

Absorptionsverhalten der Chlorophylle in der Energiefalle der Photosynthese

Ein Modellexperiment

Manfred Hesse

Kurzfassung

Die Primärprozesse der Photosynthese stellen aufgrund der für das Verständnis benötigten chemischen Grundlagen, aber auch wegen der Art und Weise der Darstellung in Lehr- und Schulbüchern für Schüler ein schwieriges Thema dar. Der von EISING et al. (1998) angebotene Vorschlag eines molekular-strukturellen Ansatzes wird durch das vorgelegte Experiment veranschaulicht.

1 Einleitung

Die Primärprozesse der Photosynthese wurden in einem Beitrag von EISING et al. (1998) didaktisch grundsätzlich überarbeitet, um dieses für den Schüler schwierige Thema durch Einbeziehen der Molekular-Struktur der Thylakoidmembran zugänglicher und weniger abstrakt erläuterbar zu machen. Die komplexen Reaktionen werden dabei nach dem Prinzip der Struktur-Funktionsbeziehung dargestellt. Unter den Teilreaktionen „Absorption, Energietransfer, Ladungstrennung“, „Wasseroxidation“ und „Elektronentransport, ATP-Bildung“ kommt der Lichtabsorption – auch unter übergreifenden schulischen Aspekten (z.B. HESSE, 1976) – eine besondere Stellung zu. Aus diesem Grund wird in Anlehnung an Thematik und Sachaussage des o.a. Artikels ein Modellversuch vorgeschlagen, der geeignet ist, die Lichtabsorption unterschiedlicher Wellenlängen durch die dort vorgestellten Chlorophyll-„sorten“ zu veranschaulichen. In den gängigen Versuchsbeschreibungen zur Photosynthese ist dieser Versuch nicht enthalten (vgl. z.B. BEISENHERZ, 1992; BANNWARTH et al., 1996).

Wesentlich ist dabei zu verstehen, dass ein übergreifendes Prinzip aufgezeigt wird, nämlich die Erkenntnis, dass Funktionen (hier: der Photosynthese) an definierte Strukturen der Zelle gebunden sind (vgl. auch die Übersicht über die Photosyntheseforschung bei DREWS, 1998). Werden diese Strukturen zerstört, verändert oder gehen sie verloren (durch Extraktion), dann werden die Funktionen auch verändert. Dieses Prinzip wird in der Literatur oftmals nicht explizit erwähnt.

2 Didaktische Vorüberlegungen

Die dargelegten Grundlagen sind stark gekürzt und beziehen sich lediglich auf die Verhältnisse der Photosynthese, die für den beschriebenen Modellversuch relevant sind. Diese Vorüberlegungen beziehen sich im Wesentlichen auf MÄNTELE, 1990; MOHR & SCHOPFER, 1992; RICHTER, 1998 und EISING et al., 1998.

Antennenkomplex: Für die Primärprozesse der Photosynthese sind vier Proteinkomplexe entscheidend, von denen nachfolgend nur die beiden Photosysteme (PSI und PSII) berücksichtigt werden. Die Grundstruktur eines Photosystems, sowohl bei PSI als auch bei PSII, bildet ein Kernkomplex (Proteine und Reaktionszentrum), um den sich ein Antennenkomplex aus Proteinen und Pigmenten (darunter etwa 200 bis 300 Chlorophyllmoleküle) befindet.

Die Funktion des Antennenkomplexes besteht darin, eine größere Fläche für die Lichtabsorption, also zum „Energie-Einfangen“, zu bilden; diese Energie muss anschließend (wie auch immer) zum Reaktionszentrum gelangen, wo sie in chemische Energie umgeformt wird. EISING et al. (1998) diskutieren ausführlich die Nachteile der Termini Trichtermodell, Lichtsammelfalle sowie Energiesammelfalle. Sie halten „Energiefalle“ für die Beschreibung des „Einfangens“ der Energie für sachgerechter und eindeutiger.

