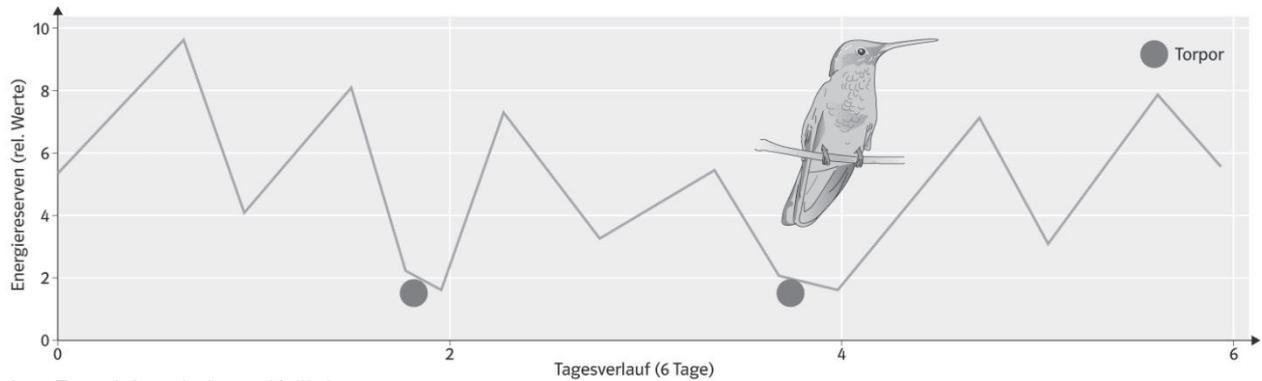


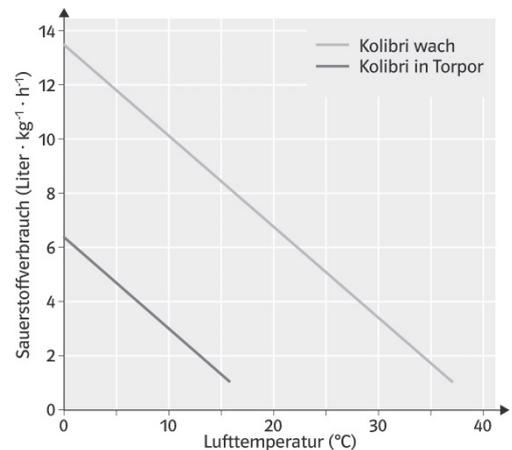
Kolibris – Stoffwechsel



1 *Energiehaushalt von Kolibris*

Kolibris sind mit einer Körperlänge von 5,8–21 cm sehr kleine Vögel. Ihr Körpergewicht liegt zwischen 2 und 20 g. Die meisten Kolibris haben ein blau oder grün schillerndes Gefieder. Ihr Schnabel ist häufig so lang wie der Körper selbst. Sie haben besondere Flugeigenschaften, die durch ihre bewegliche Flügelstruktur ermöglicht wird. Die kreisförmigen schnellen Bewegungen der Flügel ermöglicht es ihnen, in der Luft auf der Stelle zu fliegen.

Kolibris gibt es nur in Amerika. Hier leben sie in allen Höhenlagen und verschiedenen Klimazonen. Ihre Nahrung besteht sowohl aus kleinen Insekten oder Spinnen als auch aus Nektar von Blüten. Mithilfe ihres Schnabels und ihrer röhrenartigen langen Zunge können Kolibris den Nektar aus Blüten heraus-saugen. Um ihren Energiebedarf zu decken, müssen sie ununterbrochen Nahrung aufnehmen.



2 *Sauerstoffverbrauch von Kolibris*

Kolibris können in einen dem Winterschlaf ähnlichen Zustand fallen, den Torpor. Bei diesem sinkt die Körpertemperatur von 39,5 °C auf die nächtliche Umgebungstemperatur von 9,5 °C bis 13 °C ab. Der Torpor der Kolibris hängt nicht von der Jahreszeit ab und dauert maximal einige Stunden.

Große Säuger oder Vögel haben ein großes Körpervolumen und eine große Körpermasse. Dadurch wird ein schnelles Auskühlen des Körpers gegenüber der Umgebung verhindert. Je geringer die Temperatur ist, desto niedriger ist die Stoffwechselaktivität und die Umwandlung von Energiespeichern wie Körperfetten in Körperwärme.

	Kolibri	Taube
Körpergröße (cm)	7	35
Körpergewicht (g)	3,8	150
tägliche Nahrungsmenge (% des Körpergewichts)	200	6,5
Herzschlagfrequenz (Schläge pro Minute)	480 96 (Torpor)	200
Atemfrequenz (Atemzüge pro Minute)	250 selten Torpor	30
Sauerstoffverbrauch (ml O ₂ pro g Körpergewicht und Stunde)	10,7	1,5
Körpertemperatur (°C)	39,5 9,5 (Torpor)	41,8

3 *Messdaten von Kolibri und Taube (Durchschnittswerte)*

- 1 Beschreiben Sie Abb. 1 und 2.
- 2 Werten Sie die Daten aus den Abb. 1 und 2 aus. Nehmen Sie hierzu Abb. 3 und relevante Inhalte aus dem Text in Ihre Überlegungen auf. Erläutern Sie die biologische Bedeutung dieser Vorgänge bei den Kolibris.
- 3 Erläutern Sie die biologischen Zusammenhänge unter dem Aspekt des Systemgedankens.

