zudem von den Abmessungen her das kleinste der drei Spektrometer.

### 3.4.2 Vergleich der Software

Für eine genauere Beschreibung der Benutzung aller drei Programme wird hier auf die Kurzanleitungen im Anhang verwiesen. Genau wie bei der Handhabung der Geräte, ist auch hier die Bedienung der beiden Programme MeasureSpec und Quantum gleich, da es sich um dieselbe Software handelt. Wird das Programm bei angeschlossenem Spektrometer gestartet, so beginnt der Messvorgang automatisch und es wird die gemessene Intensität dargestellt. Die Oberfläche des Programmes ist nicht gleich intuitiv verständlich, da es viele Symbole ohne Beschriftung gibt. Positiv zu bewerten sind hier die verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten beim Messen, wie das Mitteln und Glätten der Kurve. Die Skalierung der Achsen muss extra über einen Button getätigt werden, wobei man darauf achten muss, die Eingaben mit dem amerikanischen System, also Punkt statt Komma für Dezimalstellen, zu tätigen. Die Messung an sich kann nicht pausiert werden, über einen Speicherauszug wird die momentane Messkurve als Linie im Diagramm gespeichert. So können auch mehrere Linien nacheinander gespeichert werden, jedoch wird unterhalb der gespeicherten Kurven die Farbe nicht mehr dargestellt und kann auch nachträglich nicht mehr eingefügt werden. Das gemessene Spektrum kann einerseits als Bild, als Messdatei oder in Form einer Exceltabelle gespeichert werden. Positiv an MeasureSpec und Quantum ist auch, dass sich Referenzlinien von vielen Elementen im Spektrum darstellen lassen. So kann man z.B. die Linien für Wasserstoff einem gemessenen Sonnenspektrum überlagern und sieht, dass die Linien genau an der Stelle sind, an denen das gemessene Spektrum einbricht.

Das Programm SpectraLab von Leybold erscheint übersichtlicher und intuitiv leichter zu bedienen, da hier viele Reiter beschriftet sind oder gängige Symbolzeichen für die Buttons benutzt werden. Die Messung startet hier auch automatisch nach Start des Programms, kann aber hier, im Gegensatz zu den anderen Programmen, pausiert oder ganz gestoppt werden. Die zugehörigen Farben zu den Wellenlängen werden bei SpectraLab automatisch mit dargestellt und sind auch bei einer pausierten Messung noch ersichtlich. Die Skalierung der Achsen lässt sich bei diesem Programm einfach durch Drag-and-Drop an der Achsenbeschriftung bewerkstelligen. Im Reiter Diagramm können verschiedene

Funktionseinstellungen getätigt werden, um eine Messung durch eine Kurve zu fitten oder genauer zu analysieren. Für die in dieser Arbeit getätigten Messungen waren diese Funktionen nicht nötig und können daher nicht weiter beurteilt werden. Im Gegensatz zu den beiden anderen Programmen ist es bei SpectraLab nicht möglich die Kurve zu glätten bzw. zu mitteln. Es gibt zwar eine Mittelfunktion, aber hier lässt sich nicht vorgeben über wie viele Messungen gemittelt werden soll. Solange der Button gedrückt ist, wird über alle folgenden Messungen gemittelt.

Im Fazit ist das Programm von Leybold sehr viel einsichtiger und übersichtlicher und somit leichter zu bedienen. Hier fehlen jedoch manche Einstellungsmöglichkeiten der beiden anderen Programme. Eine Mischung aus allen drei Programmen wäre das Beste.

### **3.4.3 Messergebnisse**

Im Folgenden werden einige Messbilder der drei verschiedenen Programme gezeigt. Neben Chlorophyll a wurden teilweise auch der gesamte Spinatextrakt (also mit allen Farbstoffen) und das Sonnenspektrum aufgenommen. Bei der Chlorophyll Messung erkennt man bei allen drei Messungen deutlich die Maxima im blauen und roten Lichtbereich. Bei den Messungen mit Quantum und MeasureSpec ist der blaue Bereich nicht so gut aufgelöst und zeigt kein so schönes enges Maximum wie bei SpectraLab. Da es in der konzipierten Unterrichtsstunde aber nur darum ging zu zeigen, wo die Maxima ungefähr sind, und nicht genau bei welcher Wellenlänge, ist das nicht sehr schlimm. Bei den Bildern von Quantum und MeasureSpec, in denen die Farbe unter dem Graphen noch zu sehen ist, handelt es sich um Screenshots, da das die einzige Möglichkeit ist, das Spektrum eingefärbt zu erhalten.

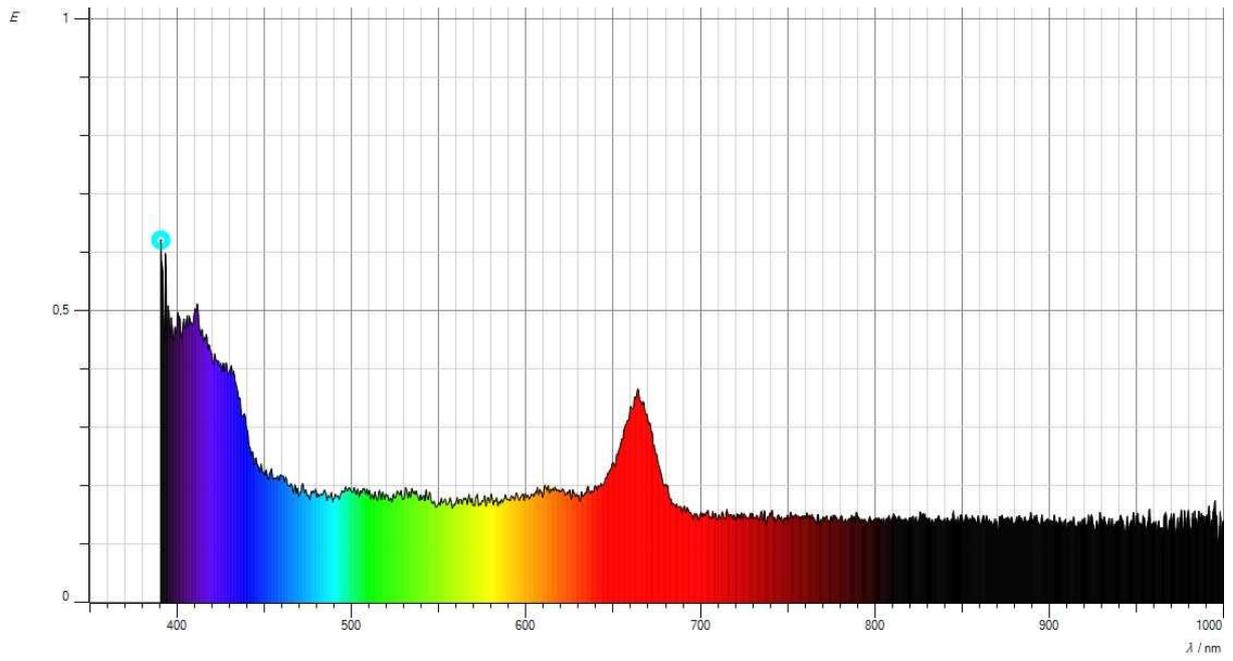


Abb. 22: Chlorophyll a mit Leybold (Spectra Lab)

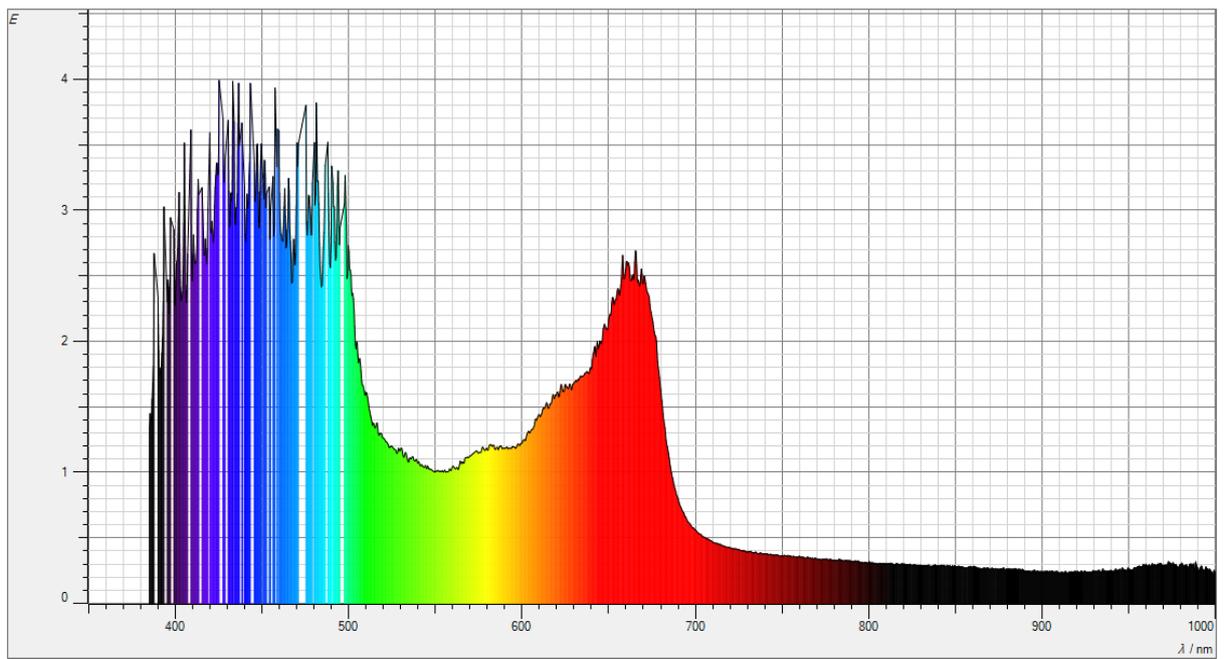


Abb. 23: Aufnahme des gesamten Spinatextraktes (SpectraLab)

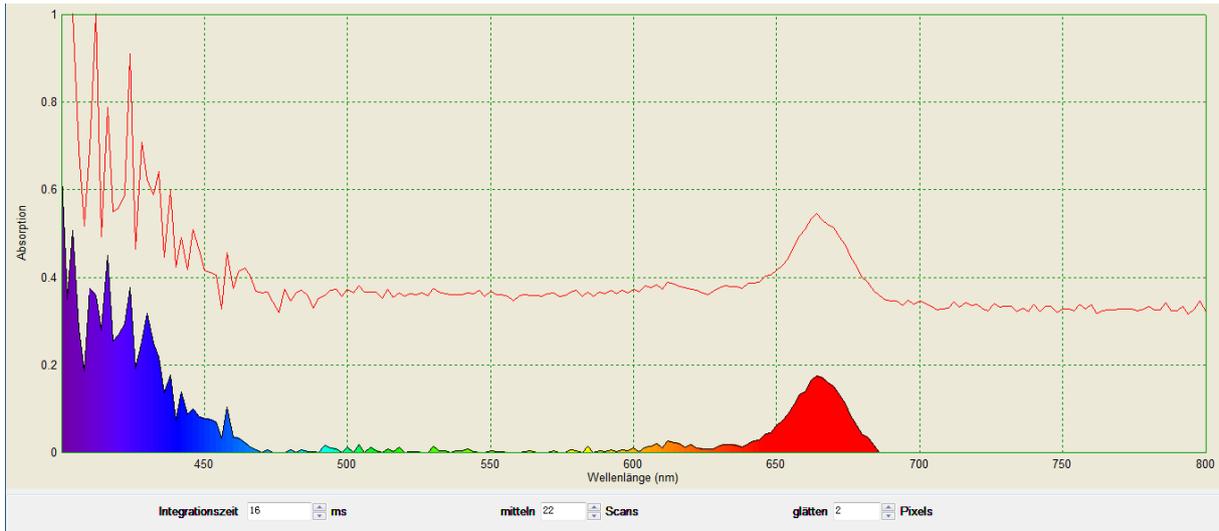


Abb. 24: Chlorophyll a gemessen mit Amadeus (Quantum)

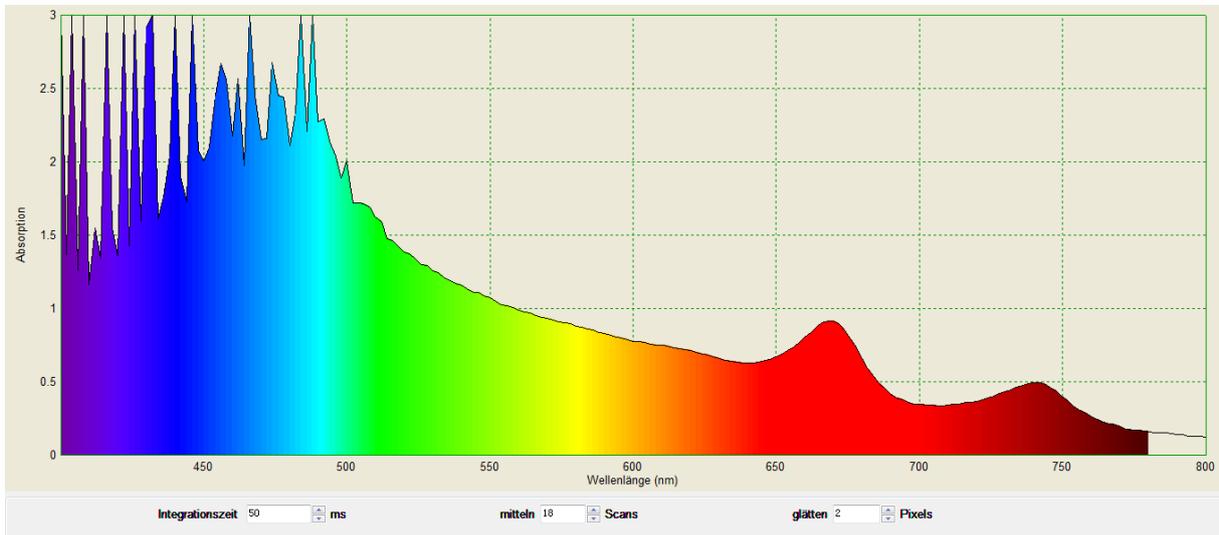


Abb. 25: Gesamter Spinatextrakt (Quantum)

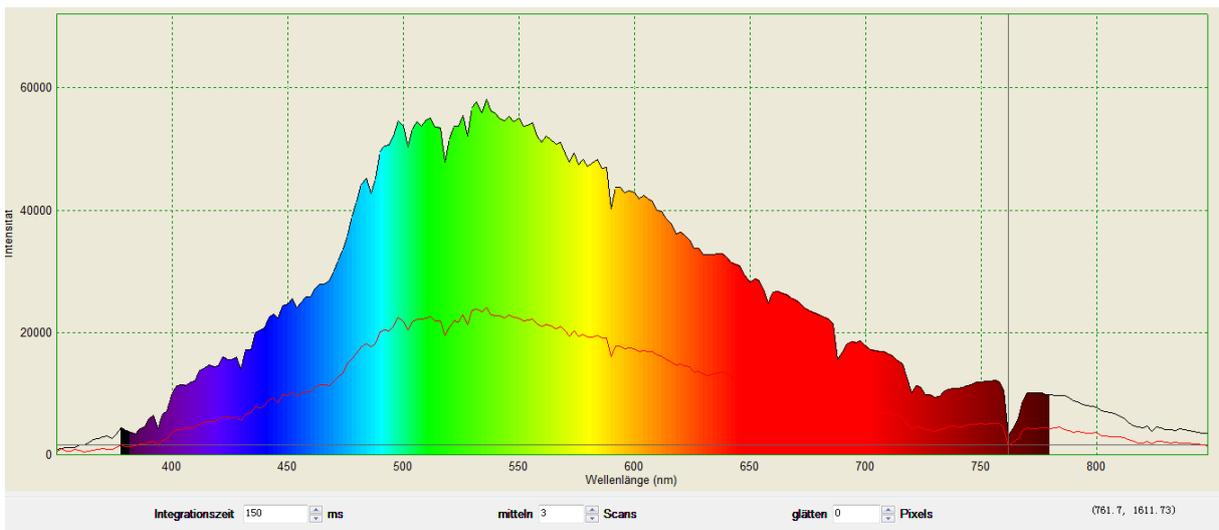


Abb. 26: Aufgenommenes Sonnenspektrum (Quantum)

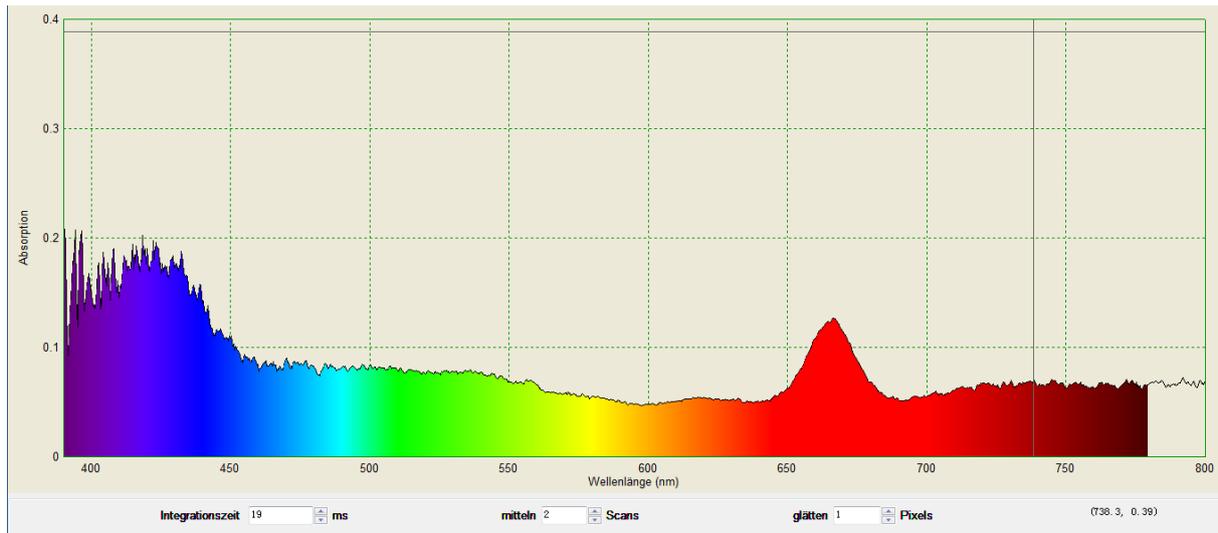


Abb. 27: Chlorophyll a mit Phywe aufgenommen (Measure Spec)

### 3.5 Chlorophyllfluoreszenz

Wie bereits bei 2.5 erwähnt relaxieren höhere Anregungszustände des Chlorophylls im ps Bereich auf den ersten Singulettzustand. Dadurch findet Fluoreszenz, unabhängig von der Anregung, nur vom ersten Singulettzustand aus statt und ist immer mit einer definierten Wellenlänge verbunden, die sich im Roten befindet. So erscheinen eine grüne Chlorophylllösung oder die gelaufenen Chromatographieplatten deutlich rot, wenn sie von einer starken Lichtquelle aus angestrahlt werden. Dies funktioniert sehr gut mit UV Licht, da dieses energiereicher ist und somit mehr Moleküle anregt. (Hoppe, et al., 1982 S. 535)

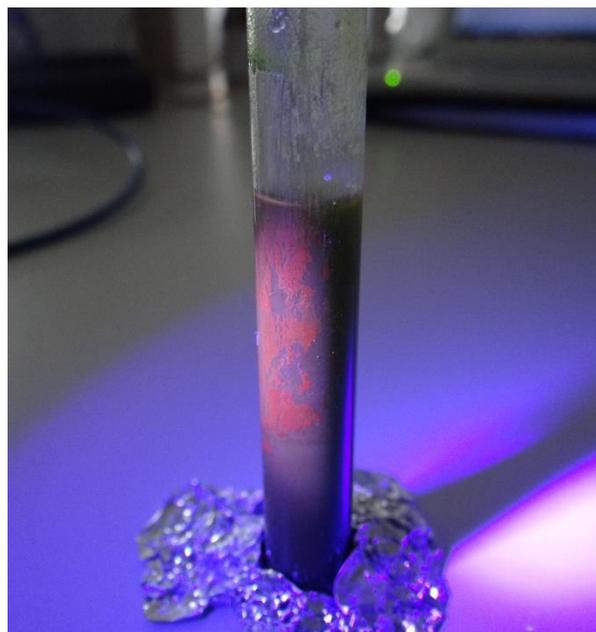


Abb. 28: Bild der Chlorophyllfluoreszenz am Spinatextrakt bei Beleuchtung mit UV-Licht

## 4. Lehrplanbezug

### 4.1 Vorwissen

Da die geplanten Stunden in der 11. Klasse durchgeführt werden sollen, wird hier Bezug auf die vorhergehenden Jahrgangsstufen genommen, in denen die SuS bereits Vorwissen zum Thema vermittelt bekommen haben.

#### 4.1.1 Vorwissen in der Biologie

Die Photosynthese taucht im Lehrplan Biologie oft als Randgebiet auf. So lernen die SuS bereits in der 5. Klasse im Natur und Technik Unterricht die Photosynthese als grundlegenden Prozess zum Aufbau energiereicher Stoffe kennen. Dies ist in Punkt 5.2.1 „Biologie- Lehre von den Lebewesen: Merkmale von Lebewesen: Stoffwechsel und Energieumwandlung im Lehrplan“ (Bayerisches Staatsministerium) festgemacht. Hier wird jedoch nur ein kurzer Überblick über die Abläufe der Photosynthese gegeben.

In der 6. Klasse des Natur und Technik Unterrichts wird dann genauer auf die Photosynthese eingegangen, wobei auch die Energiespeicherung angesprochen wird. Im Lehrplan findet sich dies wieder im Punkt 6.1.2 „Bau und Lebenserscheinungen von Blütenpflanzen: Wachstum und Energiebindung: Photosynthese: Energie- und Stoffumwandlung, Energiespeicherung.“ (Bayerisches Staatsministerium)

In der 10. Klasse des Biologie Unterrichts lernen die SuS den Stoffwechsel des Menschen kennen (Punkt 10.1 Stoffwechsel des Menschen). Dabei wird auch ATP als universeller Energieträger der Zelle behandelt, der auch in Pflanzenzellen vorhanden ist. Die Photosynthese selbst wird auch im Zusammenhang der Ökologie im Punkt 10.3 „Grundlegende Wechselbeziehungen zwischen Lebewesen: Aufbau und Merkmale eines Ökosystems der gemäßigten Breiten an einem konkreten Beispiel: Energiefluss: Photosynthese und Atmung“ behandelt (Bayerisches Staatsministerium). Hier wird jedoch mehr Wert auf den ökologischen Gesamtzusammenhang gelegt als auf einzelne Prozesse der Photosynthese. In der 11. Klasse wird dann die Photosynthese genauer behandelt. Unter Punkt 11.1 „Strukturelle und energetische Grundlagen des Lebens“ (Bayerisches Staatsministerium) wird die Energiebindung und den Stoffaufbau durch die Photosynthese besprochen. Hier wird neben der Bedeutung der Photosynthese auch die Lichtreaktion mit dem Absorptionsspektrum genannt. Zudem finden sich bedeutende Experimente zur Aufklärung des Prozesses und zur Abhängigkeit von Außenfaktoren. Da es sich hier um Stoff der 11. Klasse handelt, in der auch der Biophysik Unterricht stattfindet, kann man die Sachverhalte nicht zwangsläufig als

Vorwissen voraussetzen. Es bietet sich hier eine Absprache mit der Biologielehrkraft an.  
(Bayerisches Staatsministerium)

#### **4.1.2 Vorwissen in der Physik**

In der Physik erhalten die SuS bereits in der 9.Klasse einen Einblick in die Atomphysik unter Punkt 9.2 Atome. Hier werden bereits die diskrete Energieaufnahme und –abgabe von Atomen thematisiert. Im Unterpunkt Aufnahme und Abgabe von Energie werden optische Emissionsspektren analysiert und als Abgabe diskreter Energiemengen der Atomhülle und somit diskrete Energiestufen erklärt.