Absorption: Die Absorption der Pigmente¹, die in der Thylakoidmembran gebunden sind, unterscheidet sich deutlich von der Absorption herausgelöster Pigmente (z.B. mittels Aceton oder Alkoholen). Dieses Phänomen ist messbar²

¹ Weißlicht ist eine Mischung aus Licht verschiedener Wellenlängen; das Gehirn erzeugt bei einer bestimmten Mischung dieser verschiedenen „Lichtqualitäten“ den Eindruck „Weiß“. Organische Moleküle mit vielen konjugierten Doppelbindungen haben die Fähigkeit, Licht bestimmter Spektralbereiche zu absorbieren. Die nicht absorbierten Anteile des Spektrums bestimmen die Eigenfärbung dieser Moleküle, genannt Pigmente.

² Lichtabsorption wird mit einem Spektralphotometer gemessen. In diesen Geräten wird weißes Licht in die einzelnen Spektralfarben zerlegt. Dieses Farblicht wird entweder kontinuierlich (z.B. von 400

und kann in einem Absorptionsspektrum³ graphisch dargestellt werden (Abb. 1). Misst man die Absorption von Chlorophyll a und b in situ (in den Thylakoiden des Blattes), stellt man fest, dass die Maxima der Absorption, und zwar sowohl im blauen als auch im roten Bereich, im Vergleich zum Spektrum gelöster Chlorophylle zum Langwelligen hin verschoben sind. Weiterhin zeigt sich, was zunächst noch überraschender ist, dass es eine ganze Reihe von Chlorophyllen mit unterscheidbarem Absorptionsverhalten gibt (Abb. 2).