ARBEITSBLATT

Kolibris — Stoffwechsel

Lösungen

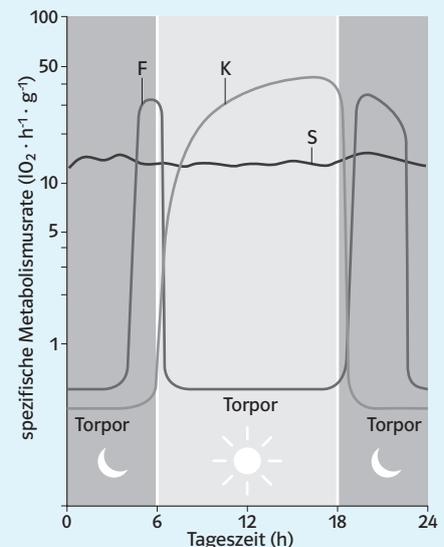
- 1 In Abb. 1 ist die Menge an Energiereserven in relativen Werten gegenüber dem Zeitverlauf über 6 Tage aufgetragen. Die Werte der Energiereserven steigen im Tagesverlauf und sinken auf unterschiedliche Werte ab. Diese Veränderungen zeigen sich innerhalb des gesamten Beobachtungszeitraums. Das Absinken der Energiewerte ist an einigen Tagen jedoch stärker. Hier setzt der Torpor ein. In Abb. 2 ist der Sauerstoffverbrauch in Litern Sauerstoff pro kg Körpergewicht und Stunde gegen die Lufttemperatur von 0 °C bis 40 °C aufgetragen. Eine Messung erfolgte an wachen Kolibris, die andere an Kolibris im Torporzustand. Bei beiden Messungen sinken die Sauerstoffverbrauchswerte mit zunehmender Lufttemperatur. Bei den Messungen während der Torporphase wird deutlich, dass der Sauerstoffverbrauch z. B. bei 10 °C im Torporzustand bei ca. 3 liegt, im Wachzustand bei ca. 10.
- 2 Die Veränderungen der Energiereserven über den Zeitraum einer Woche scheinen mit der Nahrungsaufnahme und dem täglichen Wechsel der Lufttemperatur zusammenzuhängen. Aus dem Text geht hervor, dass bei kleinen Tieren die Energiereserven zu gering sind, um bei geringeren Lufttemperaturen und ohne Nahrung den Energieverlust, der durch die körpereigene Produktion von Wärme entsteht, ausgleichen zu können. Die biologische Bedeutung des Torpors liegt in der Verringerung der Temperaturdifferenz zwischen Körper- und Umgebungstemperatur. Hierdurch haben die Tiere eine erhöhte Überlebenschance bei geringeren Umgebungstemperaturen und bei geringerem Nahrungsangebot, weil der Körper keine Wärme produzieren muss.
- 3 Der Kolibri ist das System, welches mit seiner Umgebung in Kontakt steht. Hierbei wird Energie in Form der Nahrung aufgenommen und in Form von Wärme abgegeben. Das Fließgleichgewicht wird durch die Anpasstheit des Torpors ermöglicht, da hierdurch die Energieabgabe der Energieaufnahme angeglichen werden kann.

Zusatzinformation

In Abb. 1 wird der tageszeitliche Verlauf der Metabolismusrate von drei verschiedenen Tieren dargestellt. Es handelt sich bei den Daten um Messungen an kleinen Tieren: Kolibris (K), Fledermäusen (F) und Spitzmäusen (S). Das Gewicht eines Kolibris liegt bei 3,2 g, das einer Fledermaus bei 3 g und das einer Spitzmaus bei 5 g. Die dunkelgrauen Balken stellen die Nachtphase dar. Die Metabolismusraten der kleinen Fledermaus und des Kolibris werden in den Phasen, in denen keine Nahrungsaufnahme erfolgen kann, stark gesenkt. Die Metabolismusraten der Spitzmaus schwanken im Tagesverlauf nur gering. Bei diesen Tieren scheint das Gewicht für ein Überleben auszureichen. Kolibri und Fledermaus liegen mit dem Torpor in unterschiedlichen Tagesbereichen. Dies hängt von den Aktivitäten der jeweiligen Nahrungsaufnahme ab. Ein Überleben ist jedoch nur mit dem täglichen Torpor möglich.

Torpor

Der Torpor wird auch als „Hungerstarre“ bezeichnet. Er tritt unabhängig von den Jahreszeiten in Abhängigkeit von der Nahrungszufuhr auf. In diesen Phasen kommt es durch das Hungern bei endothermen kleinen Tieren (endotherm: Tiere, die ihre Körpertemperatur unabhängig von der Außentemperatur auf einem konstanten Niveau halten können) zu einem starken Energiedefizit. Durch das Absenken der Stoffwechselaktivität und der Körpertemperatur können sie dieses Energiedefizit verringern.

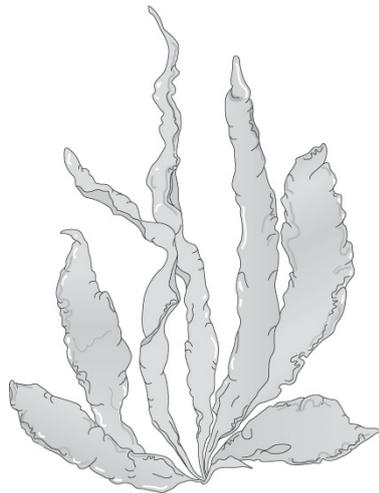


1 Verlauf der Metabolismusraten

Angepasstheit der Braunalgen an die Lichtverhältnisse im Meer

Die gelbbraune Alge *Petalonia fasciata* (Abb. 1) besitzt glattblättrige Wedel, die eine Länge von 30 cm erreichen können. Sie wächst auf steinigem Untergrund im Arktischen Ozean in Alaska bis in eine Tiefe von ca. 40 m. Wegen ihrer Blattpigmente wird sie als Braunalge bezeichnet, denn die Pigmente reflektieren größtenteils die Wellenlängen von gelbem, orangefarbenem und rotem Licht. Der Rest wird absorbiert (Abb. 3).