In der 10.Klasse werden die Grundlagen der Quantenmechanik behandelt unter Punkt 10.3 Wellenlehre und Einblick in die Quantenmechanik. Hier wird mit verschiedenen Experimenten, wie dem Doppelspaltversuch, der Welle-Teilchen-Dualismus von Licht sowie von Elektronen klar gemacht. (Bayerisches Staatsministerium)

#### **4.1.3 Vorwissen in der Chemie**

Die Chromatographie kommt in der Schule nur noch im Naturwissenschaftlichen Zweig vor. Hier findet sich im Profilbereich bei den Themenvorschlägen der Punkt „Ästhetik der Chemie“ in dem unter anderem auch chromatographische Bilder genannt werden.  
(Bayerisches Staatsministerium)

### **4.2 Einordnung in den Lehrplan**

Die in dieser Arbeit konzipierte Unterrichtseinheit orientiert sich an der Lehrplanalternative Biophysik der 11. Klasse des Gymnasiums in Bayern. Hier findet sich die Photosynthese als Wahlmöglichkeit neben den Themen Strahlenbiophysik und Medizinphysik, sowie Grundlagen der Biomechanik. Unter Punkt 11.4 Photosynthese werden verschiedene Themengebiete genannt, die anhand des Oberbegriffs Photosynthese in ca. 21 Stunden behandelt werden sollen. Hier finden sich neben den biologischen Grundlagen, wie Ablauf und Bedeutung der Photosynthese, auch quantenmechanische Themen. Vom eindimensionalen Potentialtopf als Atommodell, wird auf Molekülorbitale übergeleitet und damit die Absorption der Photosynthesepigmente gedeutet. Zudem werden die Antennensysteme und der dort stattfindende Energietransport genannt.

Da die konzipierte Unterrichtseinheit nur 3 Stunden umfasst, konnten nur einzelne Punkte aus dem Lehrplan verwirklicht werden. In der ersten Stunde wurden sehr kompakt die biologischen Grundlagen der Photosynthese behandelt angelehnt an den Unterpunkt „Umwandlung von Licht in chemische Energie“ (Bayerisches Staatsministerium). Hier wurde ein Überblick über Ablauf und Ort der Photosynthese mit Photosystemen, Licht- und Dunkelreaktion sowie Wanderung der Elektronen und Protonen gegeben. Die beiden folgenden Stunden lassen sich den Unterpunkten „Übertragung des Orbitalmodells auf Moleküle“ und „Vom Lichtquant bis zur Ladungstrennung“ zuordnen. In diesem wird anhand der Chromatographie und der Spektroskopie das Absorptionsverhalten von Chlorophyll a gemessen und anschließend anhand der Molekülphysik gedeutet. Der Rest der Unterrichtseinheit bezieht sich vor allem auf den letzten Teil des Lehrplantextes: „Sie übertragen diese Erkenntnisse auf Moleküle und können damit das Absorptionsverhalten der Photosynthesepigmente verstehen. Sie erkennen weiterhin, dass biophysikalische Methoden und Konzepte dazu geeignet sind, für uns lebenswichtige Prozesse aufzuklären, und welche Rolle eine geeignete Modellierung dabei spielt.“ (Bayerisches Staatsministerium S. 11. Klasse Physik)

## 5. Didaktische Überlegungen

### 5.1 Motivation zur Konzeption

Mit der Einführung des G8 wurden auch neue Lehrpläne konzipiert. In Bayern wurde diese Umstellung genutzt, um für den Physikunterricht der 11. und 12. Klassen Lehrplanalternativen einzuführen. Neben dem regulären Physik Unterricht kann nun in der 11. Klasse Biophysik und in der 12. Klasse Astrophysik als Alternative unterrichtet werden. Mit dieser Option soll das Interesse der SuS an Physik auch über die Pflichtdauer hinaus gewahrt werden. Der Trend der letzten Jahre hat gezeigt, dass viele SuS Physik ablegen, sobald es ihnen möglich ist. Durch die neuen Lehrplanalternativen soll anhand eines lebensnäheren Bezuges das Interesse der SuS an physikalischen Sachverhalten weiter aufrechterhalten werden. Gerade die Biophysik bietet hier viele Möglichkeiten in den festen Themengebieten „Auge und Ohr“, „Typische Untersuchungsmethoden der Biophysik“ und „Neuronale Signalleitung und Informationsverarbeitung“. Neben diesen drei vorgegebenen Bereichen gibt es noch drei Weitere, von denen jedoch nur einer im Unterricht behandelt werden muss. In den letzten Jahren hat sich bei den ersten Durchführungen gezeigt, dass beim Wahlgebiet vor allem „Strahlenbiophysik und Medizinphysik“ von den Lehrkräften bevorzugt wird. Die beiden anderen Themengebiete „Grundlagen der Biomechanik“ und „Photosynthese“ werden so gut wie gar nicht unterrichtet. Dies liegt vermutlich vor allem daran, dass es sich hier um die Themen mit dem größten biologischen Hintergrund handelt. Da die meisten Lehrkräfte, die Biophysik unterrichten, im Studium keine Biologie gehört haben, müssen sie sich die biologischen Sachverhalte selbstständig erarbeiten. Der hohe Anteil an biologischem Hintergrund in den beiden Themengebieten Biomechanik und Photosynthese schreckt somit viele Lehrkräfte davon ab, sich damit auseinanderzusetzen.

So wird auch im ersten Schulbuch zur Biophysik, das in Kürze veröffentlicht wird, die Photosynthese nicht behandelt.

Dabei kann man gerade bei der Photosynthese anhand eines der wichtigsten Prozesse unserer Erde sehr viel Physik erklären. Neben Elektrodynamik und Molekülphysik spielen hier auch quantenmechanische Prozesse eine wichtige Rolle. Deswegen wurde in dieser Arbeit eine kurze Unterrichtseinheit zum Thema Photosynthese konzipiert. Diese soll mit den nötigen Gerätschaften und einem fertigen Schüler- und Lehrerhandout in der Region Unterfranken für alle Lehrkräfte frei zugänglich gemacht werden. Einerseits können die SuS damit einen kurzen Einblick in die Biophysik der Photosynthese bekommen, andererseits erhalten die Lehrkräfte die Möglichkeit, ohne großen Aufwand eine Unterrichtseinheit zu diesem Thema durchführen zu können. Vielleicht werden dabei auch eventuelle Vorurteile und Scheu vor

dem Thema Photosynthese abgebaut und das Interesse geweckt, sich mehr mit diesem Wahlgebiet zu beschäftigen.

Im Folgenden werden zu den drei Stunden der Unterrichtseinheit jeweils die Grob- und Feinziele sowie die didaktischen Überlegungen bei der Konzeption aufgeführt.

## 5.2 Erste Stunde

Ausgehend vom Lehrplan des achtjährigen Gymnasiums in Bayern haben die SuS bereits einiges an Vorwissen zur Photosynthese (siehe 4.1 Vorwissen). Betrachtet man zudem noch die Bildungsstandards der Naturwissenschaften, die in der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004 verabschiedet wurden, finden sich auch dort passende Kompetenzen, die bereits vorhanden sein sollten. Da es noch keine Bildungsstandards für die Oberstufe gibt, hat man sich hier an den veröffentlichten Standards für den Mittleren Schulabschluss nach der 10. Klasse im Fach Physik orientiert. Man findet z.B. im Kompetenzbereich Fachwissen das Basiskonzept Energie. Hier steht unter anderem: „Für den Transport und bei der Nutzung von Energie kann ein Wechsel der Energieform bzw. des Energieträgers stattfinden. Dabei kann nur ein Teil der eingesetzten Energie genutzt werden.“ (Kultusministerkonferenz, 2005). Dies trifft auch gut auf die Photosynthese zu, da hier die Lichtenergie zuerst in ein elektrisches Potential und schließlich in chemische Energie umgewandelt wird. Außerdem wird nicht alle ankommende Energie genutzt, da ein Teil über Wärmestrahlung und Fluoreszenz verloren geht. Das Basiskonzept der Energie findet sich daher auch in der Unterrichtsstunde wieder. Da die Unterrichtseinheit nur drei und nicht 21 Stunden umfasst, wie es für die Photosynthese im Lehrplan vorgesehen ist, können natürlich nur Ausschnitte der geforderten Themen behandelt werden. Die erste Stunde soll dazu dienen, das Vorwissen der SuS über die Photosynthese zu aktivieren um es anschließend mit einer vertieften Betrachtung der Vorgänge bei der Lichtreaktion zu ergänzen. Die Bedeutung der Photosynthese als einer der wichtigsten Prozesse unserer Erde ist ein guter Einstieg in das Thema und ein geeigneter Aufhänger, um das bei den SuS vorhandene Vorwissen abzufragen.

Um die komplexen Vorgänge der Photosynthese besser einzuordnen, beginnt man erst mit einer Übersicht über die Lokalisierung der Vorgänge im Blatt. Dabei geht man didaktisch sinnvoll vom Großen zum Kleinen, also vom Blatt aus immer weiter bis zu den Chloroplasten und den darin enthaltenen Thylakoiden. Da die Stunde nur einen groben Überblick geben soll, werden die Chloroplasten didaktisch auf das Wesentliche reduziert und anhand einer einfachen Schemazeichnung beschriftet. Auch bei den folgenden Ausführungen über die

genauen Abläufe der Lichtreaktion muss stark in der Tiefe reduziert werden, um bei den SuS ein Abschalten zu vermeiden. Es ist ratsam sich hier vor allem auf die wichtigen Prozesse und allgemeinen Prinzipien zu konzentrieren und unwichtige Zwischenschritte sowie Fachbegriffe außen vor zu lassen. Die Vorgänge der Lichtreaktion lassen sich am besten anhand des sog. Z-Schemas erklären. Es gibt den Ort der Teilprozesse richtig wieder, aber auch die energetischen Zustände im Verlauf der Lichtreaktion. Da es bei der Erklärung der Abfolge von Teilschritten der Lichtreaktion wichtig ist, dass die SuS aufmerksam mitdenken, um den Zusammenhang zu verstehen wird ihnen im Arbeitsblatt bereits eine vorgefertigte Schemazeichnung an die Hand gegeben, um einen Cognitive Overload zu vermeiden. Die Zeichnung wird bei der Besprechung Stück für Stück ergänzt und vervollständigt. Um es den SuS zu erleichtern die besprochene Zeichnung später noch einmal nachzuvollziehen, wird zu der Zeichnung außerdem ein Text mit den wichtigsten Teilschritten auf dem Arbeitsblatt fixiert. Die der Lichtreaktion folgende Dunkelreaktion ist für den weiteren Verlauf der Unterrichtseinheit nicht wichtig und wird somit nur über eine sehr einfache Schemazeichnung betrachtet, die vor allem den Zusammenhang der beiden Teilreaktionen deutlich machen soll.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich für die erste Stunde der Unterrichtseinheit folgende Grob- und Feinziele:

Groblernziele:

- Überblick über die Prozesse der Photosynthese.
- Bewusstsein um die Bedeutung der Photosynthese für die Menschheit.

Feinziele:

Die SuS sollen...

- im UG die Bedeutung der Photosynthese für die Menschheit ermitteln und auf dem AB fixieren.
- im UG anhand einer Folie die Struktur der Chloroplasten und deren Lokalisierung im Blatt beschreiben.
- über einen LV mit einer Schemazeichnung auf dem AB die wichtigsten Schritte der Lichtreaktion der Photosynthese darstellen.

## 5.3 Zweite Stunde

Die zweite Stunde steht ganz unter dem Motto der Methodik und des Experimentierens. Die SuS lernen hier zwei Standardmethoden der naturwissenschaftlichen Forschung kennen. Zur Chromatographie haben die SuS kein Vorwissen, jedoch teilweise zur Spektrometrie, die in der 9. Jahrgangsstufe benutzt werden kann, um Atomspektren zu beobachten. Betrachtet man wieder die Bildungsstandards befindet man sich hier im Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung: „Eingebettet in den Prozess physikalischer Erkenntnisgewinnung sind das Experimentieren und das Entwickeln von Fragestellungen wesentliche Bestandteile physikalischen Arbeitens. In jedem Erkenntnisprozess wird auf bereits vorhandenes Wissen zurückgegriffen.“ (Kultusministerkonferenz, 2005 S. 10)

So wird auch hier für die Fragestellung, wie Chlorophyll welches Licht einfängt und für die Photosynthese nutzbar macht, ein experimentelles Vorgehen gewählt um dieser nachzugehen. Mit Hilfe der Chromatographie und der Spektrometrie wird der Blattfarbstoff untersucht und später dessen Absorptionsspektrum gedeutet. Dazu wird auf vorhandenes Vorwissen über Atomspektren, Spektrometrie und auch über die biologischen Hintergründe aus der ersten Stunde zurückgegriffen.

Wieder ausgehend von den Bildungsstandards findet man konkret in Punkt E 7: „Die Schülerinnen und Schüler führen einfache Experimente nach Anleitung durch und werten sie aus.“ (Kultusministerkonferenz, 2005 S. 11)

Man kann also davon ausgehen, dass die SuS bereits Erfahrungen mit dem Experimentieren nach Anleitungen haben und fähig sind diese selbstständig durchzuführen. Deswegen wurden bei der Konzeption die nötigen Durchführungen zur Chromatographie als ausführliche Anleitung im Handout angelegt. Da die notwendigen Gerätschaften zur Herstellung des Extraktes und dem Auftragen auf die Chromatographieplatten an jeder Schule normalerweise mehrfach vorhanden sind, bietet es sich an, die SuS in 2er Gruppen anhand dieser Anleitung möglichst selbstständig ihre eigene Chromatographie durchführen zu lassen. Bei einer Gruppenarbeit zu zweit wird am ehesten die Selbsttätigkeit und Kommunikation untereinander gefördert, da sich kein SuS in einer großen Gruppe verstecken kann und untätig bleibt.

Die folgenden Teile, bei denen man einerseits ein Sonnenspektrum und andererseits das Absorptionsspektrum von Chlorophyll a aufnimmt, können aufgrund des Mangels an ausreichenden Geräten nicht mehr in Gruppenarbeit durchgeführt werden. Man muss sich hier auf ein Lehrereperiment beschränken, bei dem, wenn möglich, über einen Beamer die SuS

nachverfolgen können, welche Messeinstellungen getätigt werden und welches Ergebnis man erhält. Bei der Durchführung kann man einzelne SuS als Assistenten nach vorne holen, um die Dynamik des Unterrichts zu erhalten. Mit der Aufnahme eines Sonnenspektrums soll einerseits der Frage nachgegangen werden, welches Licht Pflanzen für die Photosynthese zur Verfügung steht und andererseits vor allem auf die Fraunhoferlinien eingegangen werden. Dies dient als gute Überleitung zur Messung des Absorptionsspektrums von Chlorophyll. Die Messung findet als Lehrerdemonstration statt, wobei die einzelnen Messschritte mit den SuS besprochen werden. Das erhaltene Spektrum soll nun von den SuS ausgewertet werden. Dazu ist es der Sache dienlich zuerst einmal nur beschreiben zu lassen, was gesehen wird. Dann kann man der Frage nachgehen, warum Blätter grün erscheinen und diese anhand des Absorptionsspektrums beantworten.

Dies sollte die elementare Erkenntnis für die SuS in dieser Stunde sein.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich für die zweite Stunde der Unterrichtseinheit folgende Grob- und Feinziele:

Groblernziele:

- Kenntnis der Chromatographie und der Spektrometrie als Standardmethoden der Forschung.
- Fähigkeit anhand einer Anleitung wissenschaftliche Versuche durchzuführen.

Feinziele:

Die SuS sollen...

- in GA anhand einer selbstständigen Durchführung nach einer Anleitung auf dem AB und einer Folie mit einer Darstellung des Trennmechanismus die Grundprinzipien der Dünnschichtchromatographie beschreiben.
- in GA die fertig gelaufene Dünnschichtchromatographieplatte auf dem AB mit einer Skizze beschreiben und die Bedeutung der zu erkennenden Linien ableiten.
- im UG ein gemessenes Sonnenspektrum beschreiben.
- in GA/UG das Absorptionsspektrum von Chlorophyll a mit einem Schulspektrometer ermitteln und das erhaltene Resultat auswerten.

## 5.4 Dritte Stunde

In der dritten Stunde der Unterrichtseinheit soll nun anhand der Molekülphysik das Absorptionsspektrum des Chlorophylls gedeutet und erklärt werden. Bei den Bildungsstandards befindet man sich hier zum einen im Bereich der Erkenntnisgewinnung zum anderen im Bereich der Kommunikation. So findet man unter Punkt E 9: „Die Schülerinnen und Schüler werten gewonnene Daten aus, ggf. auch durch einfache Mathematisierung.“ (Kultusministerkonferenz, 2005 S. 11) Und zudem den Punkt K 7: „Die Schülerinnen und Schüler diskutieren Arbeitsergebnisse und Sachverhalte unter physikalischen Gesichtspunkten.“ (Kultusministerkonferenz, 2005 S. 12)

Während am Ende der letzten Stunde das gemessene Spektrum nur beschrieben und ganz allgemein gedeutet wurde, soll in dieser Stunde anhand der Molekülphysik genau erörtert werden, wie es zustande kommt. Der erste Teil dieser Stunde, bei dem ein letztes Mal die diskreten Energiespektren von Atomen und anschließend die Energieniveaus bei Molekülen dargestellt werden, wird aus zeitlichen Gründen als Lehrervortrag stattfinden. Nachdem anhand einer bereits fertigen Abbildung im Handout die diskreten Energieniveaus von Atomen und deren Übergänge wiederholt wurden, bedient man sich wieder einer einfachen Schemazeichnung. In dieser wird anhand des einfachen Wassermoleküls dargestellt, auf welche Art und Weise Moleküle Energie aufnehmen können. Dabei geht man analog zu den Atomen als erstes von den Elektronenanregungen aus, bis hin zu den kleinen Rotationsniveaus. Es entsteht ein Energieniveauschema des Wassermoleküls, anhand dessen man leicht erkennen kann, wie viele energetisch nah beieinander liegende Übergänge möglich sind. Den SuS wird hier klar, dass sich diese große Zahl an nahe beieinander liegenden Linien zu einem kontinuierlichen Spektrum aufsummieren. Bei der Behandlung der Moleküle wird didaktisch reduziert, indem man keine Potentiale und Orbitale der Elektronenniveaus annimmt und auch das Frank Condon Prinzip vernachlässigt. Es geht hier vor allem darum, dass der Grund für die Absorptionsspektren der Moleküle, im Gegensatz zu den Absorptionslinien der Atome, ersichtlich wird.

Im folgenden Teil der Stunde sollen die SuS den gerade gelernten Sachverhalt auf das Chlorophyll Molekül übertragen. Im Unterrichtsgespräch wird das in der letzten Stunde gemessene Absorptionsspektrum von Chlorophyll a nun unter dem Gesichtspunkt der Molekülenergieniveaus untersucht. Dabei erkennen die SuS, dass trotz der höheren Komplexität des Moleküls zur Erklärung der Absorption zwei elektronische Anregungsenergieniveaus ausreichen. So kann man mit Hilfe einer neuen, teilweise schon

vorgegebenen Schemazeichnung, ein Energieniveau Diagramm des Chlorophylls erstellen und auch die stattfindenden Übergänge bei der Absorption von blauem und rotem Licht einzeichnen. Da sich die Elektronenniveaus in weitere Schwingungs- und Rotationsniveaus unterteilen, kann somit auch das gemessene Spektrum mit den Banden im Roten und Blauen erklärt werden. Um weitere Übergänge einzeichnen zu können, muss den SuS aufgrund des Zeitmangels vorgegeben werden, dass die für die Photosynthese genutzte Energie fast nur vom Übergang des ersten angeregten Zustandes zum Grundzustand stammt. Die Relaxation vom zweiten zum ersten Anregungsniveau wird ohne größere Erklärung als Wärmestrahlung bezeichnet. An dieser Stelle sollte unbedingt ein Zusammenhang mit der ersten Stunde der Unterrichtseinheit hergestellt werden. Die SuS sollen möglichst selbst anhand des Energieniveauschemas und der Zeichnung der Lichtreaktion überlegen, wann welche Übergänge stattfinden.

Um nun zum letzten Teil der Stunde überzuleiten, wird den SuS ein Schutzmechanismus gegen Lichtschäden bei zu viel ankommender Lichtenergie vorgestellt: die Fluoreszenz. Die SuS können bereits aus dem Diagramm erkennen, dass diese im roten Lichtbereich zu sehen sein wird. Dies wird mit einem einfachen Experiment gezeigt, bei dem die SuS selber mit einer UV Taschenlampe die Chromatographieplatten oder direkt die Spinatblätter anleuchten. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die zuvor grün erscheinenden Teile nun kräftig rot leuchten.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich für die dritte Stunde der Unterrichtseinheit folgende Grob- und Feinziele:

Groblernziele:

- Einblick in die Molekülphysik und Übertragung auf das Chlorophyll Molekül.
- Verständnis des Zusammenhangs zwischen den physikalischen und biologischen Sachverhalten bei der Photosynthese.

Feinziele:

Die SuS sollen...

- im UG anhand einer Schemazeichnung auf dem AB die verschiedenen Möglichkeiten der Energieaufnahme eines Moleküls am Beispiel des einfachen Wassermoleküls ableiten und damit das kontinuierliche Absorptionsspektrum von Molekülen erklären.

- im UG die gewonnen Erkenntnisse über das einfache Wassermolekül auf das komplexere Chlorophyll Molekül übertragen und damit das in der zweiten Stunde gemessene Absorptionsspektrum unter dem Gesichtspunkt eines Energieniveauschemas interpretieren.
- im UG den Zusammenhang zwischen der Molekülphysik, dem Absorptionsspektrum und der Lichtreaktion der Photosynthese diskutieren.
- in GA mit einer UV Taschenlampe und Spinatextrakt oder Blättern die Chlorophyllfluoreszenz sichtbar machen und in das zuvor erarbeitete Energieniveauschema des Chlorophyll einordnen.

## 6. Umsetzung im Unterricht

### 6.1 Erste Stunde

#### 6.1.1 Geplanter Verlauf

In der ersten Stunde der Unterrichtseinheit sollen zuerst die biologischen Grundlagen der Photosynthese besprochen werden. Hierbei wird vor allem auf die Lichtreaktion eingegangen und die Dunkelreaktion nur kurz erwähnt. Am Anfang der Stunde stellt sich der durchführende Student vor und gibt einen kurzen Überblick über die Unterrichtseinheit. Im Folgenden soll im Unterrichtsgespräch das Vorwissen der SuS getestet werden. Nachdem die Handouts ausgeteilt wurden, wird über das Zitat zur Photosyntheseleistung der Einstieg in den ersten Abschnitt, Bedeutung der Photosynthese, gemacht. Die SuS erfahren, was für ein grundlegender und bedeutender Prozess die Photosynthese ist und in welchen Lebensbereichen sie wichtig für uns ist. Dieser Einstieg soll als Motivation dienen, um sich ausführlicher mit den Prozessen der Photosynthese beschäftigen zu wollen.