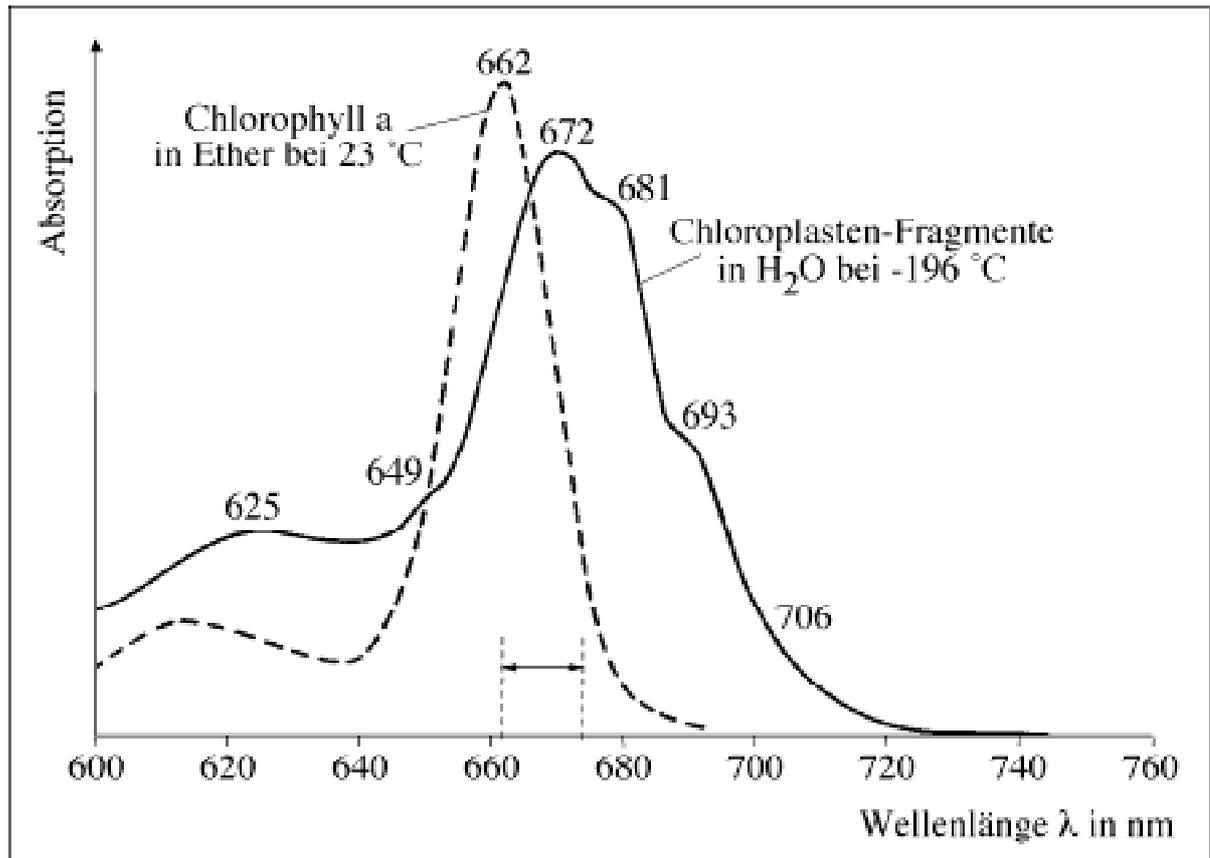


Abb. 1: Unterschiedliche Absorption von Chlorophyll a in Lösung (Ether) bzw. in *Euglena*-Chloroplasten (Spektrum gemessen bei -196 °C) (aus RICHTER, 1988, 104).

Ursache hierfür muss die Bindung der Chlorophyllmoleküle an die Proteine der Thylakoidmembran sein (RICHTER, 1998, 93 u. 118; EISING et al., 1998). Bei dem Chlorophyll in der Membran und in der Lösung handelt es sich chemisch gesehen nämlich um das gleiche Molekül. Die Chlorophyllmoleküle – in Form von Pigment-Protein-Komplexen – besitzen also aufgrund der Wechsel-

bis 730 nm) durch die Farblösung gestrahlt oder nur Licht ausgewählter Wellenlängen (z.B. in Abständen von einigen Nanometern). Anschließend wird die hinter der Lösung noch vorhandene Lichtmenge gemessen und mit der eingestrahlt Lichtmenge verglichen.

³ In derartigen Spektren wird auf der Ordinate der Umfang der Lichtabsorption für alle Wellenlängen des (i.d.R. sichtbaren) Lichtes (auf der Abszisse) abgetragen.