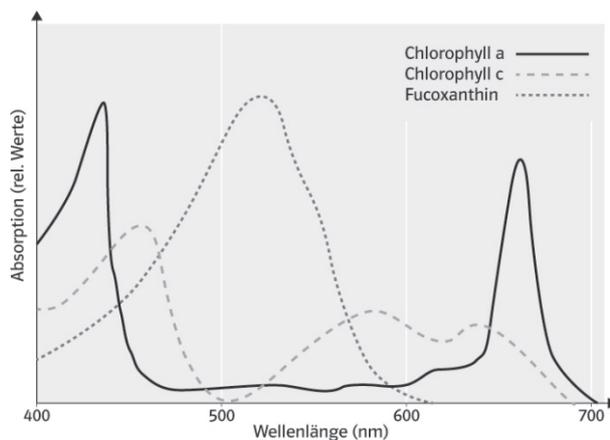
Wissenschaftler der Biologischen Anstalt Helgoland erforschten die Braunalge *Petalonia fasciata* mit der Fragestellung, warum diese Alge bei wenig Licht in großen Tiefen autotroph leben kann (Abb. 2). Dazu untersuchten sie die Absorptionsspektren der beteiligten Fotosynthesepigmente und deren Leistung im Labor (Abb. 3 und 4).



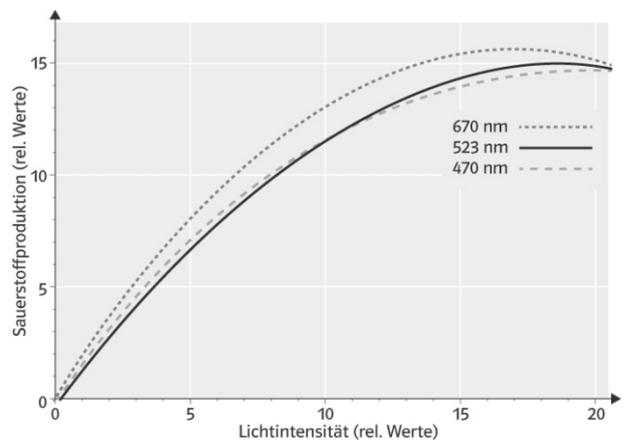
1 Braunalge *Petalonia fasciata*

Wellenlänge (nm)	SONNENLICHT				
	450–490 blau	490–560 grün	560–590 gelb	590–630 orange	630–700 rot
Wassertiefe (m)					
5	↓	↓	↓	↓	↓
15	↓	↓	↓	↓	
30	↓	↓	↓		
40	↓	↓			
55	↓				

2 Veränderung des Lichtspektrums bei zunehmender Wassertiefe



3 Absorptionsspektren der Fotosynthesepigmente von *Petalonia fasciata*



4 Leistung der Fotosynthesepigmente von *Petalonia fasciata*

- 1 Beschreiben Sie das Absorptionsspektrum einer Braunalge (Abb. 3) und vergleichen Sie dieses mit dem einer Grünalge (vgl. Engelmann-Versuch, Schülerbuch S. 88) in Form einer Tabelle.
- 2 Beschreiben und erklären Sie die Fotosyntheseleistung der Braunalge *Petalonia fasciata* (Abb. 4).
- 3 Erläutern Sie, warum die Braunalge *Petalonia fasciata* bis in einer Wassertiefe von 40 m erfolgreich Fotosynthese betreiben kann (Abb. 2 und 3). Stellen Sie eine Hypothese auf, wie das Wirkungsspektrum der Pigmente aussehen könnte. Zeichnen Sie es in Abb. 3 ein.

ARBEITSBLATT

Angepasstheit der Braunalgen an die Lichtverhältnisse im Meer

Lösungen

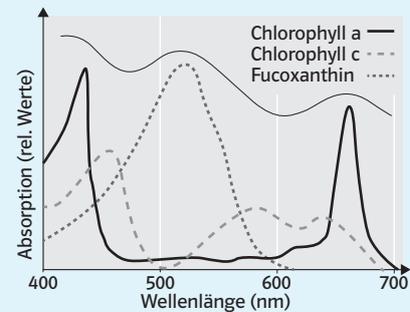
- 1 Die Braunalge besitzt drei Fotosynthesepigmente: Chlorophyll a und c sowie Fucoxanthin. Die Grünalge besitzt ebenfalls drei Fotosynthesepigmente: Chlorophyll a und b sowie Carotinoide. Das Absorptionsspektrum der Braunalge zeigt im Gegensatz zu dem der Grünalge keine Lücke im Wellenlängenbereich von grünem Licht.