Im nächsten Abschnitt der Stunde wird über die Vorstellung zweier historischer Versuche zur Photosynthese auf die Notwendigkeit von CO<sub>2</sub> und Licht für das Ablaufen der Photosynthese hingewiesen. Dazu werden mit dem Beamer einfache Bilder mit Versuchsaufbauten zu den beiden Versuchen gezeigt. Anhand einer Folie wird dann der Ort der Photosynthese, die Chloroplasten, dargestellt und Aufbau und Merkmale dieser Zellorganellen auf dem Arbeitsblatt fixiert.

Es folgt die Erklärung, dass sich die Photosynthese in zwei Teilreaktionen (Licht- und Dunkelreaktion) aufteilt. Als eindrucksvolles Beispiel wird hier die Photosynthese von Kakteen erwähnt, die durch eine zeitliche Trennung der beiden Reaktionen ihren

Wasserverlust minimieren. Zur weiteren Verdeutlichung wird über ein Applet auf der Internetseite der Chemiedidaktik der Uni Wuppertal (Schmitz) der Zoom von einem Moosblatt hin zu den Chloroplasten und der Thylakoidmembran nachvollzogen. In der Membran werden die beiden Photosysteme der Lichtreaktion dargestellt. Überleitend auf das Arbeitsblatt wird anhand einer Schemazeichnung im Lehrervortrag die Lichtreaktion erarbeitet. Dabei wird schrittweise der Weg eines am PS II freigesetzten Elektrons nachvollzogen. Die SuS lernen hier die wichtigsten Prozesse der Lichtreaktion kennen: Protonen-Transport über Elektronentransportkette und NADPH/H<sup>+</sup> Bildung. Nach einer kurzen Diskussion über den genauen Ort der Energiefixierung, wird noch die ATP-Synthase und deren Funktion vorgestellt. Die Ergebnisse werden schriftlich im AB fixiert.

Mit der Erklärung, dass ATP nur ein kurzzeitiger Energiespeicher ist, wird auf die Dunkelreaktion der Photosynthese übergeleitet. Diese wird aber nur kurz anhand der Abbildung auf dem AB besprochen, wobei vor allem der Zusammenhang mit der Lichtreaktion und der Aufnahme von CO<sub>2</sub> im Vordergrund steht.

Im letzten Teil der Stunde sollen die SuS in 2er Gruppen einen Spinatextrakt für die Chromatographie herstellen. Alle Materialien dafür werden zur Verfügung gestellt und die SuS sollen in Eigenarbeit anhand der Anleitung auf dem AB ihren Extrakt herstellen. Dieser wird in der Folgestunde für die Chromatographie verwendet werden.

### 6.1.2 Tatsächlicher Verlauf

Die erste Stunde der Unterrichtseinheit fand am 30.01.2014 im Humboldt Gymnasium Schweinfurt statt. Es handelte sich um den Biophysik Kurs einer 11. Klasse, die aus 20 Schülerinnen und Schülern bestand. Der Unterricht fand in der 2. Stunde (8:45-9:30 Uhr) statt. Da die SuS von ihrem Klassenraum in den Physiksaal laufen mussten, konnte die Stunde erst um ca. 8:50 Uhr beginnen. Nach der Begrüßung und einer Vorstellung des Durchführenden begann die Stunde wie geplant mit einer kurzen Abfrage des Vorwissens der SuS zum Thema Photosynthese. Die ersten Antworten waren noch etwas zurückhaltend, aber im Gespräch wurde klar, dass die SuS die Photosynthese mit Sauerstoffproduktion und Sonnenenergienutzung in Verbindung bringen. Die Vorstellung der historischen Versuche zur geschichtlichen Aufdeckung der Photosynthese fanden die SuS amüsant, wegen der aus heutiger Sicht naiven Vorstellungen der Forscher. Im Gespräch kam auch das noch fehlende CO<sub>2</sub> auf, welches die Pflanzen für Photosynthese benötigen.

Die folgende Erarbeitung des Ortes der Photosynthese und dem Aufbau der Chloroplasten erfolgte wie geplant am OHP. Dabei füllte der Dozierende mit den SuS zusammen die Lücken im AB aus. Nach der geplanten Überleitung zur Lichtreaktion wurde diese anhand der Schemazeichnung auf dem AB erarbeitet. Die SuS stellten Zwischenfragen zu den vorkommenden Stoffen (ATP und NADPH/H<sup>+</sup>). Nachdem auch das Prinzip der ATP Gewinnung vorgestellt worden war, stellte ein Schüler die Frage, wozu man dann zwei Photosysteme brauche, wenn denn eigentlich nur ein Protonengradient zur ATP Gewinnung hergestellt werden soll. Diese Frage griff der Durchführende auf, um einerseits auf die evolutionäre Entwicklung der Photosynthese in Bakterien einzugehen (diese gelten als die Ursprünge der Photosynthese und besitzen nur ein Photosystem) und andererseits um mit dem Verweis auf die Gewinnung von NADPH/H<sup>+</sup> mit Hilfe von zwei Photosystemen auf die Dunkelreaktion überzuleiten.

Da die Stunde schon fast zu Ende war, verzichtete der Durchführende auf die Ausformulierung der Prozesse der Lichtreaktion und brachte die Stunde mit der kurzen Behandlung der Dunkelreaktion zu einem runden Ende. Die Herstellung des Spinatextraktes musste somit auf die nächste Stunde verschoben werden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass aufgrund mehrerer Faktoren die Zeit für die geplante Durchführung nicht ausgereicht hat. Die Stunde war vom Inhalt her knapp bemessen, jedoch konnten nur 40 Minuten genutzt werden. Zudem wurde mehr Zeit als eingerechnet im Unterrichtsgespräch mit den SuS und durch deren Zwischenfragen verbracht. Außerdem gab es einfache mediale Faktoren, wie das Hin- und Herschalten zwischen dem OHP und dem Laptop und das öftere Nachfragen von SuS, die die Schrift des Durchführenden nicht lesen konnten. Die Vorstellung der historischen Versuche nahm zu viel Zeit in Anspruch, ohne dass hier relevanter Stoff vermittelt wurde. In einer überarbeiteten Fassung der Stunde sollte dieser Teil herausgenommen werden.

## 6.2 Zweite Stunde

### 6.2.1 Geplanter Verlauf

In der zweiten Stunde wird anhand einer Chromatographie und einer Absorptionsmessung der Blattfarbstoff Chlorophyll a aus den Blättern von Spinat extrahiert und dessen Absorptionsspektrum bestimmt.

Nach einer kurzen Wiederholung der wichtigsten Sachverhalte der letzten Stunde (wichtigste beteiligte Stoffe, Protolyse von Wasser und Mechanismus der Energieumwandlung) kündigt der Durchführende an, dass man sich in dieser Stunde mit dem ersten Schritt der Lichtreaktion genauer befassen will. Wie schaffen es die Pflanzen das Licht aufzufangen und wie nutzen sie alles verfügbare Licht? Dazu soll mit dem Extrakt der letzten Stunde eine Chromatographie angefertigt werden. Die SuS teilen sich in 2er Gruppen auf und beladen nach der Anleitung des Handouts die Platten. Das Laufmittel war zuvor schon vom Durchführenden hergestellt und in die Gläser gegeben worden.

Wenn die Platten in den Gläsern stehen, und gewartet werden muss, bis das Laufmittel weit genug gelaufen ist, soll den SuS anhand einer Folie das Prinzip der Chromatographie erläutert werden, damit sie verstehen, warum sich der aufgetragene Extrakt in die einzelnen Farbstoffe auftrennt. Da es sich nur um eine kurze Vorstellung des Prinzips der Chromatographie handelt müssen die SuS den Inhalt der Folie nicht auf dem AB fixieren.

Als nächstes wird mit den SuS anhand einer Folie kurz das Spektrum von Licht besprochen, wobei vor allem auf den Frequenzbereich des sichtbaren Lichtes eingegangen wird. Dies dient zur Vororientierung, bevor mit einem Spektrometer das Lichtspektrum der Sonne aufgenommen wird. Die Aufnahme erfolgt als Lehrerexperiment und zur besseren Auflösung mit einem Lichtleiter mit 400 µm Fenster. Hier sollen die unterschiedliche Intensität verschiedener Farben, sowie die auffallenden Einschnitte im Spektrum besprochen werden. Das Spektrum wird ins AB übertragen und für zwei Einschnitte das absorbierende Element genannt.

Im letzten Teil der Stunde sollen, falls die Zeit noch reicht, die Chromatographie Platten aus den Gläsern genommen und das Ergebnis betrachtet werden. Im Unterrichtsgespräch wird herausgearbeitet, dass die verschiedenen Linien je einem Farbstoff entsprechen. Spinat enthält also mehrere Farbstoffe, die isoliert nicht nur grün, sondern auch gelb erscheinen. Die ungefähre Lage der erkennbaren Linien wird auf dem AB eingezeichnet und die beiden Chlorophylle, sowie, falls erkennbar, die Carotinoide, werden beschriftet.

### **6.2.2 Tatsächlicher Verlauf**

Die zweite Stunde mit der Biophysik Klasse des Humbolt Gymnasiums fand am 03.02.2014 von 9:45-10:30 Uhr statt. Da die SuS davor Pause hatten, fanden sich alle pünktlich im Saal ein, sodass ohne Verzögerungen begonnen werden konnte.

Nach einer kurzen Zusammenfassung der letzten Stunde und dem Ausblick auf die Versuche der heutigen Stunde, teilten sich die SuS in 2er Gruppen ein und begannen mit der Herstellung des Spinatextraktes. Hier kam es zu einem Stau um den Experimentiertisch, auf dem alle nötigen Materialien standen. Während einige Gruppen erst auf ihrem Platz die Anleitung durchlasen, waren andere bereits am Tisch und begannen erst dann, die nötigen Materialien gemäß der Anleitung zu suchen. Die Anmerkung des Durchführenden, dass die Gruppen mit den kleineren Mörsern weniger Aceton benötigen, ging dadurch etwas unter. Da die SuS offensichtlich nur wenig Experimentiererfahrung hatten, wurden trotz Bildern in der Anleitung nicht alle Gegenstände richtig identifiziert. Auch das Umsetzen der Mengenangaben hat von Gruppe zu Gruppe stark geschwankt. So wurde oft zu viel oder zu wenig Spinat in den Mörser gegeben und vor allem die Spatelspitze Calcium Carbonat unterlag sehr starken Schwankungen in der Menge. Das Abfiltrieren des Extraktes funktionierte bei allen Gruppen sehr gut und ohne weitere Probleme. Nachdem jede Gruppe ihren Extrakt fertig gestellt hatte, wurden diese vorne am Lehrerpult gesammelt, um den SuS die verschiedenen Farben, welche die Proben aufwiesen, zu zeigen. Dadurch sollte der späteren Erklärung der unterschiedlichen starken Linien auf den gelaufenen Chromatographieplatten schon vorgegriffen werden.

Bevor die Gruppen mit der Auftragung des Extraktes auf die Kieselgelplatten anfangen, gab der Durchführende den Hinweis, dass bei dem Bleistiftstrich nicht zu fest aufgedrückt werden soll, um das Gel nicht abzukratzen. Die SuS holten sich am Lehrerpult ihren Extrakt, eine Glaskapillare und eine Kieselgelplatte ab. Bei der Auftragung für die Chromatographie kam es bei einigen Gruppen zu einem Missverständnis. Sie meinten, man müsse vier verschiedene Linien auftragen und nicht eine Linie vier Mal. Diese Gruppen bekamen eine neue Platte und konnten den Teil wiederholen. Insgesamt dauerte das Auftragen jedoch länger als gedacht, da die SuS auch hier noch keine Vorerfahrungen hatten und erst probieren mussten, bis es richtig gelang. Die fertigen Platten wurden zum Laufen in die Gläser mit dem Laufmittel gegeben. In der Zeit, bis die Platten fertig gelaufen waren, wurde als erstes anhand einer Folie das Prinzip der Chromatographie erläutert. Hierbei entstand zunächst kurz Unruhe, weil die SuS im Handout nach der Seite suchten und mitschreiben wollten, bis der Durchführende mitteilte, dass sie nur zuhören sollen.

Im Folgenden sollte dann ein Sonnenspektrum aufgenommen werden. Da der Laptop zum Messen an den Beamer angeschlossen war konnte mit dem Lichtleiter nicht direkt ans Fenster gegangen werden. Nach Ausschalten des Lichtes im Klassenzimmer und der richtigen Skalierung der Intensität, konnte das Spektrum jedoch sichtbar gemacht werden. Zur weiteren

Besprechung zeigte der Durchführende dann aber ein zuvor aufgenommenes und besseres Sonnenspektrum. Die SuS konnten im Unterrichtsgespräch relativ schnell erklären, wodurch die Einschnitte im kontinuierlichen Spektrum verursacht werden.

In den letzten Minuten vor Ende der Stunde konnte dies noch im Handout fixiert werden und die Absorptionslücke des Sauerstoffs der Erdatmosphäre identifiziert werden. Die Kieselgelplatten wurden erst nach Ende der Stunde aus den Kammern genommen, getrocknet und für die nächste Stunde gelagert.

Zusammenfassend kann man sagen, dass diese Stunde sehr gut lief. Die SuS waren sehr motiviert und hatten bei der Durchführung der Experimente viel Spaß. Die hier aufgetretenen Probleme und Missverständnisse waren teils überraschend, teils erwartet und können in einer verbesserten Version des Handouts berücksichtigt werden. Dass die Zeit zur Messung des Absorptionsspektrums nicht ausgereicht hat, wurde vom Durchführenden schon vermutet. Mit dem Abschluss des Sonnenspektrums konnte die Stunde jedoch rund beendet werden.

## 6.3 Dritte Stunde

### 6.3.1 Geplanter Verlauf

Die letzte Stunde der Unterrichtseinheit soll nun den physikalischen Sachverhalt der Chlorophyllabsorption behandeln. Dazu wird zuerst die Absorption von Chlorophyll a gemessen. Die SuS sollen selbstständig die entsprechende Bande auf ihrer Kieselgelplatte abkratzen und in die Messküvette mit Ethanol überführen. Die Messung selbst wird von der Lehrkraft ausgeführt, wobei die SuS am Beamer mitverfolgen können, welche Einstellungen und Schritte getätigt werden. Während des Einstellens und Messens erläutert der Lehrer die einzelnen Schritte und erklärt somit das Messprinzip des Spektrometers. Das erhaltene Spektrum übertragen die den SuS in ihr Handout und im Unterrichtsgespräch wird erarbeitet, was das Spektrum für die optischen Eigenschaften von Blättern bedeutet.

Für den nächsten Teil der Stunde wird auf das Vorwissen der SuS aus der 9. Klasse zurückgegriffen und anhand eines Energieschemas die Aufnahme von diskreten Energien bei Atomen wiederholt. Zur Verdeutlichung dient das selbst aufgenommene Emissionsspektrum einer Wasserstoffröhre. Für die Überleitung zur Molekülphysik wird das einfache Wassermolekül betrachtet. Nachdem es in das Handout gezeichnet wurde, werden Stück für Stück die Möglichkeiten der Energieaufnahme von Molekülen diskutiert. Nebenbei entsteht gleichzeitig ein Energieniveau Schema in welches sukzessive die Elektronen-, Schwingungs-

und Rotationsniveaus eingezeichnet werden. Aus dem erarbeiteten Schema ist ersichtlich, dass es bei Molekülen eine Vielzahl an energetisch ähnlichen Übergängen gibt. Daran erkennen die SuS, dass sich die vielen Linien zu einer Absorptionsbande aufsummieren. Im Folgenden sollen die SuS ihre Erkenntnisse auf die Absorption von Chlorophyll a übertragen. Sie sehen, dass aufgrund der beiden ausgeprägten Maxima bei Blau und Rot zwei Elektronenenergieniveaus beteiligt sind, welche sich wiederum in Rotations- und Schwingungsniveaus unterteilen. So wird für das Chlorophyll a ein Jablonski Diagramm erstellt, in welches die Hauptübergänge eingezeichnet werden. Die Relaxation vom  $S_2$  zum  $S_1$  Zustand in Form von Wärmestrahlung wird nur kurz besprochen. Auf die Fluoreszenz bei einer Abregung vom  $S_1$  zum Grundzustand soll jedoch noch genauer eingegangen werden. In einem letzten Versuch schauen sich die SuS ihre gelaufenen Chromatographie Platten mit einer UV Taschenlampe an, ebenso den Spinatextrakt und die Spinatblätter. Die rote Fluoreszenz kann durch diesen einfachen Versuch gut gezeigt und im Jablonski Diagramm erklärt werden. Wenn noch genügend Zeit vorhanden sein sollte, kann noch genauer auf die Wärmerelaxation und evtl. auf die Schutzfunktion der Carotinoide eingegangen werden.

### 6.3.2 Tatsächlicher Verlauf

Die dritte und letzte Stunde der Unterrichtseinheit fand am Mittwoch den 05.02.2014 von 11:30-12:15 Uhr statt. Da es sich wieder um eine Stunde nach der Pause handelte konnte pünktlich zum Gong begonnen werden.

Gleich zu Anfang präsentierte der Lehrer die gelaufenen Platten der letzten Stunde. Diese waren über die beiden Tage in Alufolie gelagert worden um Lichtschäden der Farbstoffe zu vermeiden. Trotzdem waren die Farben leider etwas ausgebleichen und das Grün des Chlorophylls erschien eher grau. Vor Stundenbeginn wurden zwar vom Lehrer noch Platten angesetzt, aber diese trugen nicht genügend Farbstoff um gute Linien erkennen zu lassen. Die SuS wurden dazu aufgefordert die Platten zu betrachten und äußerten auf Nachfrage schnell, dass mehrere Linien zu erkennen seien. Insgesamt wirkte die Klasse jedoch unruhig und nicht ganz bei der Sache, da sie in der Folgestunde wohl eine Extemporale in Mathematik erwarteten. Auf Bitten des Lehrers wurde das Gemurmel etwas leiser und der Unterricht konnte plangemäß fortgesetzt werden. Die Aussage, dass die Spinatblätter also mehrere Farbstoffe besitzen, unter anderem auch Gelbe, war für manche SuS überraschend. Um nun das Absorptionsspektrum aufzunehmen, wurden die SuS aufgefordert nach vorne zu kommen

und mit einem Spatel die Bande des Chlorophylls abzukratzen und in die Messküvette zu geben. Obwohl die Linien kurz vorher besprochen wurden, fiel es einigen SuS schwer die richtige zu identifizieren, was aber leider auch daran lag, dass diese, wie zuvor schon erwähnt, leicht ausgebleichen waren. Da die Referenzküvette ebenfalls vorne am Lehrerpult stand, waren einige SuS versucht, auch hier ihren abgekratzten Farbstoff hineinzugeben. Das Messen des Absorptionsspektrums erfolgte problemlos und nach Plan. Das sichtbare Absorptionsspektrum war leider nicht perfekt, die wichtigsten Aspekte konnten jedoch gesehen werden. So zeigte sich wie erwartet ein deutliches Maximum im Blauen und Roten. Die folgende Erläuterung des Molekülspektrums mit Zurückgreifen auf die Atomspektren erfolgte planmäßig. Es kamen teilweise interessierte Nachfragen, z.B. wie denn entschieden werde, in welcher Art das Molekül die ankommende Energie aufnehme (Elektronenanregung, Schwingung oder Rotation). Der Transfer auf das Chlorophyll Molekül, bei dem die SuS selber erkennen sollten, dass aufgrund der zwei Maxima der Absorption auch zwei Elektronenanregungszustände beteiligt sind, erwies sich jedoch als zäh. Die SuS konnten das zuvor erlernte nicht gleich auf das größere Molekül übertragen. Im Gespräch mit dem Lehrer wurde dies dann gemeinsam erarbeitet und das Energieniveauschema des Chlorophylls ausgefüllt. Hier wurden nun sowohl die Absorptionsübergänge (Rot und Blau) als auch die Abregung vom  $S_2$  zum  $S_1$  Niveau in Form von Wärmeabstrahlung eingezeichnet. Als letztes wurde den SuS die Fluoreszenz als Möglichkeit der Abgabe überschüssiger Energie vorgestellt und mit den UV Taschenlampen auch an den Chromatographieplatten und den Spinatblättern gezeigt. Diesen Effekt fanden die SuS sehr eindrucksvoll. Die Stunde wurde mit der Fixierung des Fluoreszenzeffektes abgeschlossen. Am Ende waren noch 2-3 Minuten Zeit für Rückmeldungen der SuS zur Unterrichtseinheit.

Zusammenfassend wurde diese Stunde gut umgesetzt und es gab keine großen Überraschungen oder Probleme. Leider waren die SuS aus oben genanntem Grund nicht ganz bei der Sache und mitunter auch sehr unruhig. Aus zeitlichen Gründen wurden die Inhalte der Stunde auch schneller besprochen als ursprünglich geplant, damit am Ende noch kurz Zeit war für Rückmeldungen aus der Klasse. So fehlte die geplante Gesamtzusammenfassung um den Bogen zur ersten Stunde zu spannen.

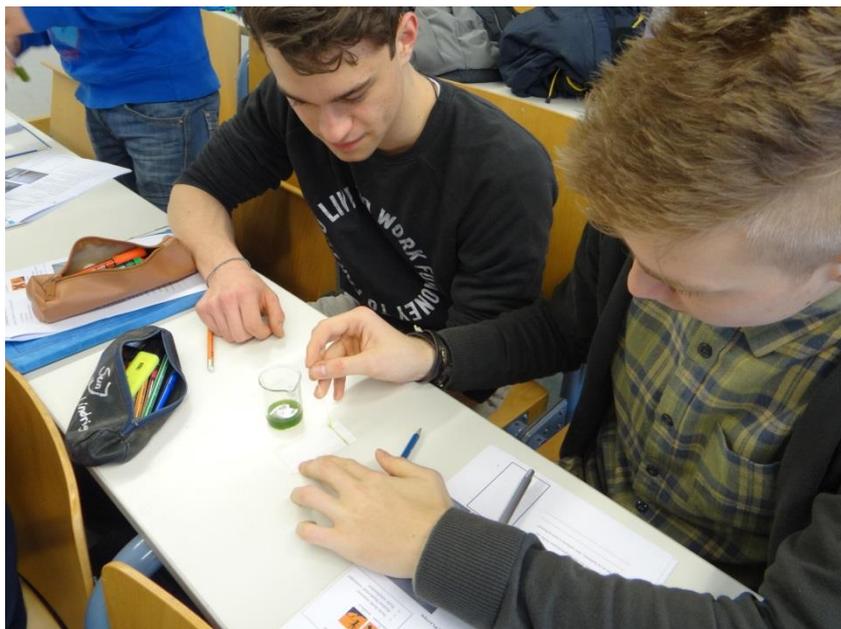


Abb. 29: Einige SuS während der Durchführung der Versuche

## 6.4 Gesamtfazit nach der Durchführung

Die Durchführung war sehr erkenntnisreich und zeigte viele gute aber auch weniger gute Aspekte der Stundenplanung auf. Insgesamt sind für die Menge an Inhalt drei Stunden fast zu kurz, vor allem wenn sie, wie in diesem Fall, getrennt voneinander stattfinden. Hilfreich wäre es, die zweite und dritte Stunde in einer Doppelstunde durchführen zu können. Außerdem ist aufgefallen, dass bei der Planung der Stunden von idealisiertem 45-minütigen Unterricht ausgegangen worden ist, wie er in der Realität oft nicht stattfinden kann. So wurde aufgrund vieler Zwischenfragen, länger als gedacht andauernder Diskussionen und dem nicht pünktlichen Beginn der Stunden Zeit verloren und die Inhalte mussten schneller als gewollt durchgenommen werden. Auch die medialen Aspekte, wie das Hin- und Herschalten zwischen Beamer und OHP führten zu einem Zeitverlust. So kam gerade in der letzten Stunde die große Zusammenfassung, in der der Zusammenhang aller drei Stunden deutlich gemacht werden sollte, zu kurz. Aufgrund der genannten Faktoren kam es dem Durchführenden teilweise sehr gehetzt vor und es wurde an manchen Stellen kurzfristig im Unterricht gekürzt bzw. umgestellt. Gerade deswegen war es jedoch eine wertvolle Erfahrung die geplante Einheit durchzuführen zu können. Im Nachhinein wurde das Konzept auch entsprechend modifiziert.