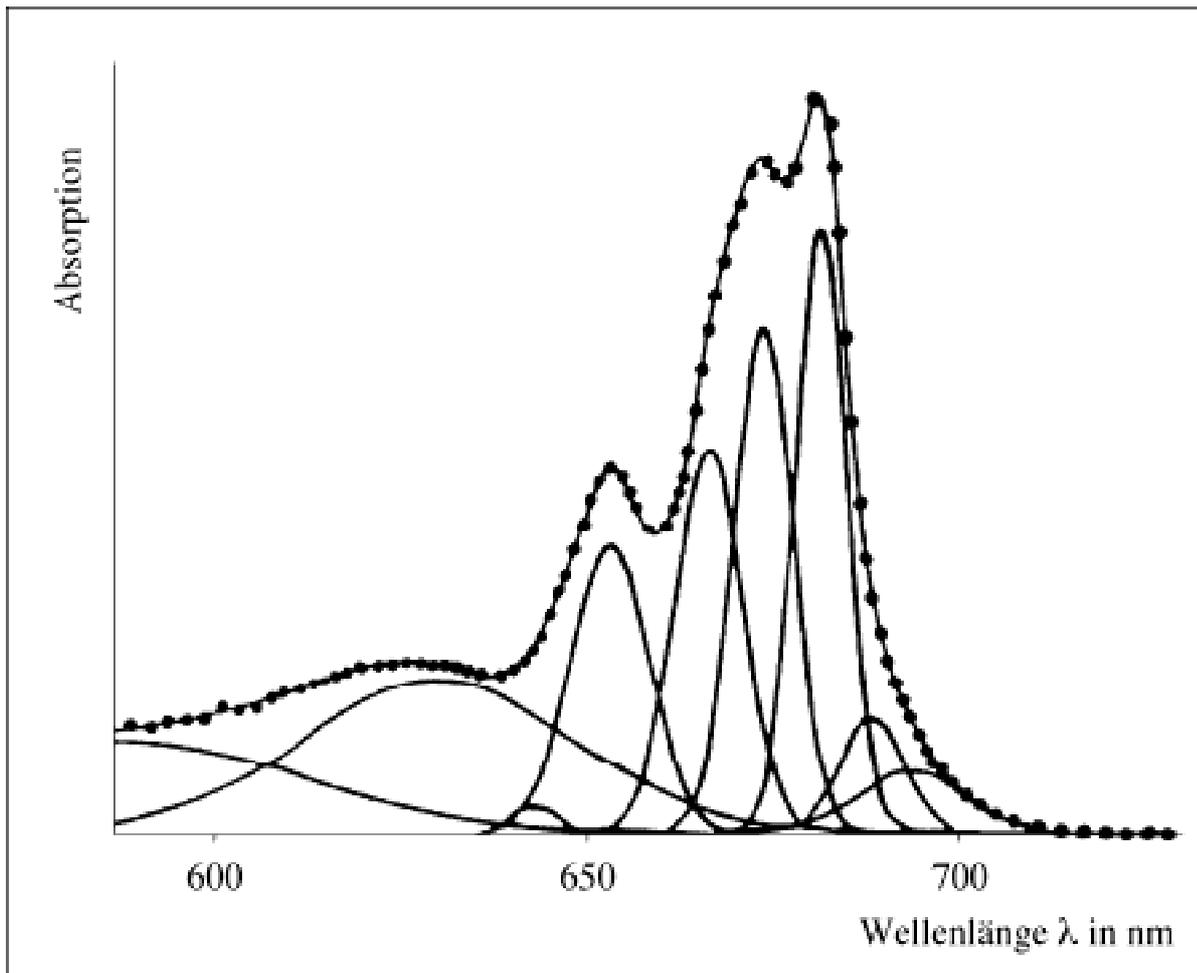


Abb. 2: Spektroskopischer Nachweis mehrerer Chlorophyll-Protein-Komplexe in Thylakoiden einer Grünalge (*Chlorella*). Das gemessene Tieftemperaturspektrum (gepunktete Linie) wurde mathematisch in GAUSSsche Verteilungskurven zerlegt: Es wurden vier Chlorophyll a-Formen (im roten Bereich befindet sich das jeweilige Absorptionsmaximum bei 662, 670, 677 und 684 nm) und zwei Chlorophyll b-Formen (640 und 650 nm) identifiziert. Derartige Komplexe wurden für Grünalgen und höhere Pflanzen nachgewiesen (verändert nach MOHR & SCHOPFER, 1978, 147).

wirkung mit den Strukturen in den Thylakoiden andere Eigenschaften als außerhalb (vgl. Abb. 2).

Weitergabe der Energie: Die Energie wird in dem Antennenkomplex über mehrere, bis zu 100 und mehr Chlorophyllmoleküle „weitergegeben“, wobei sie jeweils von einem Molekül-Nachbarn, dessen Absorptionsmaximum etwas langwelliger ist, empfangen wird, bis sie schließlich am Reaktionszentrum ankommt.

Warum ist das so?