Absorptionsmaxima		
Farbstoffe	Braunalge	Grünalge
Chlorophyll a	430 nm, 660 nm	430 nm, 660 nm
Chlorophyll b	—	460 nm, 640 nm
Chlorophyll c	450 nm, 580 nm, 630 nm	—
Carotinoide	—	460 nm, 490 nm
Fucoxanthin	510 nm	—

- 2 Die Sauerstoffproduktion wird in Abhängigkeit von der eingestrahnten Intensität von rotem (670 nm), grünem (523 nm) und blauem (470 nm) Licht gemessen. Alle drei Wellenlängen werden ungefähr gleich gut absorbiert. Sie liegen im Bereich der Absorptionsmaxima der vorhandenen Fotosynthesepigmente. Mit steigender Lichtintensität steigt auch die Sauerstoffproduktion, was auf eine gesteigerte Absorption zurückzuführen ist. Der Kurvenverlauf weist auf eine Sättigung der Fotosynthesereaktion hin.

- 3 Die Absorptionsmaxima von Chlorophyll a, Chlorophyll c und Fucoxanthin zeigen, dass von diesen Pigmenten blaues und grünes Licht in der Tiefe von 40 m absorbiert werden kann. Rotes Licht wird nur zusätzlich von Chlorophyll a absorbiert, wenn die Pflanzen sich in den oberen Wasserschichten (5 m) befinden. Gelbes und orangefarbenes Licht werden nicht nennenswert absorbiert.

Das Wirkungsspektrum entspricht dem Bereich über den Absorptionsmaxima der einzelnen Pigmente. Die Kurve kann oberhalb der Maxima gezeichnet werden.



1 Zeichnung des Wirkungsspektrums

Zusatzaufgaben

Die Grätzelzelle — eine pflanzliche Solarzelle

1992 meldete Michael Grätzel (*1944) seine Solarzelle zum Patent an. Sie wird mit Pflanzenfarbstoffen betrieben. Die nach ihrem Erfinder auch „Grätzelzelle“ genannte Solarzelle arbeitet nach dem Vorbild der Fotosynthese mit den natürlichen Farbstoffen von Malve, Brombeere, Rote Bete oder Safran.

Die roten bis lila Farbstoffe sind Malvidin, Anthocyan und Betanin oder der gelbe Farbstoff Crocin. Diese Farbstoffe sind in der Lage, die Energie des Sonnenlichts in elektrische Energie umzuwandeln. Dazu werden die Farbstofflösungen zwischen zwei elektrisch leitende Glas- oder Plastikplatten zusammen mit einem Elektrolyt eingeschlossen und belichtet. Eingebaut in die Oberfläche eines Rucksacks produziert eine Reihe von Grätzelzellen genug Energie zum Aufladen von Smartphones oder Tastaturen ohne externe Stromquellen.

Aufgaben

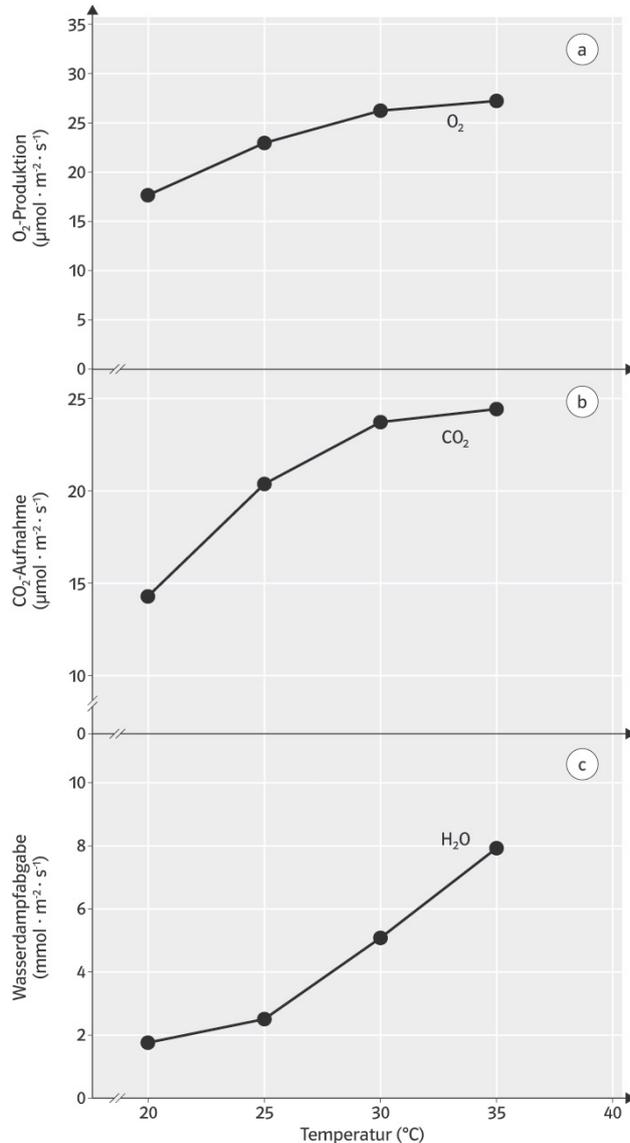
- 1 Recherchieren Sie die Strukturen der genannten Farbstoffe und fassen Sie die Gemeinsamkeiten zusammen.
- 2 Erklären Sie, warum die Fotosynthese das Vorbild für die Farbstoffsolarzelle ist.
- 3 Stellen Sie eine Hypothese auf, warum die Pflanzenfarbstoffe sich für den Bau einer Grätzelzelle eignen.

Lösungen

- 1 Alle Farbstoffmoleküle sind große Moleküle mit vielen konjugierten Doppelbindungen, die für die Farbigkeit verantwortlich sind.
- 2 Grüne Pflanzen wandeln die Energie des absorbierten Sonnenlichts in chemische Energie und später in Kohlenhydrate um. Die Grätzelzelle wandelt die Energie des absorbierten Lichts in elektrische Energie um. In beiden Fällen sind Farbstoffe für die Energieumwandlung des Sonnenlichts zuständig.
- 3 Die Pflanzenfarbstoffe sind kostengünstig und leicht ein- und ersetzbar. Die Absorptionsspektren sind im Bereich des sichtbaren Lichts passend.