## 6.5 Auswertung der Stunden anhand der Fragebögen

Am Ende der dritten Stunde hatten die SuS noch kurz die Möglichkeit im Gespräch ein Feedback zu geben. Es kamen vorwiegend positive Rückmeldungen, z.B. dass die SuS viel Spaß in den Stunden hatten und den Stoff auch interessant fanden. Auf Nachfrage meinte der Großteil der SuS auch, den Stoff verstanden zu haben und empfand das Niveau als nicht zu hoch. Gerade die selbstständige Durchführung der Chromatographie und die Vorbereitung zur Spektroskopie wurden als sehr gut bezeichnet. Negativ angemerkt wurde vor allem, dass zu wenig auf den Zusammenhang der letzten und der ersten Stunde eingegangen wurde. Zudem wurde die Schrift des Durchführenden auf den OHP Folien mehrfach als zu unleserlich bezeichnet.

Auf die Nachfrage, ob mehr Photosynthese im Biophysikunterricht erwünscht wäre, kam ein eindeutiges Nein. Als Begründung nannten die SuS, dass der Stoff zeitgleich im Biologieunterricht der 11. Klasse durchgenommen würde und sie keine Doppelung der Sachverhalte wünschten.

Am Ende wurde den SuS ein Fragebogen mit 10 kurzen Fragen zur Bewertung ausgeteilt, den sie in Ruhe ausfüllen und dann in der nächsten Stunde beim Lehrer abgeben sollten.

Von insgesamt 20 SuS kamen 16 Bögen ausgefüllt zurück und wurden ausgewertet. Aus einer so geringen Anzahl an Antworten kann man keine statistisch relevanten Rückschlüsse ziehen, aber zumindest Tendenzen aufzeigen. Im Folgenden werden die interessantesten Aspekte kurz dargestellt. Alle Angaben in den Diagrammen sind Prozentangaben.

Die Frage nach den Interessen der SuS zeigt sehr einheitlich, dass beim Biophysikkurs das Interesse an Physik und Biologie in etwa gleich groß ist.

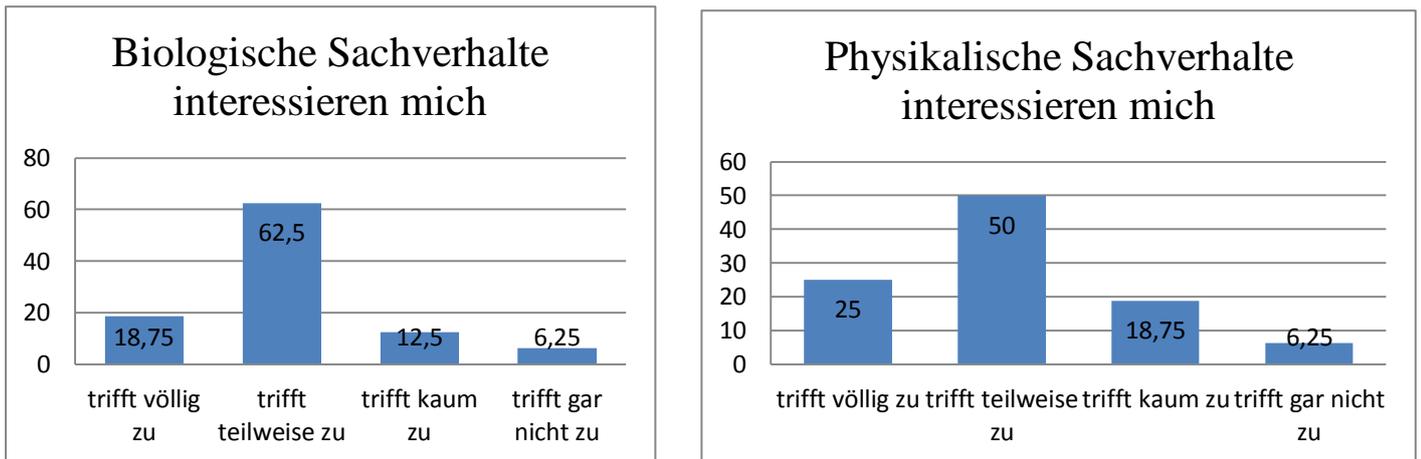


Abb. 30: Fragen nach dem Interesse an den Fächern Physik und Biologie

Dies kann man als weitere Rechtfertigung des Faches Biophysik sehen, da bei gleichem Interesse an beiden Fächern eine Kombination der beiden auf die SuS anziehend wirken kann.

Das Interesse an dem Thema Photosynthese war ebenso vorhanden, jedoch weniger eindeutig:

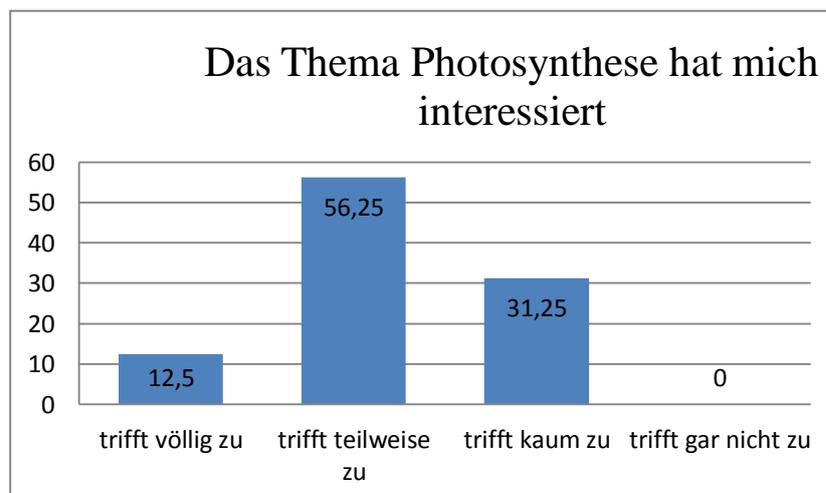


Abb. 31: Frage nach dem Interesse am Thema Photosynthese

Die Fragen nach Handout und Arbeitsaufträgen zeigen, dass diese gut angenommen wurden und die Versuche anhand der Anleitungen selbstständig durchführbar waren.

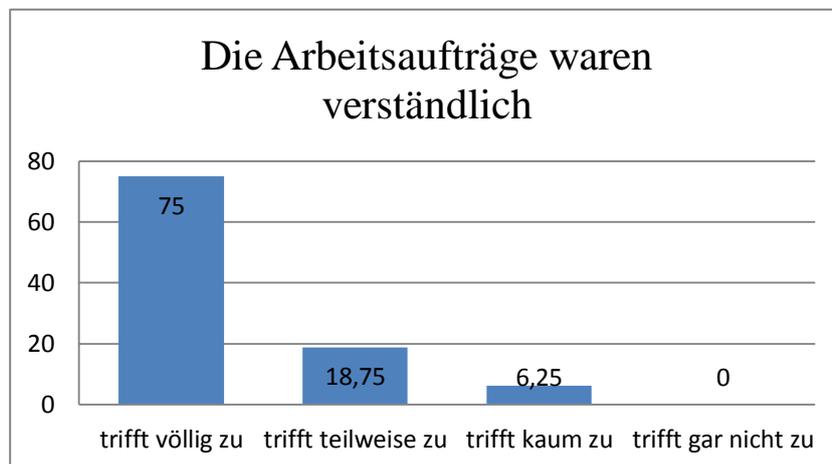
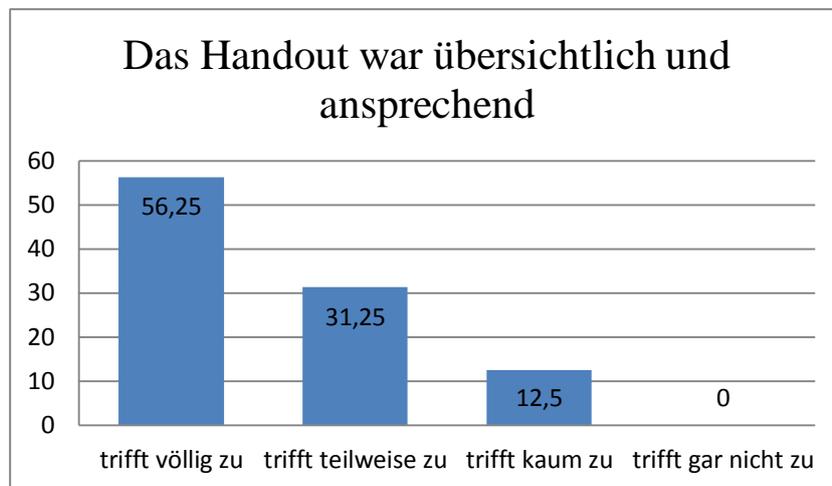


Abb. 32: Fragen nach dem Layout des Handouts und den Anleitungen für die Versuche

Die Aussage der SuS, dass der Sachverhalt der Unterrichtseinheit verstanden wurde, spiegelt sich in den Antworten des Fragebogens wieder. So haben über 80% der SuS eine positive Antwort gegeben.

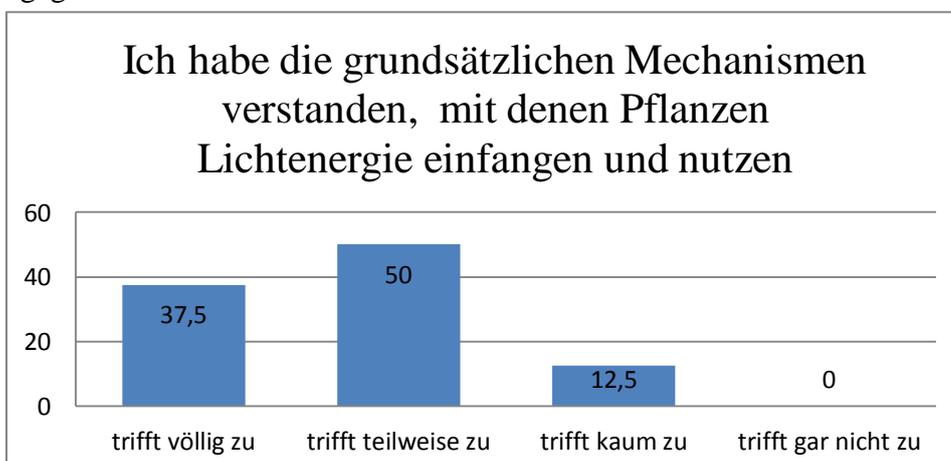


Abb. 33: Frage nach dem Verständnis der Sachverhalte der Unterrichtseinheit

Die Versuche selbst haben allen SuS Spaß gemacht und waren für den Großteil von 87,5% hilfreich um die Sachverhalte der Unterrichtseinheit zu verstehen.

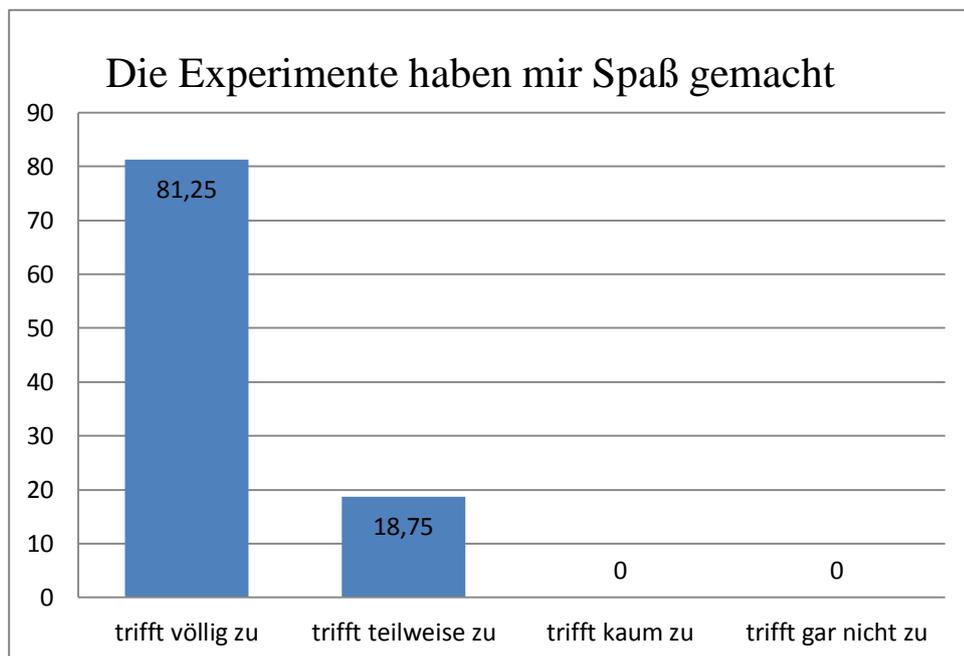
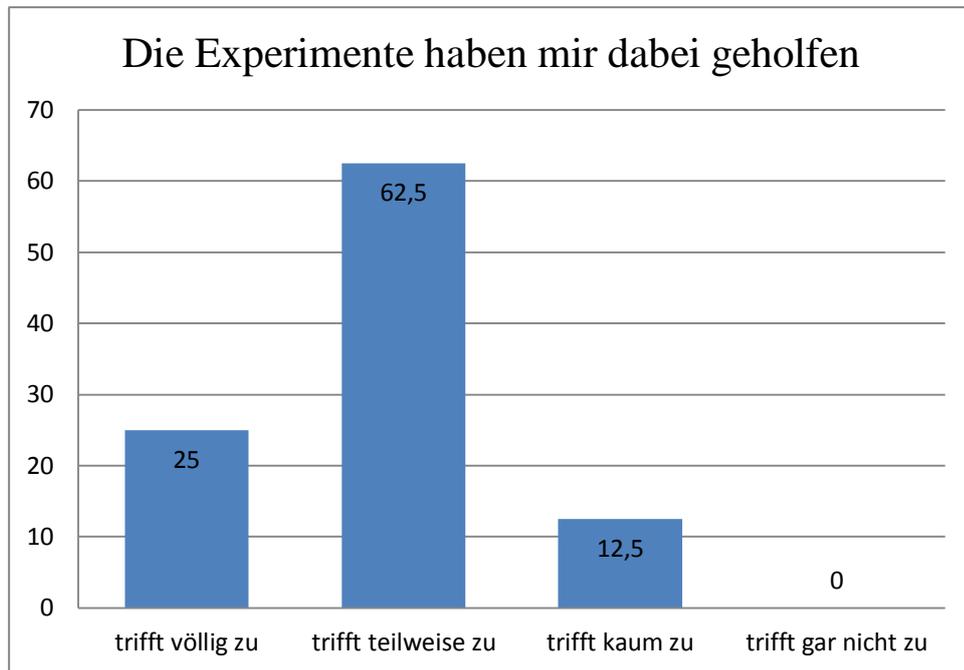


Abb. 34: Fragen nach den Experimenten

Die letzten beiden Fragen spiegeln die Kritik der SuS beim mündlichen Feedback wieder. So war für einige SuS der Zusammenhang der Stunden nicht allzu gut erkennbar und vor allem haben nur 25 % der SuS ein Interesse daran, mehr Photosynthese im Biophysikunterricht zu behandeln.

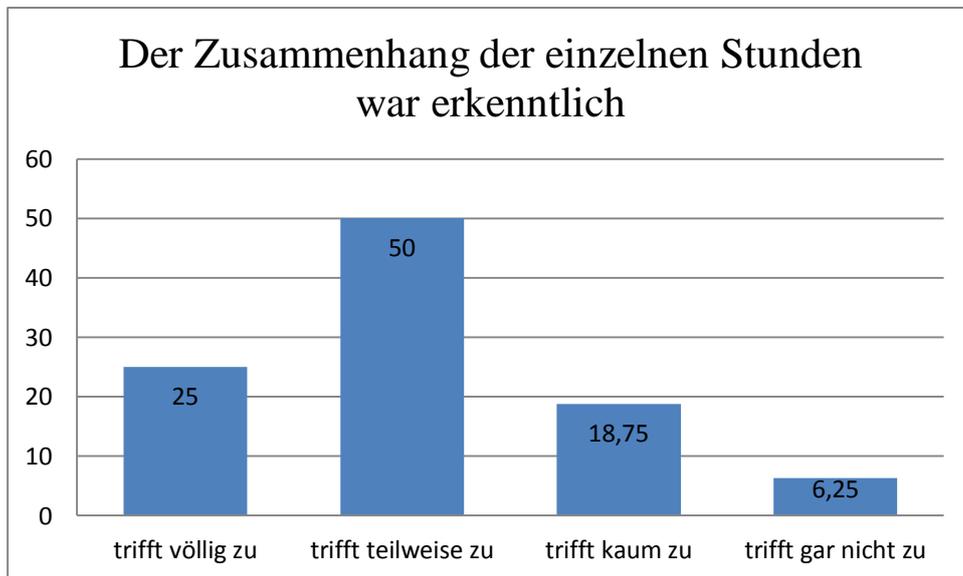


Abb. 35: Frage nach dem Zusammenhang der einzelnen Stunden

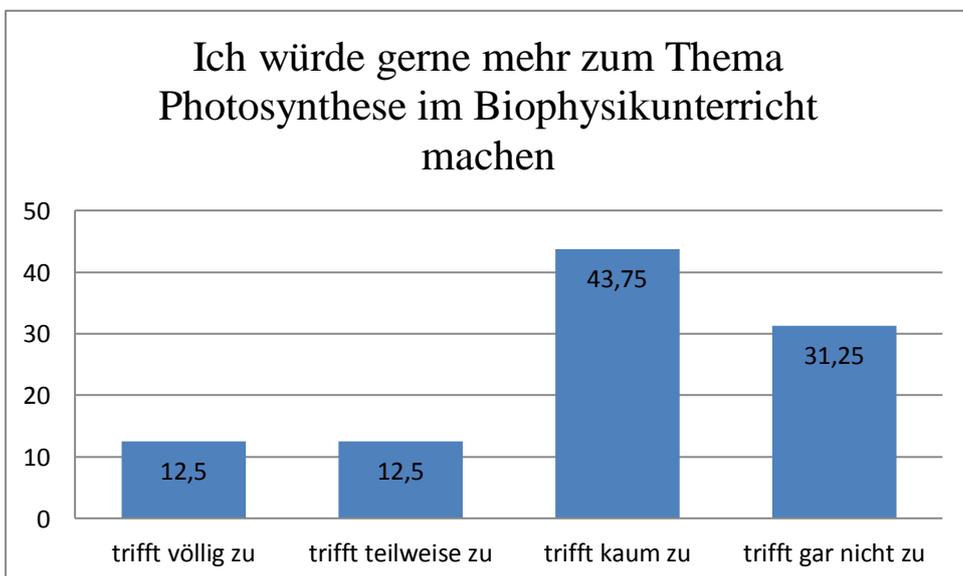


Abb. 36: Frage nach dem Interesse an mehr Photosynthese im Biophysikunterricht

## 7. Fazit

In dieser Arbeit wurden die Grundzüge eines möglichen Unterrichts der Photosynthese in der Biophysik dargelegt. Dazu wurde anhand des Lehrplans der 11. Klasse Biophysik in Bayern eine beispielhafte Unterrichtseinheit konzipiert. Zur Durchführung wurden zudem drei verschiedene Spektrometer verwendet und in ihrer Handhabung und anhand der Qualität der Software verglichen.

Ziel des Ganzen war es, eine kompakte kurze Einheit zur Photosynthese zu entwickeln, die andere Lehrkräfte übernehmen können, um ihren SuS einen Einblick in die Biophysik der Photosynthese zu geben. Die hierfür nötigen Kenntnisse in der Biologie sind größtenteils aus dem Handout ersichtlich und vertieft im Sachanalyse Teil der Arbeit wiedergegeben. Dadurch muss keine Lehrkraft aufwendige Recherchen betreiben um den Unterricht durchführen zu können.

Die Durchführung mit einer Schulklasse war sehr aufschlussreich und half, die geplante Unterrichtseinheit zu verbessern. Als weiteren Ausblick könnte man z.B. die Unterrichtseinheit um eine Stunde erweitern, um mehr Zeit für die einzelnen Sachverhalte zu haben und um noch mehr auf Übergänge im Jablonski Diagramm einzugehen. Nimmt man ein Blatt mit einer Infrarotkamera auf, so erkennt man eindeutig ein Leuchten des Blattes. Hier kann eindrucksvoll die Abregung vom zweiten zum ersten Elektronenenergieniveau gezeigt werden.

Das Fazit der SuS zur Unterrichtseinheit war zwar positiv, vor allem bei den Experimenten, die Tendenz dazu nicht mehr zur Biophysik im Unterricht machen zu wollen war aber leider etwas ernüchternd. Um jedoch eine aussagekräftige Meinung zu dieser Frage zu erhalten, hätte die Einheit mit mehreren Klassen durchgeführt werden müssen. Und bei einer weiteren Durchführung könnte man sich mit der Biologielehrkraft absprechen um weniger Doppelungen im Unterricht zu erhalten.

Abschließend bleibt noch zu sagen, dass, auch wenn es nur ein kurzer Einblick in die Photosynthese war und das Interesse der SuS an mehr dazu eher gering war, dennoch elementare Methoden beider Fächer gezeigt worden sind. Jeder SuS, der nach seinem Abitur eines der beiden Fächer studiert, wird zwangsläufig diesen Methoden wiederbegegnen und hat dann bereits eine entsprechende Vorkenntnis.