Bei dem Transfer der Energie von Molekül zu Molekül geht ein geringer Teil der Energie als Wärme verloren. Die Energieverhältnisse beim Licht sind aber derart zu beschreiben, dass entsprechend der Formel $E = h \cdot 1/\lambda$ der Ener-

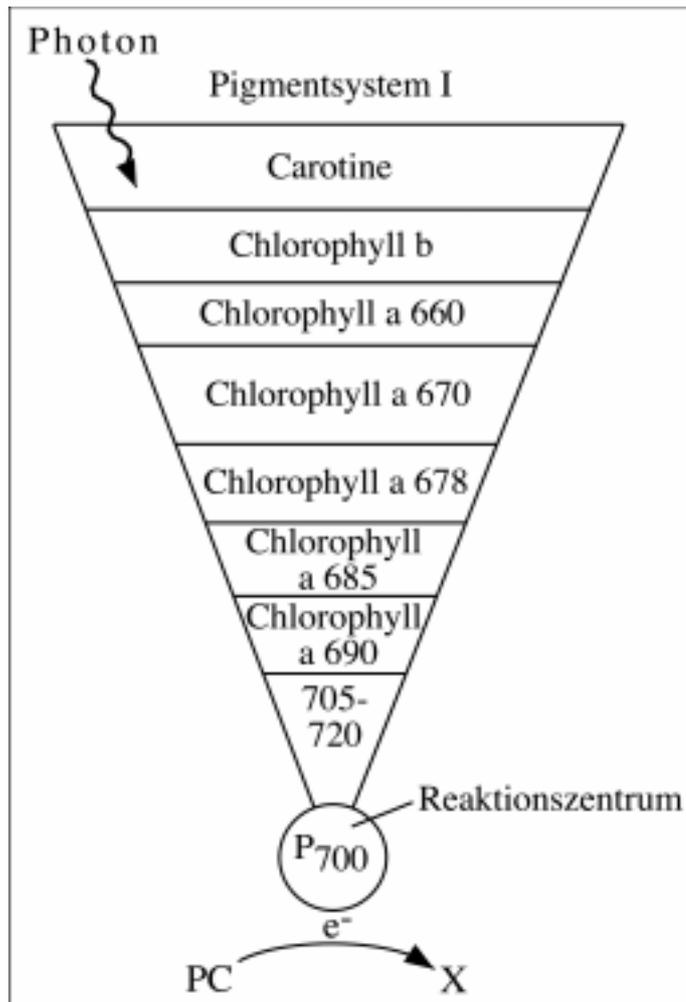


Abb. 3: Pigmentzusammensetzung des Photosystems I der höheren Pflanzen. Die Zahlen geben das jeweilige Absorptionsmaximum im roten Bereich an (aus STRASBURGER, 1983, 241).

giegehalt des Lichtes mit zunehmender Wellenlänge kleiner ist. Am Ende der Energie-Transfer-Kette müssen also Chlorophyllmoleküle mit längerwelligen Absorptionsmaxima liegen. Das von diesen absorbierbare Licht ist energieärmer (langwelliger) als das Licht am Anfang der Kette.

In älteren Lehrbüchern (z.B. STRASBURGER, 1983) wurden daraufhin die Chlorophylle in exakter Aufeinanderfolge entsprechend einer „Falle“ („trapping center“) angeordnet (Abb. 3). Diese Anordnung ist nach EISING et al. (1998) jedoch nicht als strikte strukturelle Anordnung zu verstehen; wir haben es also nicht mit einer Art Reuse zu tun, sondern nur mit einer gewissen Ausrichtung der Pigmentmoleküle zueinander – ihrem Absorptionsmaximum entsprechend.

3 Versuchsvorschlag

Fragestellung: Wie kann man sich vorstellen, dass es Chlorophylle mit unterschiedlichem Absorptionsmaximum, also mit unterschiedlicher Farbe, bei völlig identischem chemischen Bau gibt?

Wir suchen analoge Beispiele: Z.B. sollte bei Schülern der SII-Stufe allgemein bekannt sein, dass das Iod in alkoholischer/wässriger Lösung gelbbraun, mit Stärkelösung blau gefärbt erscheint. Wie ist diese Umfärbung zu erklären? Gibt es noch weitere Farbvarianten beim Iod? (Die den Namen gebenden violetten Dämpfe – griech. ioeides = veilchenfarbig – könnten im Chemieunterricht der Klasse 7 gezeigt worden sein.)