Temperatureinfluss auf die Fotosynthese

Die Gartenbohne (*Phaseolus vulgaris*) gehört in einigen Ländern Mittel- und Südamerikas zu den Hauptnahrungsmitteln. Ihre Fotosyntheseleistung bei den dortigen Temperaturen wurde bei mittlerer Beleuchtungsstärke überprüft. Dazu wurden aus den Laubblättern der Pflanze vier Gruppen kleiner, gleich großer Plättchen ausgeschnitten, um daran unter verschiedenen Bedingungen die Fotosynthesereaktionen zu untersuchen.



1 Messergebnisse der Versuchsreihe zur Fotosyntheseleistung von *Phaseolus vulgaris*

- 1 Beschreiben Sie die Fotosynthesebedingungen, unter denen die Versuchsergebnisse ermittelt wurden.
- 2 Ordnen Sie die Abb. 1 a–1 c den Teilschritten der Fotosynthese zu. Begründen Sie kurz.
- 3 Beschreiben und erklären Sie die Ergebnisse der Messreihe und gehen Sie dabei auf die RGT-Regel ein.

ARBEITSBLATT

Temperatureinfluss auf die Fotosynthese

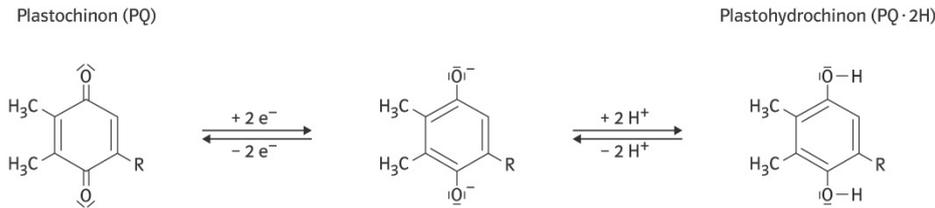
Lösungen

- 1 Bei konstanten Versuchsbedingungen (Luftdruck, Lichtstärke und Lichtqualität, Kohlenstoffdioxidkonzentration, Wasserversorgung) wurde nur die variable Temperatur verändert. Vier Gruppen von gleich großen grünen Blattplättchen wurden für einen bestimmten Zeitraum bei einer der gegebenen Temperaturen (20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C) gleich stark beleuchtet und die Konzentrationen verschiedener gebildeter Stoffe ermittelt.
- 2 Die Sauerstoffproduktion (Abb. 1a) läuft in der Fotoreaktion (Fotolyse des Wassers) im 1. Teil der Fotosynthese ab. Die Kohlenstoffdioxid-Assimilation (Abb. 1b) geschieht im 2. Teil der Fotosynthese, der Synthesereaktion. Beide Vorgänge sind messbar (Abb. 1c), weil durch die bei der Transpiration geöffneten Spaltöffnungen für die Abgabe von Wasserdampf auch ein Gasaustausch möglich ist.
- 3 Die Geschwindigkeitswerte der Sauerstoffbildung und der Transpiration (Wasserdampf-abgabe) steigen im Temperaturbereich von 20 — 35 °C an. Die Zunahme der Kohlenstoffdioxidassimilation ist in diesem Bereich ebenfalls deutlich, allerdings fällt ein schwächerer Anstieg der Geschwindigkeit der Kohlenstoffdioxidaufnahme und der Sauerstoffproduktion bei 35 °C auf. Diese Beobachtungen sind mit der Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel (RGT-Regel) zu erklären: Je höher die Temperatur ist, desto schneller laufen die Stoffwechselreaktionen ab. Dass die Kohlenstoffdioxidaufnahme und die Sauerstoffproduktion ab 30°C weniger stark ansteigt, ist zunächst nicht zu erklären.

Ein Herbizid im Dienst der Fotosyntheseforschung

Das Herbizid DCMU (**D**ichlorphenyl-**d**imethylurea) ist ein Unkrautbekämpfungsmittel, das zur völligen Beseitigung von Pflanzen auf Flächen, z. B. auf Gleisanlagen der Eisenbahn, verwendet wurde. Der Stoff wird mit Wasser über die Wurzeln der Pflanzen aufgenommen, weitertransportiert und reichert sich in den Blättern an. Die betroffenen Gewebe sterben ab und die Pflanzen gehen ein.

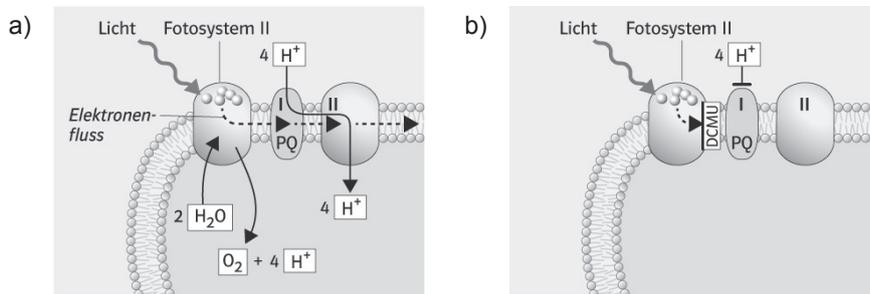
Funktion von Plastochinon in der Elektronentransportkette