## 8. Literaturverzeichnis

- Bayerisches Staatsministerium, für Unterricht und Kultus.** Lehrplan des achtjährigen Gymnasiums. [Online] [Zitat vom: 27. 12 2013.] <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=1>.
- Campbell, Neil A. und B., Reece Jane. 2009.** *Biologie*. München : Pearson Education, 2009. S. 251-278.
- Conatex.** Conatex Lernsysteme. [Online] Pasco. [Zitat vom: 23. 2 2014.] [http://www.conatex.com/shop/advanced\\_search\\_result.php?keywords=spektrometer&Submit=%3E&osCsid=11ce30606fd315a62e4ea471bc300769](http://www.conatex.com/shop/advanced_search_result.php?keywords=spektrometer&Submit=%3E&osCsid=11ce30606fd315a62e4ea471bc300769).
- David Sadava, David M.Hillis, H.Craig Heller, May R. Berenbaum. 2011.** *Purves Biologie*. [Hrsg.] Jürgen Markl. Heidelberg : Springer, 2011. S. 1859.
- E. Strasburger, F.Noll, H.Schenck, A.F.W. Schimper. 2008.** *Lehrbuch der Botanik*. Heidelberg : Springer, 2008. S. 1175.
- Häder, Donat-Peter, et al. 1999.** *Photosynthese*. [Hrsg.] Donat-Peter Häder. Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 1999.
- Haken, Hermann und Wolf, Hans Christoph. 2003.** *Atom- und Quantenphysik*. s.l. : Springer, 2003. S. 131-135.
- . **2006.** *Molekülphysik und Quantenchemie*. s.l. : Springer, 2006.
- Hoppe, Walter, et al. 1982.** *Biophysik*. Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 1982. S. 980.
- Kalbacher, Dr. Hubert.** Hubert Kalbacher The Kalbacher Lab. [Online] [Zitat vom: 25. 6 2013.] <http://www.kalbacher.uni-tuebingen.de/lehre/skript/Kurstag07.pdf>.
- Kultusministerkonferenz. 2005.** *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. Darmstadt : Luchterhand, 2005.
- Leybold.** LD Didaktik. [Online] [Zitat vom: 23. 2 2014.] <http://www.ld-didactic.de/index.php?id=ld-artikel&a=467252&L=0>.
- Lüttge, Ulrich und Kluge, Manfred. 2012.** *Botanik*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2012. S. 666.
- Otto, Matthias. 2000.** *Analytische Chemie*. 2. Weinheim : WILEY-VCH Verlag, 2000. S. 671.

**Phywe.** Phywe- excellence in science. [Online] [Zitat vom: 23. 2 2014.]  
<http://www.phywe.de/51/pid/28900/Spektrometer-Measurespec-mit-Kuevettenhalter-und-Lichtquelle-.htm>.

**Queisser, Hans-Joachim. 2009.** Eine entscheidende Stunde. *Physik Journal*. 2009, 12.

**Röka Wiki, Gymnasium am Römerkastell Alzey.** Röka Wiki Gymnasium am Römerkastell Alzey. [Online] [Zitat vom: 25. 6 2013.] [http://wiki.roeka-alzey.de/uploads/pagepdf/100-Chromatographie\\_beim\\_Spinat.pdf](http://wiki.roeka-alzey.de/uploads/pagepdf/100-Chromatographie_beim_Spinat.pdf).

**Schmitz, R.-P.** Chemie interaktiv. [Online] 2002-2010. [Zitat vom: 24. 1 2014.]

[http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/chemie-interaktiv/ein\\_fall\\_fuer\\_zwei/effz\\_ein\\_fall\\_fuer\\_zwei.swf](http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/chemie-interaktiv/ein_fall_fuer_zwei/effz_ein_fall_fuer_zwei.swf).

**Schünemann, Volker. 2005.** *Biophysik*. Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 2005. S. 232.

## 9. Anhang

### 9.1 Anleitungen zu den Spektrometern

#### 9.1.1 Amadeus

##### Bedienhinweise Amadeus Spektrometer mit externem Küvettenhalter

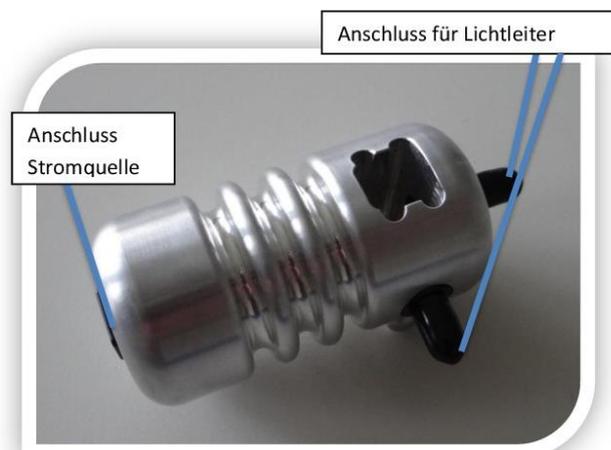
###### Allgemeine Daten:



- Auflösung von 350nm – 850nm
- CCD-Silizium Array mit 3 nm Auflösung
- Integrationszeit 3ms-1000ms
- Anschluss erfolgt nur über USB
- Lichtquelle: Wolframlampe im externen Küvettenhalter

###### Bedienhinweise:

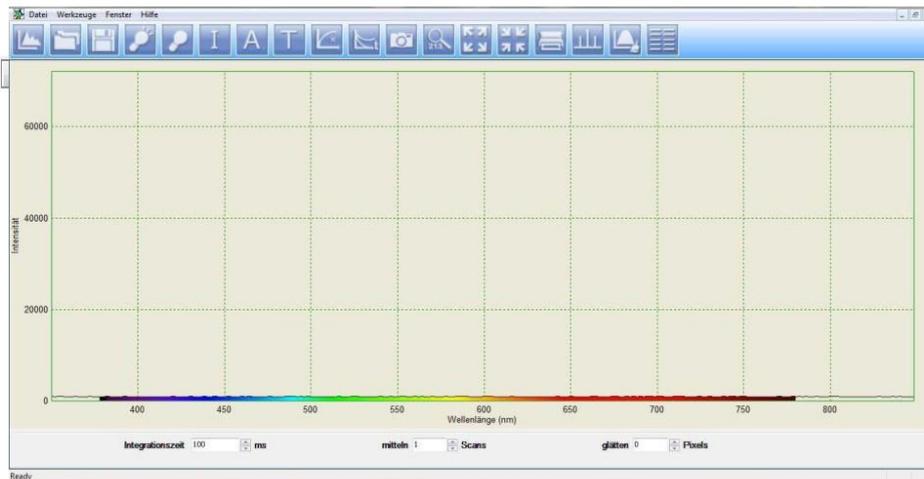
Der externe Küvettenhalter muss über einen Lichtleiter an das Spektrometer angeschlossen werden. Es gibt zwei mögliche Anschlüsse am Halter: einer am hinteren Ende und ein weiterer seitlich davon. Für Absorptionsmessungen wird der **hintere** Eingang verwendet. Am seitlichen Eingang kann man mit einem geeigneten Lichtleiter mit größerem Querschnitt Fluoreszenzerscheinungen



messen. Die integrierte Lichtquelle im Küvettenhalter muss über eine externe Stromquelle versorgt werden. Zu beachten ist beim Anschließen, dass der Lichtleiter nicht geknickt und gestaucht wird so das eine optimale Signalweiterleitung erreicht werden kann.

### Quantum:

Messsoftware von Amadeus für Aufnahme von Spektren.



Erklärung der verschiedenen Reiter:



**Neues Spektrum:** Öffnet ein neues Fenster in dem ein neues Spektrum aufgenommen werden kann.



**Gespeichertes Spektrum:** Öffnet ein bereits zuvor abgespeichertes Spektrum.



**Speichern:** Speichert aktuelles Spektrum in Datei.



**Referenz:** Hier speichert man das Spektrum einer Referenzlösung gegenüber der man bei einer Probelösung die Transmission oder Extinktion messen will. Das Speichern des Spektrums funktioniert analog zum Offsetspektrum.



**Offset:** Hier kann man das Streulichtspektrum der Umgebung abziehen lassen. Dazu einfach auf den Reiter klicken. Beim Wechsel auf den Reiter Intensität wird das Offset Spektrum dann automatisch abgezogen.



**Intensität:** Hier wird das vom CCD Array empfangene Spektrum aufgetragen. Sind die oberen Spitzen des Spektrums abgeschnitten muss die Integrationszeit heruntergesetzt werden.



**Absorption:** Hat man ein Referenzspektrum gespeichert kann man sich hier die Absorption einer Probelösung gegenüber der Referenz anzeigen lassen.



**Transmission:** Analog zur Absorption kann man sich hier die Transmission der Probelösung darstellen lassen.



Die Reiter **Kalibrierung und Kinetik** dienen für chemische Kinetikexperimente um z.B. Konzentrationen von Lösungen zu bestimmen. Sie sind im Rahmen des hier vorgestellten Experiments unwichtig.



**Speicherauszug:** Hier kann man die aktuelle Absorptionslinie speichern lassen.



**Wellenlängenbereich:** Mit diesem Button lassen sich die Achsen für den Wellenlängenbereich sowie die Achse für die Intensität bzw. Extinktion skalieren.



**Zoom:** Hiermit kann in das Spektrum hinein bzw. hinaus gezoomt werden.



**Drucken:** Lässt das aktuelle Spektrum drucken



**Referenzlinien:** Hier lassen sich die Absorptions- bzw. Emissionslinien von einigen typischen Elementen im Diagramm darstellen.



**Farbe:** Hiermit wird das gemessene Spektrum eingefärbt.



**Zwischenablage:** Die gerade gemessenen Werte werden in eine Zwischenablage kopiert und lassen sich so z.B. in

eine Exceltabelle einfügen.

Weitere Wichtige Bedienelemente:

- **Integrationszeit:** Hier kann man die Zeit einstellen, nach der die  Ladungen im CCD Array abgerufen werden. Eine niedrigere Integrationszeit bedeutet also eine geringere Intensität des Spektrums.
- **Mitteln:** Um ein besseres Spektrum zu erhalten kann hier über  mehrere Messungen gemittelt werden und der Mittelwert dargestellt werden.
- **Glätten:** Mit diesem Button kann man mehrere nebeneinander  liegende Pixel mitteln lassen um das Spektrum glatter darstellen zu lassen.

### Messung des Absorptionsspektrums von Chlorophyll a:

- 1) Zuerst wird der externe Küvettenhalter über einen Lichtleiter an das Messgerät angeschlossen.
- 2) Nachdem das Gerät über USB mit dem PC verbunden wurde startet man das Programm. Die Messung startet automatisch.
- 3) Zuerst nimmt man das Streulichtspektrum weg, indem man auf den Reiter **Offset** klickt und dann wieder zurück zur Intensität geht.
- 4) Nun schaltet man die Lampe des Küvettenhalters ein, indem man das Netzteil an den Küvettenhalter anschließt und reguliert die Integrationszeit soweit herunter (ca. 17 ms), dass man das komplette Spektrum der Lampe angezeigt bekommt.
- 5) Stellt man nun die Referenzlösung in den Küvettenhalter so kann man das nun dargestellte Intensitätsspektrum durch klicken auf den Reiter **Referenz** speichern.
- 6) Man kann nun die Referenzlösung entfernen und die Probelösung in den Küvettenhalter geben.
- 7) Durch Klicken auf den Reiter **Extinktion** kann man sich nun das Absorptionsspektrum von Chl a darstellen lassen. Um ein besseres Bild zu erhalten, bietet es sich an die Skala der Extinktion feiner darstellen zu lassen.
- 8) Mit Klick auf den **Speicherauszug** Button kann man das aktuell gemessene Spektrum speichern und sich dieses in Ruhe anschauen.

## 9.1.2 Leybold

### Bedienhinweise Leybold Kompakt Spektrometer mit Küvettenhalter



#### Allgemeine Daten:

- Auflösung von 350nm – 1000nm
- CCD-Silizium Array mit 2 nm Auflösung
- Integrationszeit 3ms-1000ms
- Anschluss erfolgt nur über USB
- Lichtquelle: Wolfram Glühbirne + blaue LED mit 390nm-1000nm

#### Bedienhinweise:

Das Spektrometer und die Lichtquelle sind mit Schrauben miteinander verbunden und müssen nicht weiter montiert werden. Zum Starten von Messungen muss das Gerät nur über das USB Kabel mit dem PC verbunden werden.

#### SpektraLab:

Messsoftware von Leybold für Aufnahme von Spektren. Erklärung der verschiedenen Reiter:

Offset I0 | Intensität I1 = I-I0 | Referenz I2 = I-I0 | Transmission T = I1/I2 | Extinktion E = -log(I1/I2) | Kalibrierung | Kinetik

- **Intensität:** Hier wird das vom CCD Array empfangene Spektrum aufgetragen. Sind die oberen Spitzen des Spektrums abgeschnitten, muss die Integrationszeit heruntermgesetzt werden.
- **Offset:** Hier kann man das Streulichtspektrum der Umgebung abziehen lassen. Dazu einfach auf den Reiter klicken. Beim

Wechsel auf den Reiter Intensität wird das Offset Spektrum dann automatisch abgezogen.

- **Referenz:** Hier speichert man das Spektrum einer Referenzlösung gegenüber der man bei einer Probelösung die Transmission oder Extinktion messen will. Das Speichern des Spektrums funktioniert analog zum Offsetspektrum.
- **Transmission:** Hat man ein Referenzspektrum gespeichert kann man sich hier die Transmission einer Probelösung gegenüber der Referenz anzeigen lassen.
- **Extinktion:** Analog zur Transmission kann man sich hier die Extinktion der Probelösung darstellen lassen.
- Die Reiter **Kalibrierung und Kinetik** dienen für chemische Kinetikexperimente um z.B. Konzentrationen von Lösungen zu bestimmen. Sie sind im Rahmen des hier vorgestellten Experiments unwichtig.

Weitere Wichtige Bedienelemente:

- **Achsen:** Man kann die Abzisse bei jeder Darstellung in ihrer Skala verändern indem man einfach neben die Achse klickt und sie nach oben oder unten streckt oder staucht.
- **Integrationszeit:** Hier kann man die Zeit einstellen, nach der die  Ladungen im CCD Array abgerufen werden. Eine niedrigere Integrationszeit bedeutet also eine geringere Intensität des Spektrums.
- **Messbuttons:** Mit diesen Buttons kann man die Messung  starten, pausieren und stoppen.
- **Lichtquelle:** Mit diesem Button kann man die Lichtquelle des  Küvettenhalters einschalten um Absorptionsspektren messen zu können.

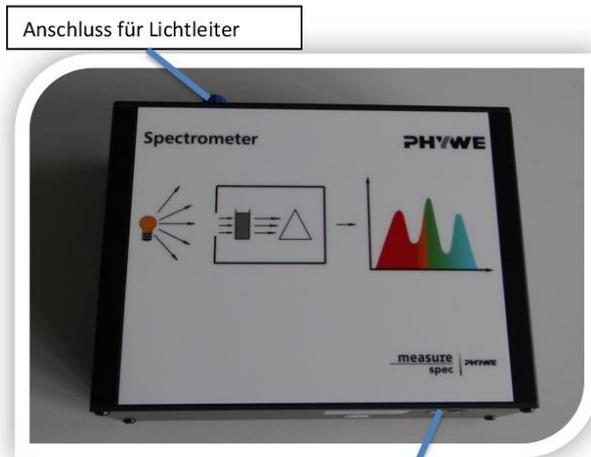
### Messung des Absorptionsspektrums von Chlorophyll a:

- 1) Nachdem das Gerät über USB mit dem PC verbunden wurde startet man das Programm.
- 2) Die Messung beginnt automatisch.
- 3) Zuerst nimmt man das Streulichtspektrum weg, indem man auf den Reiter **Offset** klickt und dann wieder zurück zur **Intensität** geht.
- 4) Nun schaltet man die Lampe des Küvettenhalters ein und reguliert die **Integrationszeit** soweit herunter (ca. 18 ms), dass man das komplette Spektrum der Lampe angezeigt bekommt.
- 5) Stellt man nun die Referenzlösung in den Küvettenhalter so kann man das nun dargestellte Intensitätsspektrum durch klicken auf den Reiter **Referenz** speichern.
- 6) Man entfernt nun die Referenzlösung und stellt die Probelösung in den Küvettenhalter.
- 7) Durch Klicken auf den Reiter **Extinktion** kann man sich nun das Absorptionsspektrum von Chl a darstellen lassen. Um eine bessere Auflösung zu erhalten, bietet es sich an die Skala der Extinktion feiner darstellen zu lassen.
- 8) Mit Klick auf den Pausebutton hält man die Messung an und kann das Spektrum in Ruhe betrachten.

## 9.2.3 Phywe

### Bedienhinweise Phywe Spektrometer mit externem Küvettenhalter

Allgemeine Daten: Phywe



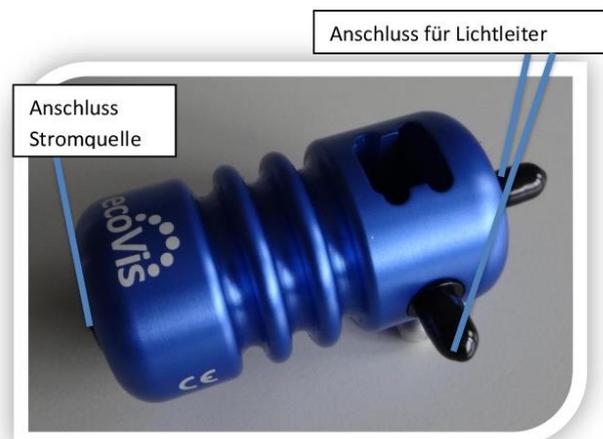
- Auflösung von 350nm – 850nm
- CCD-Silizium Array mit 4 nm Auflösung
- Integrationszeit 3ms-1000ms
- Anschluss erfolgt nur über USB
- Lichtquelle: Wolframlampe im externen Küvettenhalter

#### Bedienhinweise:

Der externe Küvettenhalter muss über einen Lichtleiter an das Spektrometer angeschlossen werden. Es gibt zwei mögliche Anschlüsse am Halter: einer am hinteren Ende und ein weiterer seitlich davon.

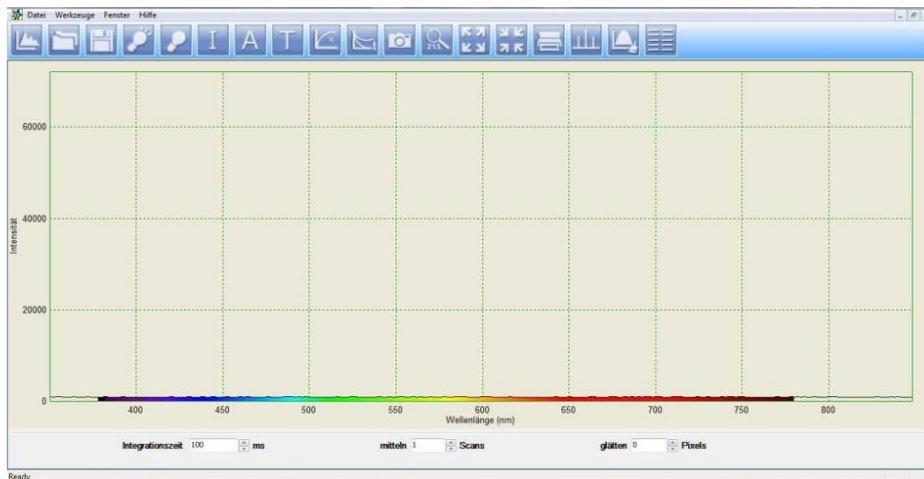
Für Absorptionsmessungen wird der **hintere** Eingang

verwendet. Am seitlichen Eingang kann man mit einem geeigneten



Lichtleiter mit größerem Querschnitt Fluoreszenzerscheinungen messen. Die integrierte Lichtquelle im Küvettenhalter muss über eine externe Stromquelle versorgt werden. Zu beachten ist beim Anschließen, dass der Lichtleiter nicht geknickt und gestaucht wird so das eine optimale Signalweiterleitung erreicht werden kann.

### MeasureSpec:



Messsoftware von Phywe für Aufnahme von Spektren. Erklärung der verschiedenen Reiter:



**Neues Spektrum:** Öffnet ein neues Fenster in dem ein neues Spektrum aufgenommen werden kann.



**Gespeichertes Spektrum:** Öffnet ein bereits zuvor abgespeichertes Spektrum.



**Speichern:** Speichert aktuelles Spektrum in Datei.



**Referenz:** Hier speichert man das Spektrum einer Referenzlösung gegenüber der man bei einer Probelösung

die Transmission oder Extinktion messen will. Das Speichern des Spektrums funktioniert analog zum Offsetspektrum.



**Offset:** Hier kann man das Streulichtspektrum abziehen lassen. Dazu einfach auf den Reiter klicken. Beim Wechsel auf den Reiter Intensität wird das Offset Spektrum dann automatisch abgezogen.



**Intensität:** Hier wird das vom CCD Array empfangene Spektrum aufgetragen. Sind die oberen Spitzen des Spektrums abgeschnitten muss die Integrationszeit heruntergesetzt werden.



**Absorption:** Hat man ein Referenzspektrum gespeichert kann man sich hier die Absorption einer Probelösung gegenüber der Referenz anzeigen lassen.



**Transmission:** Analog zur Absorption kann man sich hier die Transmission der Probelösung darstellen lassen.



Die Reiter **Kalibrierung und Kinetik** dienen für chemische Kinetikexperimente um z.B. Konzentrationen von Lösungen zu bestimmen. Sie sind im Rahmen des hier vorgestellten Experiments unwichtig.



**Speicherauszug:** Hier kann man die aktuelle Absorptionslinie speichern lassen.



**Wellenlängenbereich:** Mit diesem Button lassen sich die Achsen für den Wellenlängenbereich sowie die Achse für die Intensität bzw. Extinktion skalieren.



**Zoom:** Hiermit kann in das Spektrum hinein bzw. hinaus gezoomt werden.



**Drucken:** Lässt das aktuelle Spektrum drucken



**Referenzlinien:** Hier lassen sich die Absorptions- bzw. Emissionslinien von einigen typischen Elementen im Diagramm darstellen.



**Farbe:** Hiermit wird das gemessene Spektrum eingefärbt.



**Zwischenablage:** Die gerade gemessenen Werte werden in eine Zwischenablage kopiert und lassen sich so z.B. in eine Exceltabelle einfügen.

Weitere Wichtige Bedienelemente:

**Integrationszeit**

- **Integrationszeit:** Hier kann man die Zeit einstellen, nach der die Ladungen im CCD Array abgerufen werden. Eine niedrigere Integrationszeit bedeutet also eine geringere Intensität des Spektrums.

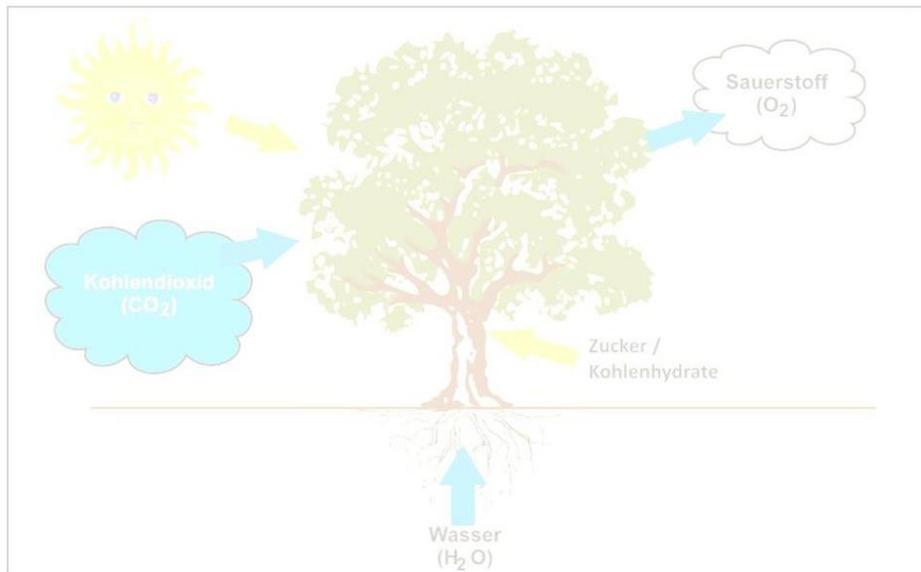
- **Mitteln:** Um ein besseres Spektrum zu erhalten kann hier über **mitteln**   mehrere Messungen gemittelt werden und der Mittelwert dargestellt werden.
- **Glätten:** Mit diesem Button kann man mehrere nebeneinander **glätten**   liegende Pixel mitteln lassen um das Spektrum glatter darstellen zu lassen.