Materialien:

Reagenzgläser im Reagenzglasständer, Pipetten, Pipettierhilfen; Lösungsmittel: Benzin, Ethanol (96 %ig), Wasser, Ether (z.B. Diethylether), Aceton, Toluol (evtl. Xylol); Stärkelösung (stark verdünnt); Iod als Lugol'sche Lösung.

Durchführung:

Vorversuch: Stärkelösung und Iod zusammen pipettieren. Blaufärbung beobachten und erklären.

Versuch (nach Erläuterung des Vorversuchs): Zugabe von Iod in verschiedene Lösungsmittel. Eine jeweils etwa gleich große Zugabemenge (von 0,1 bis 1,0 ml) auf 10 ml Lösungsmittel erwies sich als sinnvoll.

Beobachtung:

Lösungsmittel	Färbung (Besonderheiten)
Benzin	pink, bläulich ^{a)} (braungelber Tropfen am Grund des Rg)
Toluol	pink, rötlich ^{a)} (braungelber Tropfen am Grund des Rg)
Ethanol, Wasser	gelblich ^{b)}
Aceton	gelb ^{b)} (kräftiger als zuvor, „zitronenfarben“)
Ether	bräunlich-gelb

^{a)} Besonders deutlich bei höherer Iod-Zugabe.

^{b)} Deutlicherer Unterschied bei geringer Iod-Zugabe.

Erklärung:

Iod-Stärke-Reaktion. Die Farbgebung wird durch Temperatur, Stärkeart, Kettenlänge und Amylopektinanteil beeinflusst. Die Farbe beruht auf der Wechselwirkung des Iods mit der Stärke, wobei das Iod nicht innerhalb der Windungen eingelagert ist, wie vielfach beschrieben wird, sondern den Windungen folgend an der Helix angelagert ist (ausführliche Darlegung und Literatur bei SCHRÖER & VOGT, 1996).

Unpolare Lösungsmittel (ohne Sauerstoff; aliphatische Kohlenwasserstoffe; CCl₄, CHCl₃, CS₂ [letztere jedoch nicht verwenden, siehe Sicherheitshinweise]): Leuchtend violette Färbung (Absorption: λ_{\max} 520-540 nm); diese Lösungen enthalten wie der Dampf freie I₂-Moleküle (RÖMPP, 1973; RIEDEL, 1990).

Aromatische Lösungsmittel (u.a. Toluol, Xylol; Benzol [dieses jedoch nicht verwenden, siehe Sicherheitshinweise]): rote, auch rötlich-braune Färbung.

Lösungsmittel (sauerstoffhaltig): Lösung erfolgt mit bräunlich-gelber bis brauner Färbung (λ_{\max} 460-480 nm).

Die Färbungen in den beiden letzten Lösungsmitteln sind auf Charge-Transfer-Komplexe zurückzuführen (GREENWOOD & EARNSHAW, 1988; RIEDEL, 1990). Hierbei erfolgt ein teilweiser Übergang eines Elektronenpaares eines Lösungsmittel-Moleküls (Donor) auf ein Iod-Molekül; π -Elektronensysteme und auch die einsamen Elektronenpaare des O-Atoms besitzen derartige Donoreigenschaft.

Sicherheitshinweise (vorwiegend nach HEDINGER, 1995):

- ▶ Iod: Gesundheitsschädlich durch Einatmen, reizt die Haut.
- ▶ Benzol: Nicht verwenden, da es Krebs erzeugen kann (Gruppe II der Gefahrstoffverordnung); giftig durch Einatmen, Hautkontakt.
- ▶ Schwefelkohlenstoff (CS_2): „Giftig“. Gesundheitsschädlich durch Einatmen; eingeschränkte Beschäftigung mit diesem Stoff für Frauen (Schwangerschaft); nicht verwenden.
- ▶ Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4): „Giftig“. Von der Verwendung wird wegen möglicher irreversibler Schäden und des Verdachts auf Karzinogenität abgeraten.
- ▶ Chloroform (CHCl_3): Gesundheitsschädlich durch Einatmen und Verschlucken; reizt die Haut. Von der Verwendung wird abgeraten.
- ▶ Toluol, Xylol ist gesundheitsschädlich durch Einatmen, reizt die Haut.
- ▶ Bei den verwendeten Stoffen ist die Gefährdung durch Leichtentzündlichkeit zu beachten (insbesondere bei Aceton, Ether – Abzug!).
- ▶ Sachgemäß entsorgen.