1 Reaktionsschritte am Plastochinon (Elektronenüberträger I in der Elektronentransportkette nach dem Fotosystem II)

Wirkung des Herbizids DCMU an der Thylakoidmembran

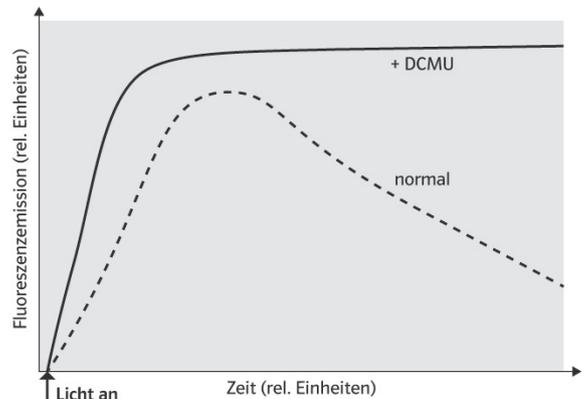
Das Herbizid DCMU bindet irreversibel an eine bestimmte Stelle der Thylakoidmembran (Abb. 2):



2 Ausschnitt aus der Thylakoidmembran: a) ohne DCMU, b) mit DCMU

Vergleich der Chlorophyll-Fluoreszenzen von normalen Blättern und von mit DCMU vergifteten Blättern

Wird ein normales, zuvor abgedunkeltes Blatt belichtet, so läuft das Fotosynthesesystem im Chloroplasten nicht sofort an, sondern muss erst aktiviert werden. Die absorbierte Energie kann nicht sofort in Form von Elektronen von der Elektronentransportkette übernommen werden, es kommt zu einem Stau. Die Überschussenergie wird vom Chlorophyll als Rot-Fluoreszenz abgestrahlt. Nach kurzer Zeit arbeiten alle Komponenten optimal und die Elektronenakzeptoren sind wieder oxidiert. Dabei sinkt die Chlorophyll-Fluoreszenz. Blätter, die mit DCMU vergiftet wurden, zeigen dagegen einen anderen Verlauf der Fluoreszenzabstrahlung (Abb. 3).



3 Fluoreszenz bei normalen und vergifteten Blättern

- 1 Beschreiben Sie die Funktion des Plastochinons (Abb. 1).
- 2 Erläutern Sie die Bedeutung des Plastochinons in der Elektronentransportkette. Berücksichtigen Sie dabei auch das energetische Modell und das chemiosmotische Modell (Abb. 2a) der Fotoreaktion.
- 3 Erläutern Sie die Wirkung von DCMU und stellen Sie eine Hypothese auf, welche Folgen dies für die Pflanze hat (Abb. 2).
- 4 Werten Sie die Messdaten zur Fluoreszenz vergifteter Blätter (Abb. 3: +DCMU) aus. Erklären Sie, welcher Vorgang mithilfe von DCMU untersucht wird und weshalb das Gift in der Fotosyntheseforschung genutzt werden kann.

ARBEITSBLATT

Ein Herbizid im Dienst der Fotosyntheseforschung

Lösungen

- 1 Der Ausgangsstoff Plastochinon wird im 1. Schritt durch die Aufnahme von 2 Elektronen reduziert, im 2. Schritt durch die Aufnahme von Wasserstoff-Ionen (Protonen) weiter zum Produkt Plastochochinon (reduzierte Form) umgewandelt. Dieser Reaktionsweg ist umkehrbar: Plastochochinon wird durch Protonen- und Elektronenabgabe wieder zum Ausgangsstoff Plastochinon (oxidierte Form) oxidiert. Somit kann Schritt 1 erneut ablaufen etc. Damit steht der Elektronen- und Protonenakzeptor wieder zur Verfügung.
- 2 Die oxidierte Form des Plastochinons (PQ) kann 2 Elektronen vom ursprünglich energetisch angeregten P 680 übernehmen und wird dabei reduziert. Gleichzeitig bindet das PQ an der Stromaseite 2 Wasserstoff-Ionen und wird zum Plastochochinon ($PQ \cdot 2 H$). Bei der Elektronenübertragung auf den folgenden Elektronenakzeptor verliert das Plastochochinon die Protonen in den Innenraum der Thylakoide. Das Plastochinon liegt wieder in der oxidierten Form vor und ist für weitere Übertragungsreaktionen bereit. Aus Gründen der stöchiometrisch korrekten Bilanzierung wird in Abb. 2 a von dem Freiwerden von 4 Elektronen bei der Fotolyse des Wassers ausgegangen, was einen 2-fachen Elektronen- und Wasserstoff-Ionentransport zur Folge hat.
- 3 Da DCMU irreversibel an der Stelle im Fotosystem bindet, wo normalerweise die Elektronen vom primären Elektronenakzeptor auf Plastochinon übertragen werden, ist der Elektronenfluss unterbrochen. Weil der primäre Elektronenakzeptor durch die Blockade nicht reduziert werden kann, ist trotz Lichtanregung keine Wasserspaltung, also keine Sauerstoffproduktion, möglich. Gleichzeitig kann kein Protonengradient aufgebaut, kein $NADPH + H^+$ und kein ATP hergestellt werden. Folglich kann auch in weiteren Reaktionen kein CO_2 fixiert und keine Glucose synthetisiert werden. Im Endeffekt wird die Pflanze ohne die Fähigkeit, Fotosynthese durchzuführen, absterben.
- 4 Die Fluoreszenzemission bei mit DCMU vergifteten Blättern steigt im Vergleich zum unbehandelten, normalen Blatt schneller an, der Maximalwert ist größer und bleibt im weiteren Verlauf der Messungen konstant. Weil DCMU die Elektronentransportkette blockiert, fehlen bereits zu Versuchsbeginn alle nötigen Elektronenakzeptoren zur Übernahme der Elektronen aus dem angeregten P 680. Da DCMU irreversibel am Fotosystem II gebunden ist, wird die Blockade im weiteren Verlauf nicht aufgehoben. Somit wird die durch Chlorophyll absorbierte Lichtenergie hauptsächlich in Form von Rot-Fluoreszenz abgestrahlt, da sie nicht fotochemisch genutzt werden kann. Mithilfe von DCMU kann in der Fotosyntheseforschung gezeigt werden, dass die Lichtabsorption im Fotosystem mit einer Anregung von Elektronen verbunden ist und dass die absorbierte, überschüssige Energie durch Abstrahlung von Rot-Fluoreszenz sichtbar wird. Durch den Vergleich von maximaler Fluoreszenz und der Fluoreszenz bei normaler Fotosynthese können Rückschlüsse auf die Effizienz der Fotosynthese gezogen werden.