### Messung des Absorptionsspektrums von Chlorophyll a:

- 1) Zuerst wird der externe Küvettenhalter über einen Lichtleiter an das Messgerät angeschlossen.
- 2) Nachdem das Gerät über USB mit dem PC verbunden wurde startet man das Programm. Die Messung startet automatisch.
- 3) Zuerst nimmt man das Streulichtspektrum weg, indem man auf den Reiter **Offset** klickt und dann wieder zurück zur Intensität geht.
- 4) Nun schaltet man die Lampe des Küvettenhalters ein, indem man das Netzteil an den Küvettenhalter anschließt und reguliert die Integrationszeit soweit herunter (ca. 17 ms), dass man das komplette Spektrum der Lampe angezeigt bekommt.
- 5) Stellt man nun die Referenzlösung in den Küvettenhalter so kann man das nun dargestellte Intensitätsspektrum durch klicken auf den Reiter **Referenz** speichern.
- 6) Man kann nun die Referenzlösung entfernen und die Probelösung in den Küvettenhalter geben.
- 7) Durch Klicken auf den Reiter **Extinktion** kann man sich nun das Absorptionsspektrum von Chl a darstellen lassen. Um ein besseres Bild zu erhalten, bietet es sich an die Skala der Extinktion feiner darstellen zu lassen.
- 8) Mit Klick auf den **Speicherauszug** Button kann man das aktuell gemessene Spektrum speichern und sich dieses in Ruhe anschauen.

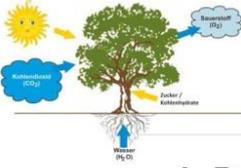
## 9.2 Unterrichtsmaterialien

### 9.2.1 Schülerhandout



# BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

„Würde man alle Kohlenhydrate, die in einem Jahr durch die Photosynthese produziert werden, in Zuckerwürfel umwandeln, würde sich ein Berg aus 300 Billionen Würfeln auftürmen. Aneinandergereiht reichten diese Würfel von der Erde bis zum (ehemaligen) Planeten Pluto!“



## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 1

### 1. BEDEUTUNG DER PHOTOSYNTHESE

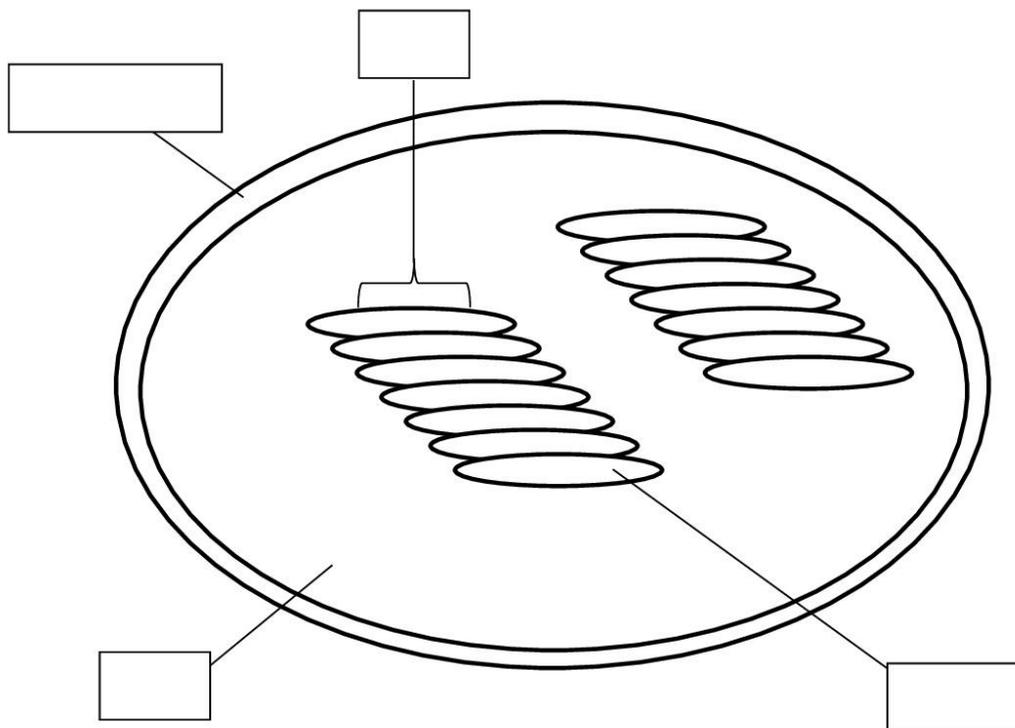
Pflanzen sind **photoautotroph**, d.h. sie nutzen Sonnenenergie um ihren Stoffwechsel zu betreiben. Dabei benötigen sie nur Wasser, gelöste Mineralien aus dem Boden und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) um alle nötigen Stoffe für das Wachstum und das Überleben herzustellen.

- \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### 2. ORT DER PHOTOSYNTHESE

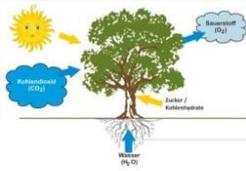
Die Photosynthese findet prinzipiell in allen grünen Blattbestandteilen statt, hauptsächlich jedoch in den grünen Blättern. Hier finden sich in speziellen Geweben in den Blättern Zellen, die sog. **Chloroplasten** besitzen.

Struktur der Chloroplasten:



1





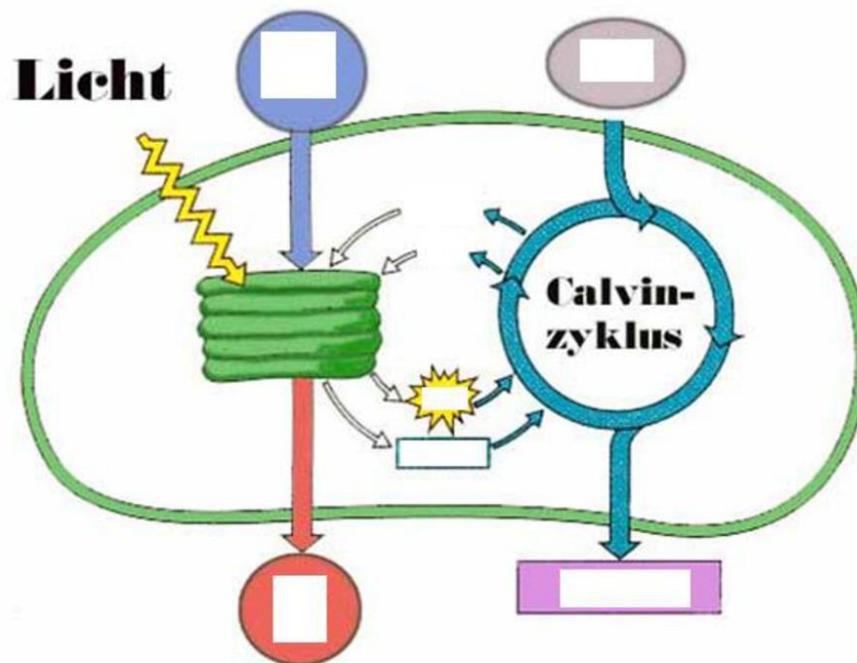
## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 3

### 4. DIE DUNKELREAKTION

Da ATP nur ein kurzzeitiger Speicher für Energie ist, wird in der Dunkelreaktion mit Hilfe der Produkte der Lichtreaktion und  $\text{CO}_2$  Zucker aufgebaut. Dieser kann gut gespeichert und transportiert werden.

Die Reaktion läuft im sog. Calvin Zyklus im Stroma der Chloroplasten ab:



## WIE WIRD DAS LICHT GENAU EINGEFANGEN?

### UNTERSUCHUNG DES BLATTFARBSTOFFES CHLOROPHYLL A

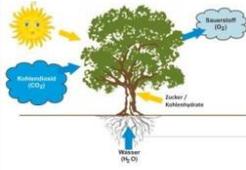
#### 1. CHROMATOGRAPHIE EINES SPINATEXTRAKTES

Um zu verstehen wie die Moleküle im Photosystem der Chloroplasten das Licht einfangen können betrachten wir das dort am häufigsten vorkommende Molekül genauer.

Um den Blattfarbstoff Chlorophyll a genau untersuchen zu können muss man ihn zuerst aus den Blättern isolieren. Dazu bedient man sich der Chromatographie.

Def.: Chromatographie ist ein Verfahren um chemische Verbindungen voneinander zu trennen

3



### A) HERSTELLUNG EINES SPINATEXTRAKTES

#### Materialien:

- 5 g Spinatblätter (frisch oder TK und aufgetaut)
- Mörser und Stößel
- Sand (1 Teelöffel)
- Calcium Carbonat (1 Spatelspitze)
- 10 ml Aceton
- 1 Kaffeefilter
- Trichter
- Reagenzglas

#### Durchführung:

Alle Zutaten werden in den Mörser gegeben. Dann wird ca. die Hälfte des Acetons hineingeschüttet und kräftig gerührt. Wenn die Blätter schon etwas zerkleinert sind wird der Rest des Acetons hinzugegeben und weiter gerührt bis ein grüner Brei entstanden ist und die Blätter ganz zerkleinert sind.

Der Brei wird über den Kaffeefilter in ein Reagenzglas abfiltriert. Dabei kann durch drücken von oben die Flüssigkeit durch den Filter gepresst werden.



#### SICHERHEITSHINWEIS: ACETON

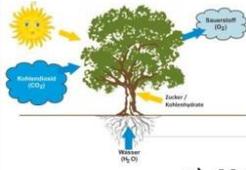


Xi  
reizend

F  
Leichtentzündlich

- Nicht direkt einatmen!
- direkten Hautkontakt vermeiden!
- Nicht verschlucken!





## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 5

### B) VORBEREITUNGEN FÜR DIE CHROMATOGRAPHIE

Herstellen des Laufmittels (wird vom Lehrer angesetzt):

- 10 ml Petrolbenzin
- 1 ml Isopropanol
- 1 Tropfen Destilliertes Wasser

Das fertige Laufmittel wird in die Marmeladengläser gegeben und der Deckel aufgesetzt. Erst nach einigen Minuten wenn genug Laufmittel verdunstet ist und im Glas Sättigung herrscht wird die Platte eingelegt.

#### SICHERHEITSHINWEIS: LAUFMITTEL



Xn gesundheitsschädlich  
N umweltgefährlich

- Nicht direkt einatmen!
- direkten Hautkontakt vermeiden!
- Nicht verschlucken!

### C) AUFTRAGEN UND LAUFEN LASSEN DER PLATTEN

#### Materialien:

- Spinatextrakt
- Chromatographieplatte
- Pipette
- Bleistift und Lineal

#### Durchführung:

Mit Lineal und Bleistift wird ca. 1cm unterhalb des Randes eine Linie leicht angezeichnet. Mit der Pipettenspitze wird etwas Extrakt aufgenommen und leicht auf den Strich pipettiert. Nachdem der Extrakt auf der Platte angetrocknet ist wird auf der gleichen Linie noch 4 Mal Extrakt aufgebracht um genügend Farbstoff auf die Platte zu bringen.

Die Platte wird getrocknet und dann in das Glas gestellt wobei dieses wieder verschlossen wird. Nach ca. 30 min wird die Platte herausgenommen und erneut getrocknet.



### 2. BESTIMMUNG DER LINIEN

Auf der fertig gelaufenen Platte finden sich mehrere Linien verschiedener Farbe.

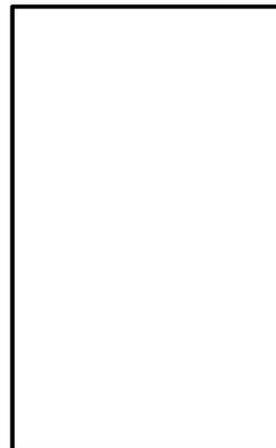
Zeichne die Linien mit der entsprechenden Farbe ein.

Was hat es zu bedeuten, dass mehrere Linien auftreten?

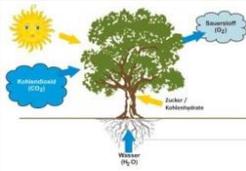
---



---



5



## 3. SPEKTROMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN

### A) DAS SONNENSPEKTRUM

Bevor wir den Blattfarbstoff untersuchen wollen wir uns einen Überblick verschaffen was für Licht Pflanzen zur Verfügung steht um Photosynthese zu betreiben.

Hierzu nehmen wir mit dem Spektrometer ein Sonnenspektrum auf.

#### Materialien:

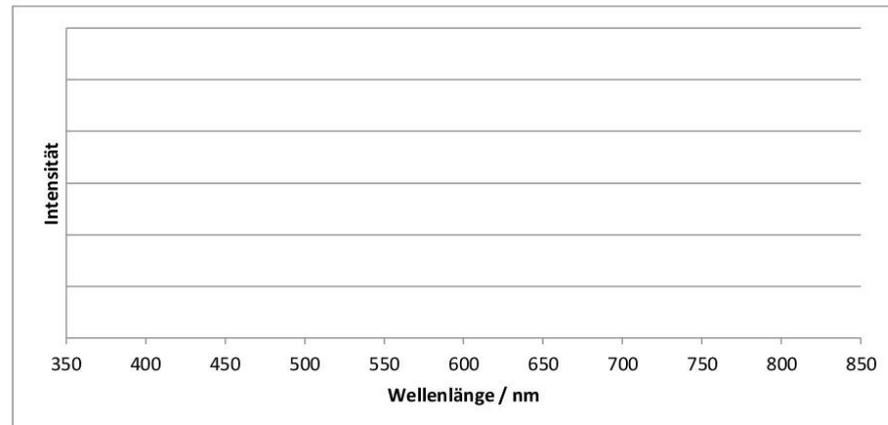
- Spektrometer
- Lichtleiter (mit 400  $\mu\text{m}$  Fenster)
- Laptop und Verbindungskabel

#### Durchführung:

Nachdem das Spektrometer an den Laptop angeschlossen ist wird das Messprogramm gestartet. Es wird hier nur die ankommende Intensität gemessen also müssen keine weiteren Einstellungen vorgenommen werden.

Mit dem Lichtleiter geht man an ein Fenster und hält das Ende gen Himmel um ein möglichst gutes Spektrum zu erhalten.

Was für ein Spektrum kann man erkennen? Versuche es zu skizzieren. Fällt dir etwas Besonderes auf?




---



---



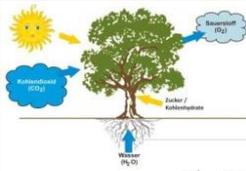
---



---



---



## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 7

### B) DAS ABSORPTIONSSPEKTRUM VON CHLOROPHYLL A

Nun wollen wir untersuchen, welches Licht der Blattfarbstoff Chlorophyll a absorbiert.

#### Materialien:

- Chromatographieplatte
- Spatel
- 2 Küvetten
- Ethanol
- Spektrometer mit Küvettenhalter

#### Durchführung:

Nachdem man das Spektrometer mit dem Küvettenhalter verbunden hat und an den Laptop angeschlossen hat, befüllt man beide Küvetten zu etwa 2/3 mit Ethanol.

Mit der Spatelspitze wird vorsichtig die Bande von Chlorophyll a von den Chromatographieplatten abgekratzt und in eine Küvette geschüttet. In die andere Küvette wird reiner Ethanol gegeben.

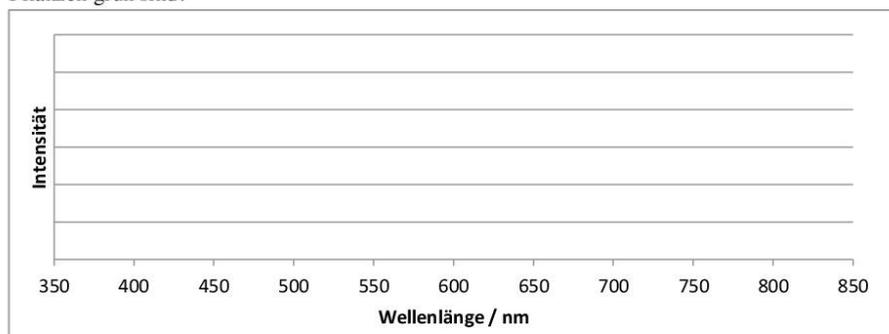
Zur Messung werden die Küvetten vorsichtig in den Küvettenhalter des Spektrometers gestellt.

#### Messung:

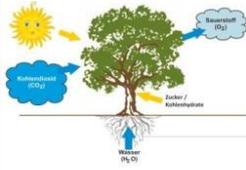
- Um die Absorption messen zu können, muss im Programm zuerst das **Dunkelspektrum** (das Streulicht durch die Umgebung) abgezogen werden.
- Dann muss das **Messlicht** eingeschaltet werden und mit dem Button **Integrationszeit** soweit heruntergeregt werden, dass man das volle Spektrum des Lichtes sehen kann.
- Nun muss man eine **Referenz** angeben, zu der die Absorption von Chlorophyll a gemessen werden soll. Dazu stellt man die Küvette mit reinem Ethanol in den Küvettenhalter und speichert das gemessene Spektrum als **Referenz**.
- Stellt man nun die Küvette mit dem Farbstoff ein und geht auf den Reiter **Absorption/Extinktion**, erhält man das Absorptionsspektrum von Chlorophyll a.

#### Aufgabe:

Skizziere das erhaltene Spektrum und erkläre, was es bedeutet. Kannst du nun erklären, warum Pflanzen grün sind?



7



## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 8

---



---



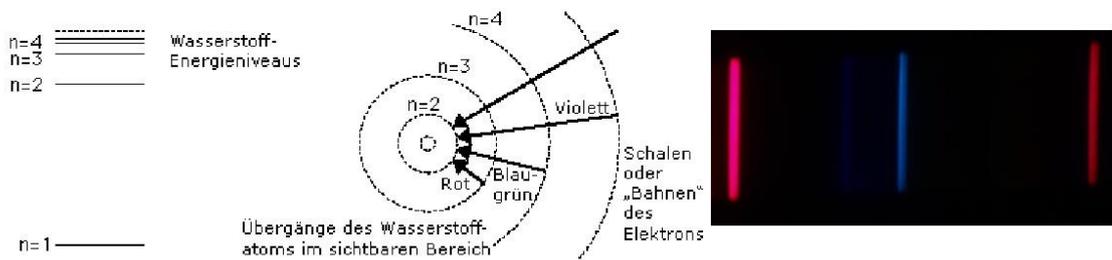
---



---

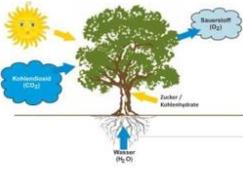
### 4. MOLEKÜLPHYSIK

A) Ein Atom kann Energie wie z.B. ankommendes Licht nur durch eine Anregung der Elektronen aufnehmen. Diese können nur bestimmte diskrete Energien aufnehmen wodurch sich ein diskretes **Absorptionsspektrum** mit Linien ergibt.



### B) DAS EINFACHE WASSERMOLEKÜL

Wir betrachten zur Deutung der Molekülabsorption zuerst das einfache H<sub>2</sub>O-Molekül:



## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 9

---

---

---

---

---

---

### C) CHLOROPHYLL A

Das Chlorophyll a Molekül ist sehr viel größer und komplexer als das Wassermolekül. Für die Absorption ist vor allem der Phytol Anhang wichtig da hier Elektronen angeregt werden können.

---

---

---

---

---

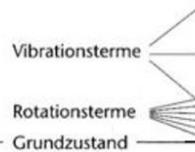
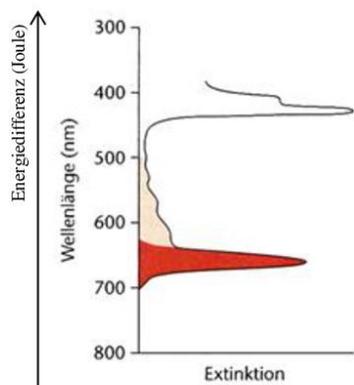
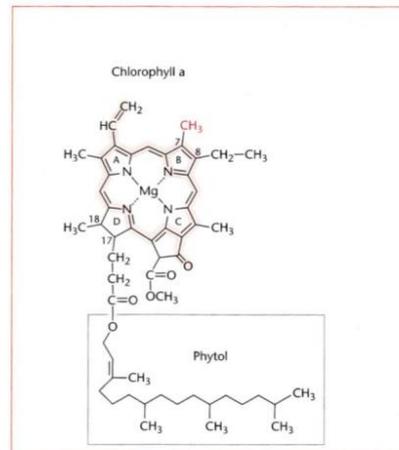
---

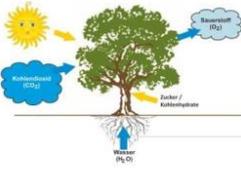
---

---

---

---





## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 10

### 5. FLUORESZENZ VON CHLOROPHYLL A

Um überflüssige Energie abzugeben kann ein angeregtes Elektron ein Lichtquant abgeben und somit in den Grundzustand zurückzukehren. Diesen Vorgang nennt man Fluoreszenz.

#### Materialien:

- Spinatextrakt
- gelaufene Chromatographieplatte
- UV-Taschenlampe

#### Durchführung:

Betrachte den Spinatextrakt und die gelaufene Chromatographieplatte bei normalen Licht und unter UV-Licht. Dazu am besten das Zimmer abdunkeln oder den Vorgang beschatten.

Was fällt auf?