4 Zusammenfassende Betrachtung

Iod-Moleküle haben jeweils mit dem umgebenden Medium – dem Lösungsmittel – spezifische Wechselwirkungen, welche das Absorptionsverhalten des Iods beeinflussen. Aus der unterschiedlichen Absorption resultiert, dass jeweils von eingestrahlttem Weißlicht unterschiedliche Anteile des Spektrums reflektiert bzw. transmittiert werden. Diese Unterschiede können wir als Farbunterschiede bei den verschiedenen Lösungsmitteln wahrnehmen.

Ganz analog werden Chlorophyll-Moleküle durch Wechselwirkungen in der Membran (ebenso wie auch in Lösungsmitteln) in ihrem Absorptionsverhalten geändert. Diese Änderungen sind jedoch mit dem Auge nicht wahrnehmbar und nur aufgrund der Analyse von Absorptionsspektren bei Tieftemperatur (siehe Abb. 2) nachweisbar.

Zitierte Literatur

- BANNWARTH, H., B.P. KREMER & D. MASSING (1996): Stoffe und Stoffwechsel. Biologische Arbeitsbücher. Quelle und Meyer, Wiesbaden.
- BEISENHERZ, W. (1992): Lichtabhängige Reaktion der Photosynthese – Modellversuche. PdN-B **41** (8), 15-20.
- DREWS, G. (1998): 200 Jahre Photosyntheseforschung. NR **51** (11), 417-424.
- EISING, R., S. HÖLZENBEIN & A. PREUB (1998): Wenn die Lichtreaktion im Dunkeln bleibt – Zur Behandlung der photosynthetischen Primärprozesse im Unterricht der Sekundarstufe II (Teil 1). In: Ber. Inst. Didakt. Biol. (IDB, Münster), **7**, 53-72.
- GREENWOOD, N.N. & A. EARNSHAW (1988): Chemie der Elemente. VCH, Weinheim.
- HEDINGER, A. (1995): Sicherheitsdatenblattsammlung. Stuttgart.
- HESSE, M. (1976): Demonstration von Fluoreszenz und Absorption bei experimentellen Untersuchungen der Photosynthese. PdN-B **25** (7), 175-179.
- MÄNTELE, W. (1990): Photosynthese. Reaktionsmechanismen und Strukturen bei den Primärvorgängen. *BiuZ* **20**, 85-93.
- MOHR, H. & P. SCHOPFER (1978, 1992): Pflanzenphysiologie. Springer, Berlin.
- RICHTER, G. (1988; 1998): Stoffwechselfysiologie der Pflanzen. Thieme, Stuttgart.
- RIEDEL, E. (1990): Anorganische Chemie. De Gruyter, Berlin.
- RÖMPPS CHEMIE-LEXIKON (1973): Bearbeitet v. E. ÜHLEIN. Frankh', Stuttgart.
- SCHRÖER, T. & H. VOGT (1996): Einfluß von Kupfersulfat auf die Stärkehydrolyse. In: Ber. Inst. Didakt. Biol. (IDB, Münster) **5**, 91-101.
- STRASBURGER (1983): Lehrbuch der Botanik. Bearbeitet v. SITTE, P., H. ZIEGLER, F. EHRENDORFER & A. BRESINSKY. Fischer, Stuttgart.

Verfasser: Prof. Dr. Manfred Hesse, Institut für Didaktik der Biologie, Fliednerstr. 21, 48149 Münster; Fax: 0251-83-31330; hessema@uni-muenster.de