Zusatzinformation

Chlorophyll-Fluoreszenz

Wird ein Elektron durch Licht angeregt, absorbiert es ein Lichtquant des eingestrahnten Lichts. Dabei geht das Elektron, je nach dem Energieniveau des Lichtquants, auf einen angeregten, höheren Energiezustand über. Wenige Nanosekunden später fällt das Elektron auf seinen Grundzustand zurück. Dabei wird ein Teil der Energie als Licht und der Rest als Wärme abgegeben. Sir Georg Gabriel Stokes (1819 – 1903) entdeckte, dass die Wellenlänge des emittierten Lichts nicht kleiner als die Wellenlänge des Anregungslichts sein kann (Energieerhaltungssatz). Diese Gesetzmäßigkeit wird als „Stokes Shift“ oder „Stokesverschiebung“ bezeichnet.

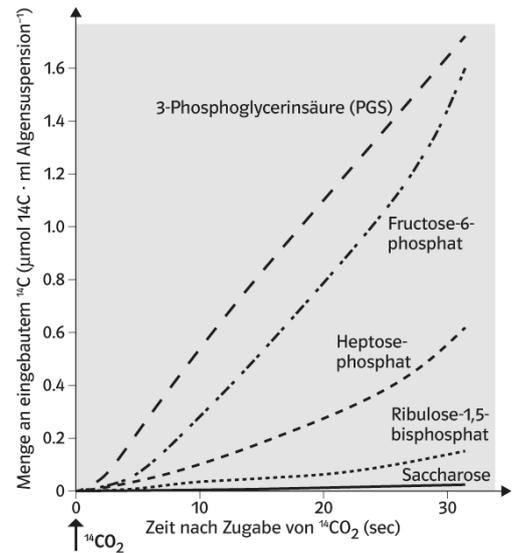
Wird ein Blatt einige Zeit im Dunkeln aufbewahrt und danach belichtet, kann man beobachten, dass das Blatt ein erhöhtes Maß an Fluoreszenz (spontane Emission von Licht) abgibt (Kautsky-Effekt). Nach ca. drei Minuten stabilisiert es sich wieder. Wird das Blatt erneut belichtet, dauert es eine Weile, bis die Fotosynthese wieder optimal ablaufen kann. Grund hierfür ist, dass die Enzyme und Ausgangsstoffe in optimaler Konzentration vorliegen müssen. Solange dies noch nicht der Fall ist, kann ein Großteil der absorbierten Energie nicht von der Elektronentransportkette aufgenommen werden und sie wird spontan in Form von Wärme (Schwingungsrelaxation) und Licht (Fluoreszenz) wieder abgegeben.

Die beobachtete Fluoreszenzleistung ist also ein Teil der Verlustleistung des Fotosynthesesystems. Die Zeit bis zum optimalen Ablaufen der Fotosynthese kann als Maß für die Vitalität einer Pflanze angesehen werden.