---



---



---



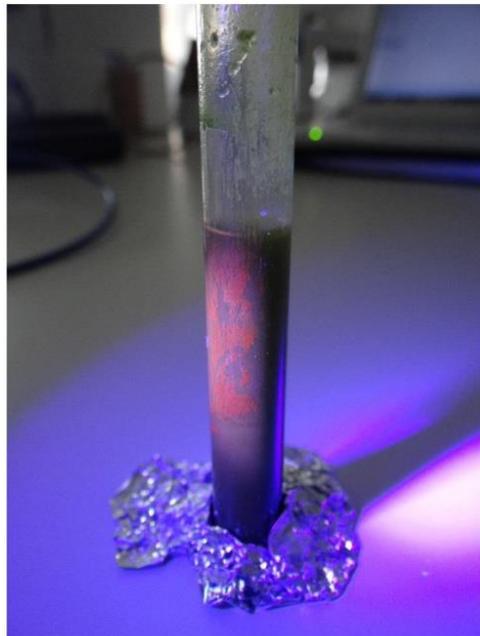
---



---

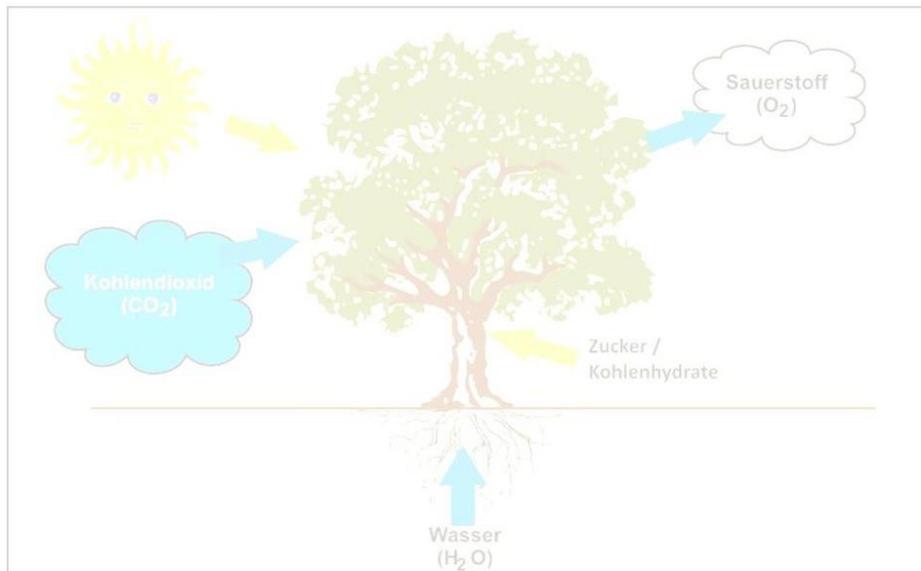


---



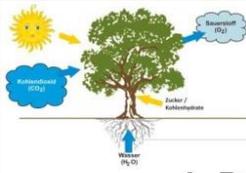
10

## 9.2.2 Lehrerhandout



# BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

„Würde man alle Kohlenhydrate, die in einem Jahr durch die Photosynthese produziert werden, in Zuckerwürfel umwandeln, würde sich ein Berg aus 300 Billionen Würfeln auftürmen. Aneinandergereiht reichten diese Würfel von der Erde bis zum (ehemaligen) Planeten Pluto!“



## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 1

### 1. BEDEUTUNG DER PHOTOSYNTHESE

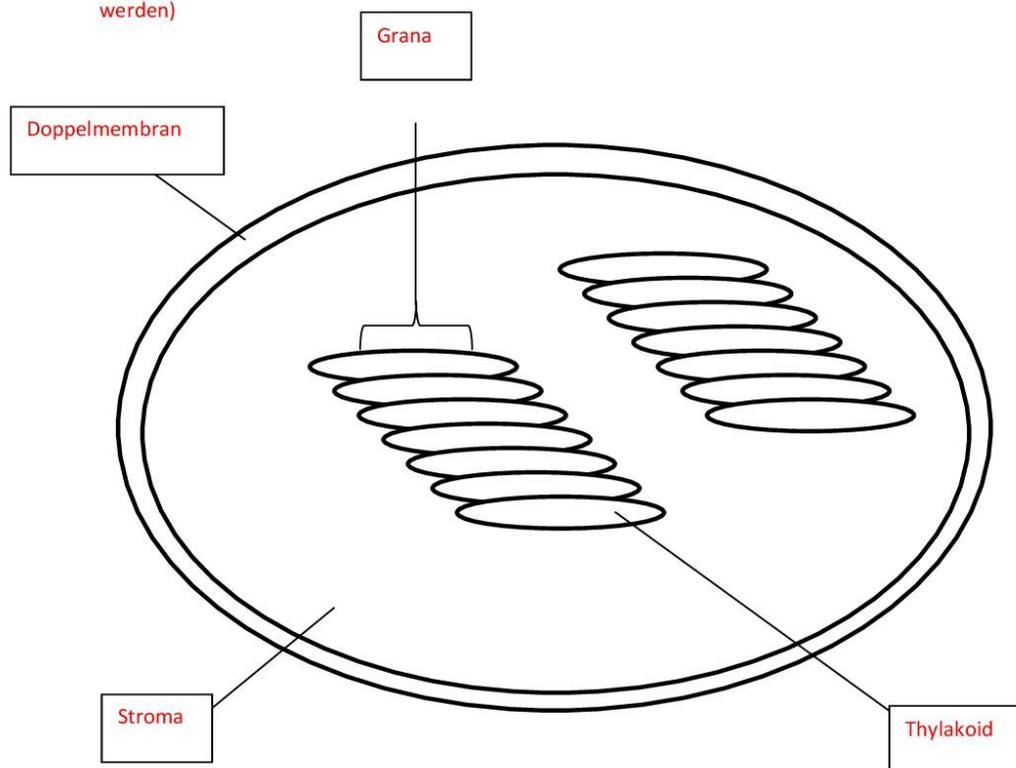
Pflanzen sind **photoautotroph**, d.h. sie nutzen Sonnenenergie um ihren Stoffwechsel zu betreiben. Dabei benötigen sie nur Wasser, gelöste Mineralien aus dem Boden und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) um alle nötigen Stoffe für das Wachstum und das Überleben herzustellen.

- Pflanzen dienen als Primärproduzenten als Nahrungsgrundlage für alle Organismen die nicht selbständig alle Notwendigen Verbindungen herstellen können
- Alle fossilen Brennstoffe wie Kohle und Erdöl die wir nutzen stammen von Pflanzenresten

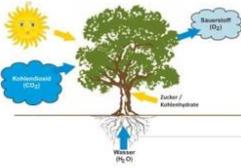
### 2. ORT DER PHOTOSYNTHESE

Die Photosynthese findet prinzipiell in allen grünen Blattbestandteilen statt, hauptsächlich jedoch in den grünen Blättern. Hier finden sich in speziellen Geweben in den Blättern Zellen, die sog. **Chloroplasten** besitzen.

Struktur der Chloroplasten: (die Struktur der Chloroplasten und kann anhand Folie 1 erarbeitet werden)



1



## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

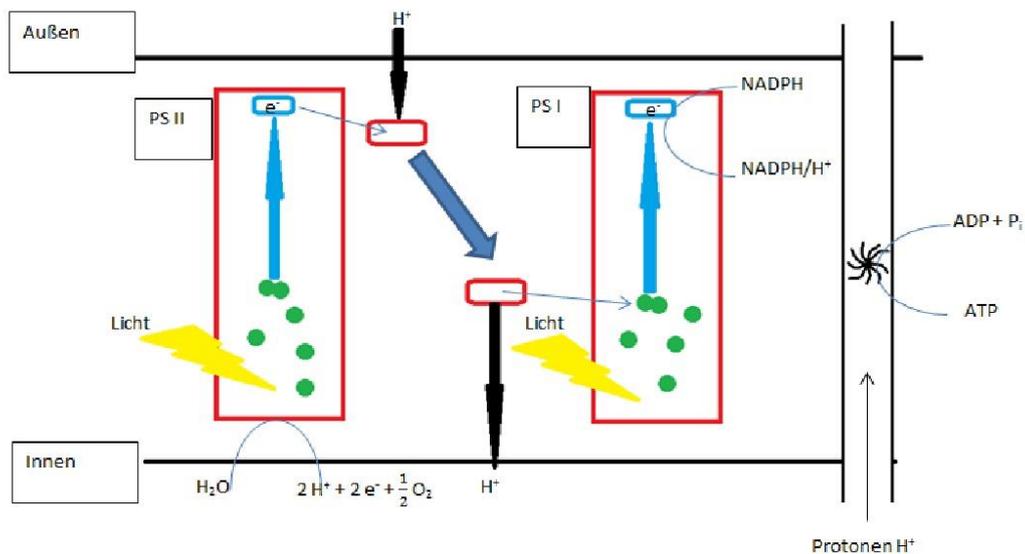
Seite | 2

Merkmale der Chloroplasten:

- doppelte Membranhülle
- Stroma: Flüssigkeit im Innenraum
- Thylakoide: Membransäckchen in Stapeln übereinander
- Jede Zelle hat ca. 30-40 Chloroplasten, das entspricht 500000 Chloroplasten pro  $\text{mm}^2$  Blattfläche

### 3. DIE LICHTREAKTION

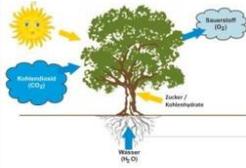
Vor der Behandlung der Lichtreaktion sollte zuerst auf die Trennung der Photosynthese in Licht- und Dunkelreaktion hingewiesen werden. Anhand des Applets auf der Seite [http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/chemie-interaktiv/ein\\_fall\\_fuer\\_zwei/effz\\_ein\\_fall\\_fuer\\_zwei.swf](http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/chemie-interaktiv/ein_fall_fuer_zwei/effz_ein_fall_fuer_zwei.swf) kann ausgehend von einem Moosblatt bis in die Membran der Chloroplasten hineinzoomen und dort die nun zu behandelnden Lichtsammelfallen erkennen.



In den Lichtsammelfallen wird die Lichtenergie aufgefangen und zum Reaktionszentrum transportiert. Dort wird ein Elektron abgegeben und über eine abfallende Elektronentransportkette zum PS I Komplex weitergeleitet. Dabei werden Protonen aus dem Stroma in den Thylakoidinnenraum gebracht. Das fehlende Elektron bei PS II wird aus der Spaltung von Wasser aufgefüllt. Dabei entsteht Sauerstoff als Abfallprodukt. Das PS I System wird ebenfalls von Licht angeregt und reduziert mit seinem Elektron NADPH zu  $\text{NADPH}/\text{H}^+$ . Der entstehende Protonengradient von Innen und Außenraum wird von der ATP Synthetase genutzt um aus ADP und Phosphor ATP aufzubauen, den universalen Energieträger der Zelle.

Somit sind die beiden Endprodukte der Lichtreaktion ATP und  $\text{NADPH}/\text{H}^+$ . Diese werden später in der Dunkelreaktion benötigt.

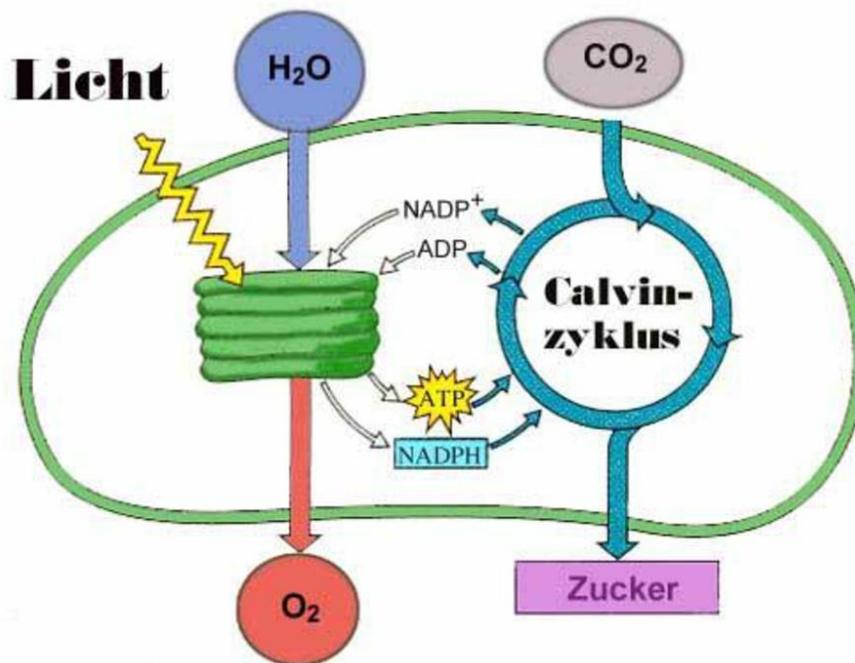
2



**4. DIE DUNKELREAKTION**

Da ATP nur ein kurzzeitiger Speicher für Energie ist, wird in der Dunkelreaktion mit Hilfe der Produkte der Lichtreaktion und CO<sub>2</sub> Zucker aufgebaut. Dieser kann gut gespeichert und transportiert werden.

Die Reaktion läuft im sog. Calvin Zyklus im Stroma der Chloroplasten ab:



**WIE WIRD DAS LICHT GENAU EINGEFANGEN?**

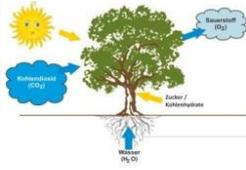
**UNTERSUCHUNG DES BLATTFARBSTOFFES CHLOROPHYLL A**

**1. CHROMATOGRAPHIE EINES SPINATEXTRAKTES**

Um zu verstehen wie die Moleküle im Photosystem der Chloroplasten das Licht einfangen können betrachten wir das dort am häufigsten vorkommende Molekül genauer.

Um den Blattfarbstoff Chlorophyll a genau untersuchen zu können muss man ihn zuerst aus den Blättern isolieren. Dazu bedient man sich der Chromatographie.

Def.: Chromatographie ist ein Verfahren um chemische Verbindungen voneinander zu trennen



## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 4

### A) HERSTELLUNG EINES SPINATEXTRAKTES

#### Materialien:

- 5 g Spinatblätter (frisch oder TK und aufgetaut)
- Mörser und Stößel
- Sand (1 Teelöffel)
- Calcium Carbonat (1 Spatelspitze)
- 10 ml Aceton (**bei kleineren Mörsern auch weniger**)
- 1 Kaffeefilter
- Trichter
- Reagenzglas

#### SICHERHEITSHINWEIS: ACETON



Xi  
reizend

F  
Leichtentzündlich

- Nicht direkt einatmen!
- direkten Hautkontakt vermeiden!
- Nicht verschlucken!

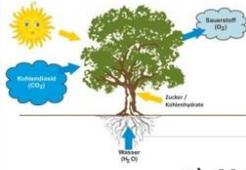
#### Durchführung:

Alle Zutaten werden in den Mörser gegeben. Dann wird ca. die Hälfte des Acetons hineingeschüttet und **kräftig** gerührt. Wenn die Blätter schon etwas zerkleinert sind wird der Rest des Acetons hinzugegeben und weiter gerührt bis ein grüner Brei entstanden ist und die Blätter ganz zerkleinert sind.

Der Brei wird über den Kaffeefilter in ein Reagenzglas abfiltriert. Dabei kann durch drücken von oben die Flüssigkeit durch den Filter gepresst werden.

**Je dunkler der Extrakt ist desto konzentrierter sind die Farbstoffe und umso besser für die Chromatographie**





## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 5

### B) VORBEREITUNGEN FÜR DIE CHROMATOGRAPHIE

Herstellen des Laufmittels (wird vom Lehrer angesetzt):

- 10 ml Petrolbenzin
  - 1 ml Isopropanol
  - 1 Tropfen Destilliertes Wasser
  - Bei mehr Laufmittel einfach die Zutaten im Verhältnis 10:1:0,01 Mischen
- In die Gläser bis zur Höhe von ca. 0,8 cm einfüllen

Das fertige Laufmittel wird in die Marmeladengläser gegeben und der Deckel aufgesetzt. Erst nach einigen Minuten wenn genug Laufmittel verdampft ist und im Glas Sättigung herrscht wird die Platte eingelegt.

### C) AUFTRAGEN UND LAUFEN LASSEN DER PLATTEN

Materialien:

- Spinatextrakt
- Chromatographieplatte
- Pipette
- Bleistift und Lineal

Durchführung:

Mit Lineal und Bleistift wird ca. 1cm unterhalb des Randes eine Linie leicht angezeichnet. Mit der Pipettenspitze wird etwas Extrakt aufgenommen und leicht auf den Strich pipettiert. Nachdem der Extrakt auf der Platte angetrocknet ist wird auf der gleichen Linie noch 4 Mal Extrakt aufgebracht um genügend Farbstoff auf die Platte zu bringen.

Die Platte wird getrocknet und dann in das Glas gestellt wobei dieses wieder verschlossen wird. Nach ca. 30 min wird die Platte herausgenommen und erneut getrocknet.

### 2. BESTIMMUNG DER LINIEN

Auf der fertig gelaufenen Platte finden sich mehrere Linien verschiedener Farbe.

Zeichne die Linien mit der entsprechenden Farbe ein.

Was hat es zu bedeuten, dass mehrere Linien auftreten?

Es gibt mehrere Farbstoffe im Spinat. Manche davon sind sogar gelb obwohl das Blatt grün ist.

(Manchmal kann man ganz oben an der Laufmittelfront noch eine gelbe Linie erkennen, das ist der Farbstoff Carotin.)

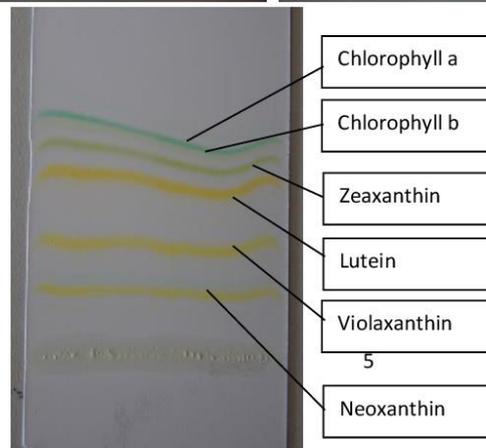
### SICHERHEITSHINWEIS: LAUFMITTEL

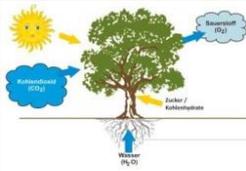


Xn  
gesundheitsschädlich

N  
umweltgefährlich

- Nicht direkt einatmen!
- direkten Hautkontakt vermeiden!
- Nicht verschlucken!





## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 6

### 3. SPEKTROMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN

(an dieser Stelle sollte zuerst anhand Folie 2 das Prinzip der Chromatographie erklärt werden)

#### A) DAS SONNENSPEKTRUM

Bevor wir den Blattfarbstoff untersuchen wollen wir uns einen Überblick verschaffen was für Licht Pflanzen zur Verfügung steht um Photosynthese zu betreiben.

Hierzu nehmen wir mit dem Spektrometer ein Sonnenspektrum auf. (vor der Aufnahme des Spektrums bietet es sich an anhand Folie 3 das Lichtspektrum zu wiederholen/besprechen.)

Materialien:

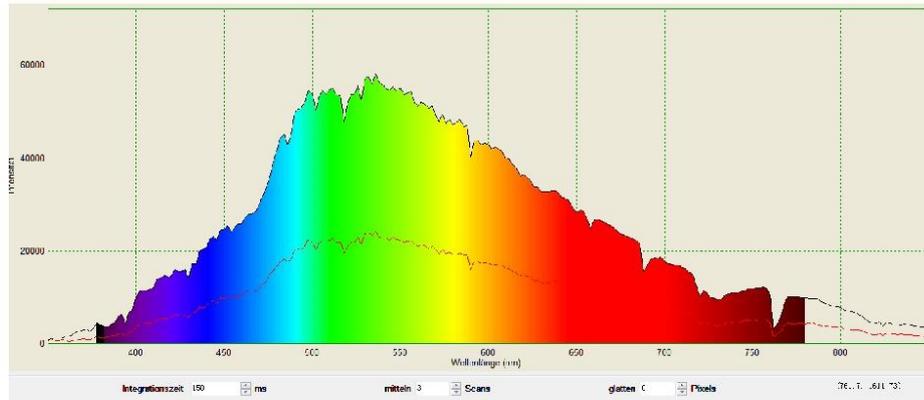
- Spektrometer
- Lichtleiter (mit 400 µm Fenster) (mit dem größeren Fenster kann man auch bei verdunkeltem Himmel ein gutes Spektrum erhalten)
- Laptop und Verbindungskabel

Durchführung:

Nachdem das Spektrometer an den Laptop angeschlossen ist wird das Messprogramm gestartet. Es wird hier nur die ankommende Intensität gemessen also müssen keine weiteren Einstellungen vorgenommen werden.

Mit dem Lichtleiter geht man an ein Fenster und hält das Ende gen Himmel um ein möglichst gutes Spektrum zu erhalten.

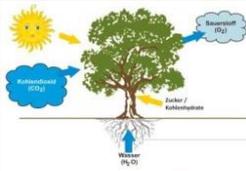
Was für ein Spektrum kann man erkennen? Versuche es zu skizzieren. Fällt dir etwas Besonderes auf?



Das Sonnenspektrum ist im Bereich des Grünen am Intensivsten. Es finden sich immer wieder Einbuchtungen des Spektrums. Hier wurde das Licht von Elementen in der Atmosphäre der Sonne und der Erde absorbiert, z.B.

- 761 nm → Sauerstoff in der Erdatmosphäre
- 486 nm → Wasserstoff von der Sonne

6



## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 7

### B) DAS ABSORPTIONSSPEKTRUM VON CHLOROPHYLL A

Nun wollen wir untersuchen, welches Licht der Blattfarbstoff Chlorophyll a absorbiert.

#### Materialien:

- Chromatographieplatte
- Spatel
- 2 Küvetten
- Ethanol
- Spektrometer mit Küvettenhalter

#### Durchführung:

Nachdem man das Spektrometer mit dem Küvettenhalter verbunden hat und an den Laptop angeschlossen hat, befüllt man beide Küvetten zu etwa 2/3 mit Ethanol.

Mit der Spatelspitze wird vorsichtig die Bande von Chlorophyll a von den Chromatographieplatten abgekratzt und in eine Küvette geschüttet. In die andere Küvette wird reiner Ethanol gegeben.

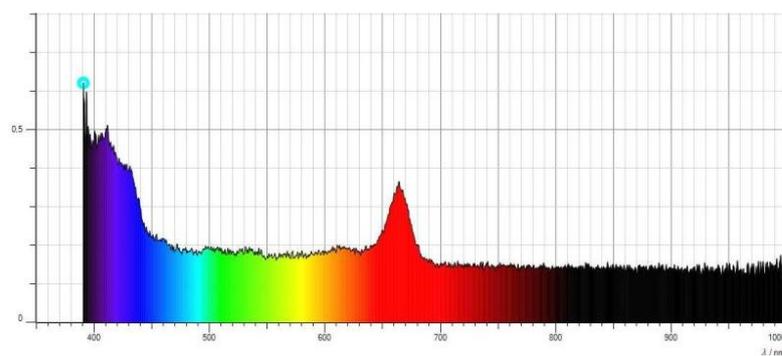
Zur Messung werden die Küvetten vorsichtig in den Küvettenhalter des Spektrometers gestellt.

#### Messung: (eine genaue Anleitung zum jeweiligen verwendeten Gerät ist beigelegt)

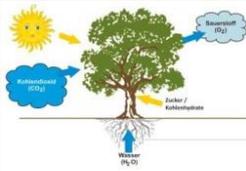
- Um die Absorption messen zu können, muss im Programm zuerst das **Dunkelspektrum** (das Streulicht durch die Umgebung) abgezogen werden.
- Dann muss das **Messlicht** eingeschaltet werden und mit dem Button **Integrationszeit** soweit heruntergeregt werden, dass man das volle Spektrum des Lichtes sehen kann.
- Nun muss man eine **Referenz** angeben, zu der die Absorption von Chlorophyll a gemessen werden soll. Dazu stellt man die Küvette mit reinem Ethanol in den Küvettenhalter und speichert das gemessene Spektrum als **Referenz**.
- Stellt man nun die Küvette mit dem Farbstoff ein und geht auf den Reiter **Absorption/Extinktion**, erhält man das Absorptionsspektrum von Chlorophyll a.

#### Aufgabe:

Skizziere das erhaltene Spektrum und erkläre, was es bedeutet. Kannst du nun erklären, warum Pflanzen grün sind?



7



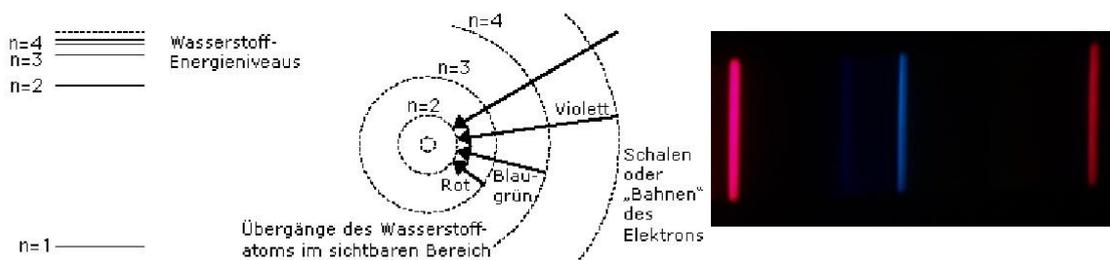
## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 8

Das Maximum der Absorption ist im Blauen und im Roten. In diesem Bereich wird das meiste Licht von Chlorophyll a absorbiert und somit für die Photosynthese genutzt. Grünes Licht hingegen wird so gut wie nicht genutzt und somit reflektiert. Deswegen erscheinen uns Pflanzen grün.

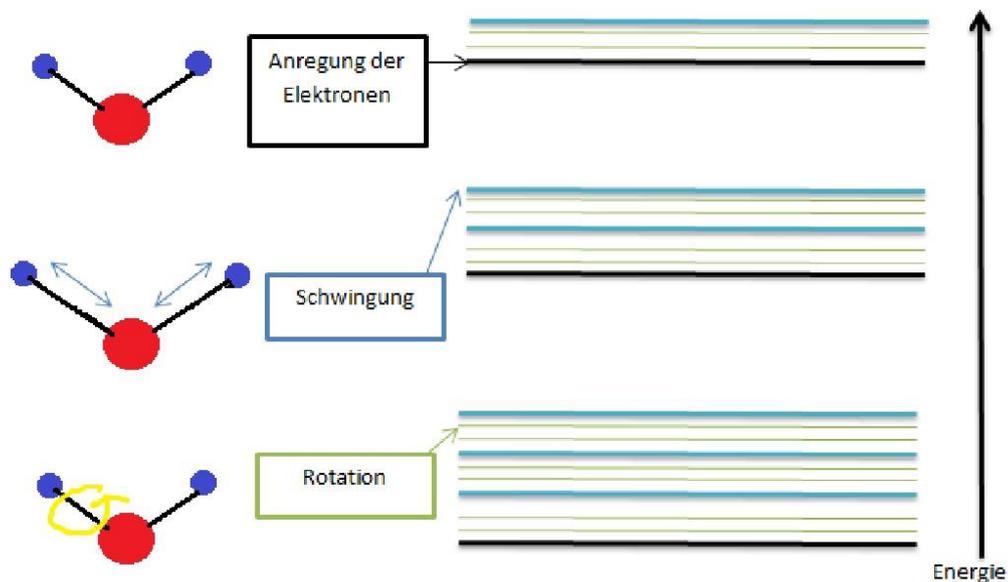
### 4. MOLEKÜLPHYSIK

A) Ein Atom kann Energie wie z.B. ankommendes Licht nur durch eine Anregung der Elektronen aufnehmen. Diese können nur bestimmte diskrete Energien aufnehmen wodurch sich ein diskretes **Absorptionsspektrum** mit Linien ergibt.

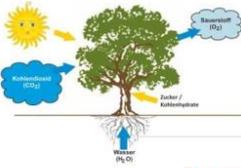


### B) DAS EINFACHE WASSERMOLEKÜL

Wir betrachten zur Deutung der Molekülabsorption zuerst das einfache  $H_2O$ -Molekül:



8



## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 9

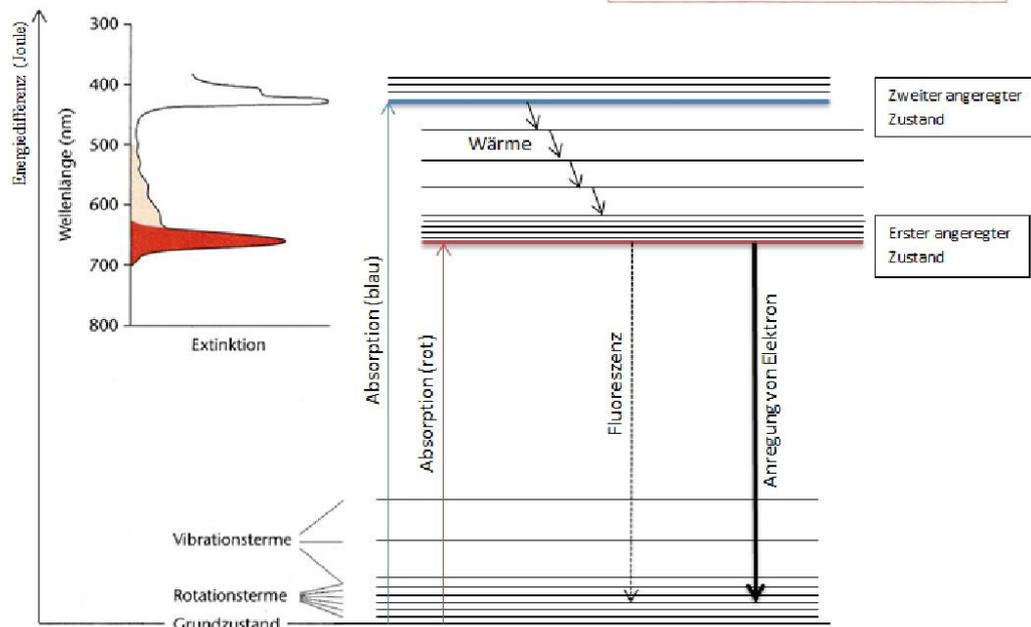
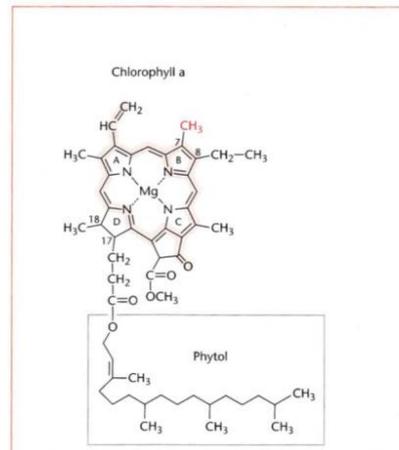
Durch die Schwingung und Rotation eines Moleküls unterteilen sich die diskreten Elektronenniveaus in Rotations- und Schwingungsniveaus. Dadurch können viele verschiedene, aber nahe beieinander liegende Energien aufgenommen werden. Die diskreten Linien stehen im Absorptionsdiagramm so nahe das man sie durch eine Absorptionsbande nähert.

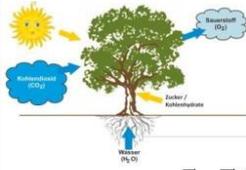
### C) CHLOROPHYLL A

Das Chlorophyll a Molekül ist sehr viel größer und komplexer als das Wassermolekül. Für die Absorption ist vor allem der Phytol Anhang wichtig da hier Elektronen angeregt werden können.

Das Chlorophyll a Molekül ist sehr viel größer und komplexer als das Wassermolekül. Für die Absorption ist vor allem der Phytol Anhang wichtig da hier Elektronen angeregt werden können.

Da das Chlorophyll wie wir bereits gesehen hat zwei Maxima in der Absorption hat (bei Blau und bei Rot) kann man davon ausgehen das es sich um zwei Elektronenanregungszustände handelt die in Schwingungs- und Rotationsniveaus unterteilt sind.





## BIOPHYSIK: PHOTOSYNTHESE

Seite | 10

### 5. FLUORESCENZ VON CHLOROPHYLL A

Um überflüssige Energie abzugeben kann ein angeregtes Elektron ein Lichtquant abgeben und somit in den Grundzustand zurückzukehren. Diesen Vorgang nennt man Fluoreszenz.

#### Materialien:

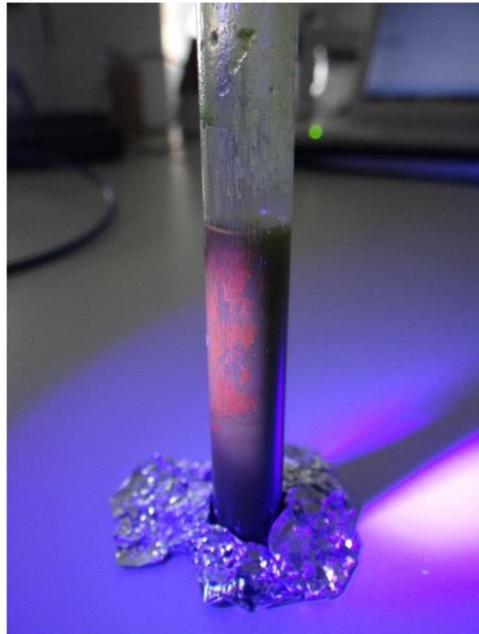
- Spinatextrakt
- gelaufene Chromatographieplatte
- UV-Taschenlampe

#### Durchführung:

Betrachte den Spinatextrakt und die gelaufene Chromatographieplatte bei normalen Licht und unter UV-Licht. Dazu am besten das Zimmer abdunkeln oder den Vorgang beschatten.

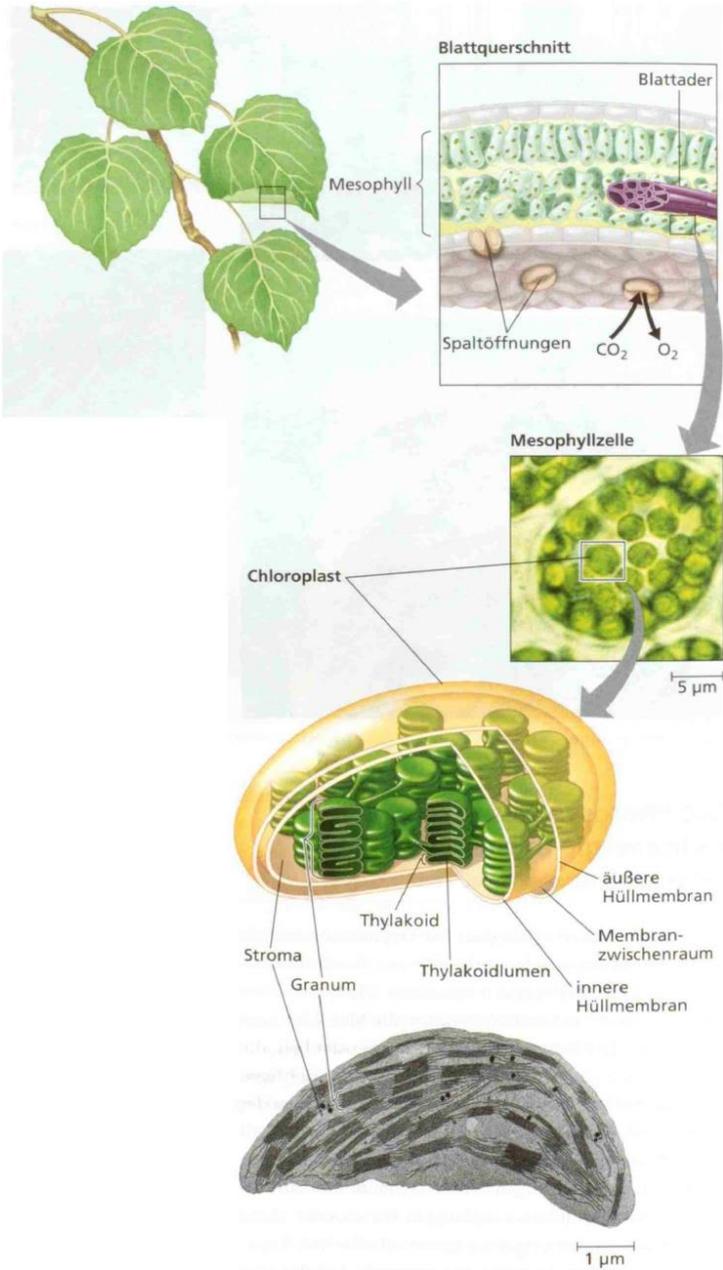
Was fällt auf?

Der Extrakt mit den Farbstoffen ist unter normalem Licht grün und unter UV-Licht dunkelrot. Da die Zellen des Blattes zerstört sind kann keine Photosynthese mehr stattfinden und das Chlorophyll gibt die aufgenommene Energie wieder über Fluoreszenz ab. Denselben Vorgang kann man auch auf der Platte beobachten.



10

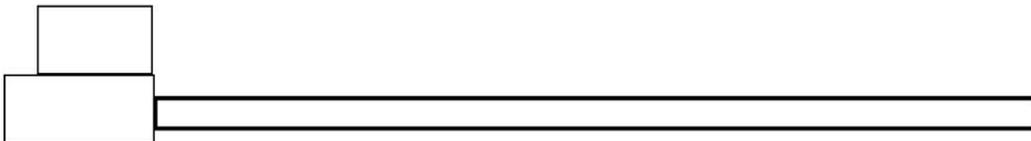
9.2.3 Verwendete Folien



## DAS PRINZIP DER CHROMATOGRAPHIE

Mit Hilfe der Chromatographie kann man Stoffgemische nach ihren einzelnen Bestandteilen hin auftrennen. Man bedient sich hier der unterschiedlich großen Wechselwirkung der Stoffe mit einer sog. stationären Phase wenn sie in einer mobilen Phase darüber hinweg bewegt werden.

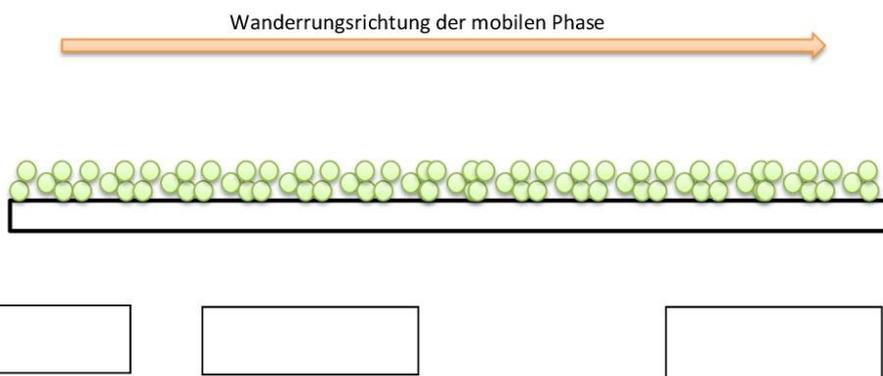
- **Mobile Phase:** Bei der sog. Dünnschichtchromatographie ist die mobile Phase das flüssige Laufmittel
- **Stationäre Phase:** Auf eine dünne Platte aus Plastik oder Aluminium wird eine dünne Schicht Kieselgel aufgetragen. Dies besteht aus sehr vielen kleinen Körnern und hat dadurch eine große Oberfläche, die das Laufmittel nach oben zieht.



- **Trennung der Stoffe:** Das Kieselgel hat eine polare Oberfläche. Während das Laufmittel also über die stationäre Phase hinweg bewegt wird wechselwirken die Bestandteile der Probe je nach ihrer Polarität unterschiedlich stark mit dem Kieselgel.

Es gilt:

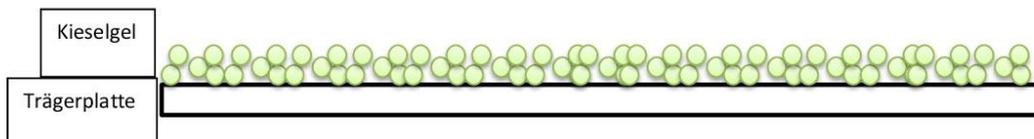
- Je polarer eine Substanz, desto mehr Wechselwirkung findet mit der stationären Phase statt.
- Je mehr Wechselwirkung stattfindet desto langsamer läuft der Stoff in der mobilen Phase weiter.
- Durch die unterschiedlichen Wanderungsgeschwindigkeiten findet eine Trennung der Stoffe statt.



## DAS PRINZIP DER CHROMATOGRAPHIE

Mit Hilfe der Chromatographie kann man Stoffgemische nach ihren einzelnen Bestandteilen hin auftrennen. Man bedient sich hier der unterschiedlich großen Wechselwirkung der Stoffe mit einer sog. stationären Phase wenn sie in einer mobilen Phase darüber hinweg bewegt werden.

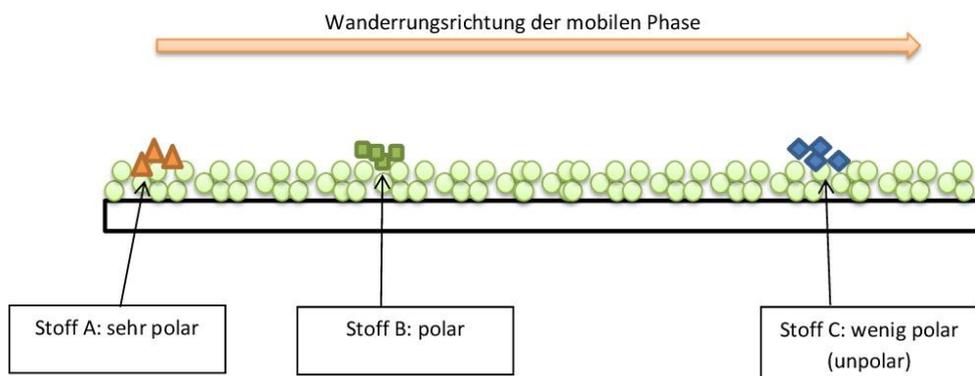
- **Mobile Phase:** Bei der sog. Dünnschichtchromatographie ist die mobile Phase das flüssige Laufmittel
- **Stationäre Phase:** Auf eine dünne Platte aus Plastik oder Aluminium wird eine dünne Schicht Kieselgel aufgetragen. Dies besteht aus sehr vielen kleinen Körnern und hat dadurch eine große Oberfläche, die das Laufmittel nach oben zieht.

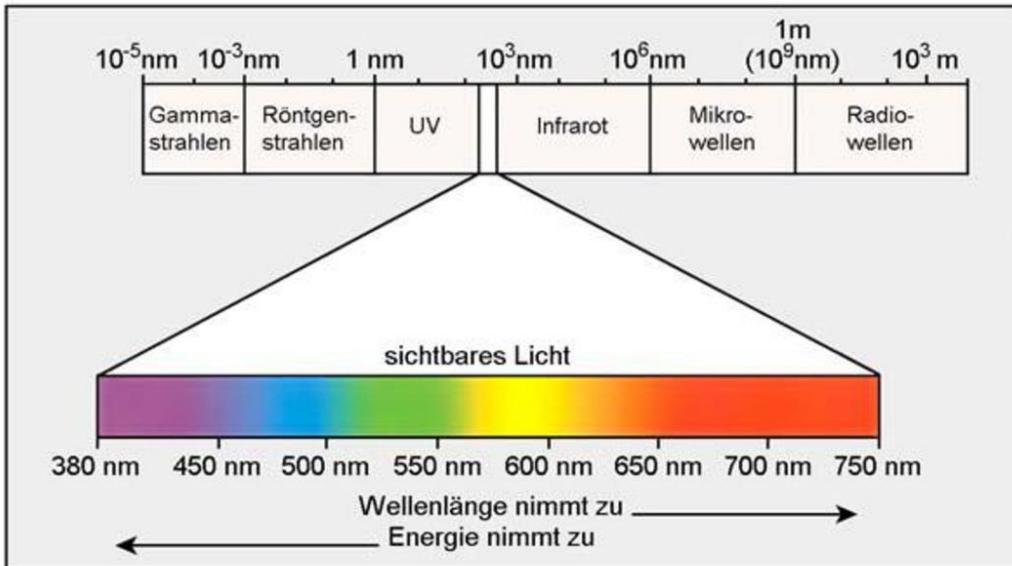


- **Trennung der Stoffe:** Das Kieselgel hat eine polare Oberfläche. Während das Laufmittel also über die stationäre Phase hinweg bewegt wird wechselwirken die Bestandteile der Probe je nach ihrer Polarität unterschiedlich stark mit dem Kieselgel.

Es gilt:

- Je polarer eine Substanz, desto mehr Wechselwirkung findet mit der stationären Phase statt.
- Je mehr Wechselwirkung stattfindet desto langsamer läuft der Stoff in der mobilen Phase weiter.
- Durch die unterschiedlichen Wanderungsgeschwindigkeiten findet eine Trennung der Stoffe statt.





[http://www.uni-duesseldorf.de/MathNat/Biologie/Didaktik/Fotosynthese\\_neu/dateien/licht/bilder/licht.jpg](http://www.uni-duesseldorf.de/MathNat/Biologie/Didaktik/Fotosynthese_neu/dateien/licht/bilder/licht.jpg)

### 9.3 Fragebogen zur Unterrichtseinheit

**FRAGEBOGEN ZUR UNTERRICHTSEINHEIT PHOTOSYNTHESE:**

Kreuze bitte dein Geschlecht an.	<input type="checkbox"/> Weiblich	<input type="checkbox"/> Männlich
----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------

	trifft völlig zu	trifft teilweise zu	trifft kaum zu	trifft gar nicht zu
Physikalische Sachverhalte interessieren mich.	○	○	○	○
Biologische Sachverhalte interessieren mich.	○	○	○	○
Das Thema Photosynthese hat mich interessiert	○	○	○	○
Das Handout war übersichtlich und ansprechend.	○	○	○	○
Die Arbeitsaufträge waren verständlich.	○	○	○	○
Der Zusammenhang der einzelnen Stunden war erkenntlich.	○	○	○	○
Ich habe die grundsätzlichen Mechanismen verstanden mit denen Pflanzen Lichtenergie einfangen und nutzen.	○	○	○	○
Die Experimente haben mir dabei geholfen.	○	○	○	○
Die Experimente haben mir Spaß gemacht.	○	○	○	○
Ich würde gerne mehr zum Thema Photosynthese im Biophysikunterricht machen.	○	○	○	○

**PLATZ FÜR SONSTIGE ANREGUNGEN UND FEEDBACK:**

---



---



---



---



---



---

## 10. Danksagung

Als letztes möchte ich mich bei allen bedanken, die tatkräftig durch ihre Unterstützung dazu beigetragen haben, diese Hausarbeit in dieser Form zu erstellen.

Großer Dank gilt meinem Betreuer, Markus Elsholz. Er hatte immer ein offenes Ohr für meine Vorschläge und Probleme und half mir immer weiter mit Anregungen.

Auch bei Denise Fischer möchte ich mich recht herzlich bedanken. Sie half mir immer bei der Besorgung aller nötiger Materialien für die Unterrichtseinheit.

Vielen Dank auch an Herrn Dr. Dietrich des Humboldt Gymnasiums Schweinfurt für die Möglichkeit in seiner Klasse den Unterricht durchführen zu können.

Als letztes vielen Dank an Freunde und Familie die mir immer moralische Unterstützung gegeben haben.

## **11. Eigenständigkeitserklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Weiterhin versichere ich, dass ich die Arbeit nicht schon als Doktor- oder Diplomarbeit an einer anderen Hochschule, als Hausarbeit oder Facharbeit bei einer anderen Lehramtsprüfung oder als Teil solcher Arbeiten eingereicht habe.

Würzburg, den 06.März 2014

---

Gerald Hinder