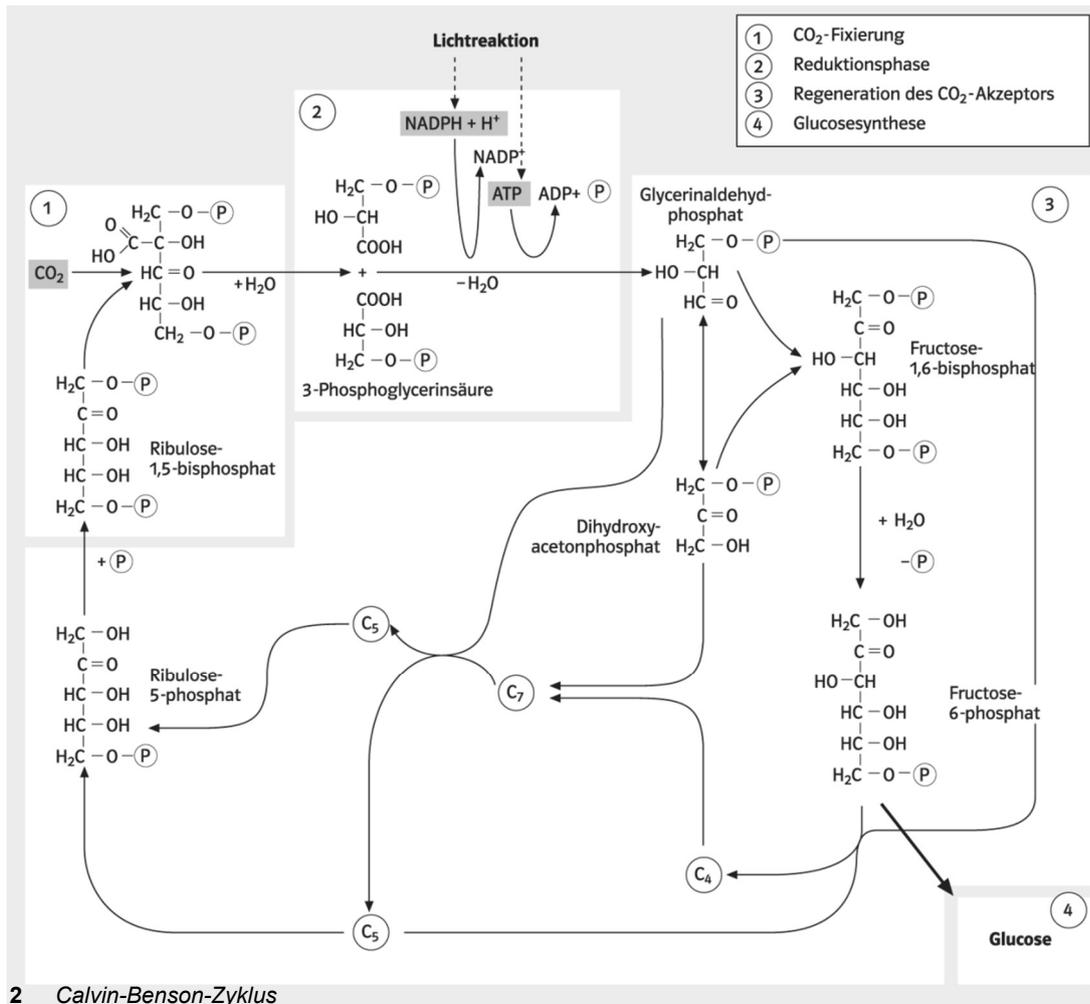
Synthesereaktion – eine Reaktionsfolge wird aufgeklärt

Die Aufklärung des biochemischen Vorgangs der Kohlenhydratbildung in Chloroplasten gelang Melvin Calvin und seinen Mitarbeitern Andrew Benson und James Bassham (Nobelpreis Chemie 1961 für M. Calvin). Für ihre Versuche verwendeten sie Suspensionen der Grünalge *Chlorella pyrenoidosa*, die sie im Licht mit radioaktiv markiertem Kohlenstoffdioxid ($^{14}\text{CO}_2$) aus einer entsprechenden Natriumhydrogencarbonat-Lösung versorgten. Nach verschiedenen langen Belichtungszeiten wurden die Algen in kochendem Methanol abgetötet und ihre Inhaltsstoffe extrahiert.

Das erhaltene Gemisch von Stoffwechselprodukten wurde papierchromatografisch aufgetrennt, die Menge des in die verschiedenen Verbindungen eingebauten Kohlenstoffdioxids gemessen (Abb. 1) und autoradiografisch identifiziert. Die Messung der Radioaktivität der einzelnen Stoffwechselprodukte in Abhängigkeit von der Einbauzeit ermöglichte das Ermitteln der Reihenfolge, in der diese Produkte gebildet wurden (Abb. 2).



1 ^{14}C -markierte Zwischenprodukte



2 Calvin-Benson-Zyklus

- 1 Werten Sie die Daten zum Auftauchen der ^{14}C -markierten Zwischenprodukte aus (Abb. 1).
- 2 Markieren Sie in Abb. 2 die in Abb. 1 festgestellten Produkte und ordnen Sie sie den Phasen des Zyklus zu.
- 3 Erläutern Sie, ob diese Versuchsergebnisse ausreichen, um einen Zyklus aufzustellen.

ARBEITSBLATT

Synthesereaktion — eine Reaktionsfolge wird aufgeklärt

Lösungen

- 1 Das zuerst isolierbare Zwischenprodukt ist Phosphoglycerinsäure (PGS). Als Nächstes tauchen etwas später Fructose-6-phosphat und dann Heptosephosphat auf. Nach 5 Sekunden ist auch Ribulose-1,5-bisphosphat nachweisbar. Nach über 15 Sekunden ist der Doppelzucker Saccharose als Endprodukt entstanden. Er ist das aus Glucose und Fructose gebildete Disaccharid. Die Reihenfolge im Auftreten der Stoffe weist auf eine Reaktionsabfolge hin.
- 2 3-Phosphoglycerinsäure ist das 1. Produkt nach der CO_2 -Fixierung (1). Hiermit startet die Reduktionsphase (2). Fructose-6-phosphat und Heptosephosphat (C_7) sind Stoffe aus der Regenerationsphase des CO_2 -Akzeptors (3). Ribulose-1,5-bisphosphat ist der wiederhergestellte CO_2 -Akzeptor für die Phase der CO_2 -Fixierung (1). Saccharose ist als Disaccharid das Folgeprodukt nach der Glucosesynthese (4).
- 3 Das Grundprinzip der Reihenfolge wird aus den Versuchsdaten deutlich, allerdings fehlen Versuchsergebnisse zur Identifikation von Ribulose-1,5-bisphosphat als CO_2 -Akzeptor. Es fehlen zudem weitere Zwischenprodukte. Auch sind insgesamt die an den Reaktionen beteiligten Enzyme nicht aufgeführt. Die Daten sind folglich nur als Hinweise auf einen möglichen Zyklus zu verstehen.