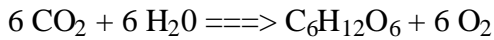


DIE LICHTREAKTION

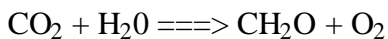
Wie läuft die Photosynthese im Prinzip ab?

Schauen wir uns zunächst die Grundgleichung der Photosynthese an:



Aus Kohlendioxid und Wasser entstehen unter Zufuhr von Lichtenergie (endotherme Reaktion!) Traubenzucker und Sauerstoff.

Chemisch gesehen, handelt es sich um eine *Reduktion* von Kohlendioxid zu Glucose; jedes C-Atom eines Kohlendioxidmoleküls nimmt dabei zwei Wasserstoffatome auf und gibt ein Sauerstoffatom ab. Das sehen wir am besten, wenn wir die obige Grundgleichung einmal auf beiden Seiten durch 6 dividieren:



Tatsächlich - ein jedes C-Atom gibt ein O-Atom ab und bekommt dafür zwei H-Atome vom Wasser. Übrig bleibt ein Sauerstoffmolekül. Der Sauerstoff, den die Pflanzen bei der Photosynthese abgeben, ist wirklich nur ein Abfallprodukt.

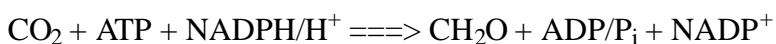
Merke:

Photosynthese = endotherme Reduktion von Kohlendioxid mittels Wasserstoff

Was benötigt die CO₂-Reduktion?

Damit eine *endotherme* Reaktion ablaufen kann, muss *Energie* zugeführt werden. In lebenden Zellen erfüllt *ATP* diesen Zweck.

Damit eine *Reduktion* durch H-Aufnahme stattfinden kann, muss ein *Wasserstoff-Spender* vorhanden sein. Auch dafür gibt es *Coenzyme* in der Zelle: NADH und FADH₂ bei der Dissimilation und NADPH bei der Photosynthese. Also können wir unser Schema etwas erweitern



Dieses Schema zeigt uns die so genannte Dunkelreaktion der Photosynthese: gibt man Kohlendioxid, ATP und NADPH/H⁺ zusammen in ein Reagenzglas, so erhält man unter geeigneten Bedingungen jede Menge Zucker, außerdem ADP/P_i und NADP⁺. Licht braucht man für diese Reaktion nicht, daher nennt man "Dunkelreaktion".

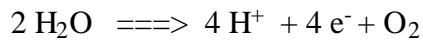
Merke:

Bei der Dunkelreaktion wird Kohlendioxid mit Hilfe von ATP und NADPH/H⁺ zu Zucker reduziert.

Woher kommen die Stoffe, die die Dunkelreaktion benötigt?

Gute Frage. Woher kommt das viele ATP und das viele NADPH/H⁺ eigentlich? Sicherlich nicht aus der Atmungskette. So blöd kann eigentlich keine Pflanze sein, dass sie erst die Atmung betreibt, um ATP und NADPH/H⁺ herzustellen, und diese Produkte anschließend wieder für die Herstellung von Zucker verbraucht. Aber wie kommt die Dunkelreaktion dann an die benötigten Grundstoffe?

Moment mal - braucht die Pflanze nicht Wasser und Licht für die Photosynthese? Klar - es gibt eine weitere Reaktion, die Lichtreaktion. Und hier gewinnt die Pflanze mit Hilfe der Lichtenergie ATP und NADPH/H⁺. Aber woraus? Na logisch - aus dem Wasser, was ja in Hülle und Fülle zur Verfügung steht:

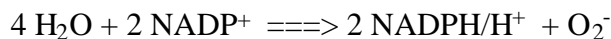


Kommt uns das nicht irgendwie bekannt vor? Das erinnert doch stark an die Atmungskette. Das Wasser wird also gespalten in a) Protonen, b) Elektronen und c) Sauerstoff.

Die umgekehrte Reaktion ist uns vertrauter: aus Wasserstoff und Sauerstoff wird mit einem lauten Knall Wasser (Knallgasreaktion). Wenn die umgekehrte Reaktion stark exotherm ist, wird die eben beschriebene Wasserspaltung wohl stark endotherm sein. Das macht aber nichts, denn die Pflanze kann ja die Sonnenenergie ausnutzen. Also ist es eigentlich das Sonnenlicht, welches das Wasser spaltet.

So einfach ist es natürlich nicht, sonst konnte man keine Cola mehr im Freien trinken. Es sind schon ein paar Enzyme dafür notwendig, die den Spaltungsprozess erheblich beschleunigen.

Die bei der Wasserspaltung oder Photolyse gewonnenen Protonen und Elektronen werden nun mit Hilfe von NADP⁺ - Molekülen zu den Orten verfrachtet, an denen die Dunkelreaktion stattfindet.



Merke:

In der Lichtreaktion werden durch das Sonnenlicht Wassermoleküle gespalten. Dabei entstehen Protonen, Elektronen und - als Abfallprodukt - Sauerstoff.

Wie stellt die Lichtreaktion das ATP her?

Ach so, dieser Frage sind wir bisher ja aus dem Wege gegangen. Wie das NADPH/H⁺ hergestellt wird, haben wir gerade gesehen. Und das ATP wird genauso hergestellt wie bei der Atmungskette:

Es existiert ein Protonengefälle quer über eine Membran. Durch bestimmte Enzyme fließen die Protonen in Richtung des Gefälles (also bergab) und produzieren dabei ATP.

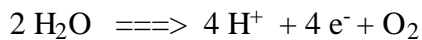
Das Problem ist nur, dass dieser Protonenfluss zum Erliegen kommt, sobald ein Konzentrationsausgleich herrscht. Die Zelle muss also dafür sorgen, dass das Protonengefälle ständig aufrecht erhalten bleibt. Sie muss Protonen zurückpumpen. Dies erfordert einen ständigen Einsatz von Energie. Bei der Atmungskette ist diese Energiequelle der Elektronentransport vom NADH/H⁺ zum Endakzeptor Sauerstoff. Bei der Lichtreaktion steht das Sonnenlicht als Energiequelle zur Verfügung.

Merke:

Bei der Lichtreaktion erzeugt das Sonnenlicht ein Protonengefälle, welches dann zur ATP-Synthese genutzt werden kann.

Das erste große Problem der Lichtreaktion

Erinnern wir uns an die einfache Gleichung



Das Sonnenlicht spaltet also Wassermoleküle, dabei entstehen Protonen, Elektronen und Sauerstoff. Vergessen wir jetzt auch den Sauerstoff und die Protonen: Das Sonnenlicht spaltet Wasser, und dabei entstehen Elektronen.

Diese Elektronen können nun an andere Stoffe abgegeben werden, aber nur an Stoffe mit einem Redoxpotential, das tiefer liegt als das von Wasser. Also wäre es schön, wenn nun folgende Reaktion ablaufen könnte:

Dummerweise ist das Redoxpotential von NADP nicht niedriger als das von Wasser. Im Gegenteil, es ist sogar sehr viel höher.

Also können die Elektronen vom Wasser nicht zum NADP gelangen. Wer nimmt aber dann die Elektronen des Wassers auf, und wie gelangen die Elektronen schließlich zum NADP?

Noch haben wir einen Joker im Ärmel: das Chlorophyll-Molekül. Was für ein Redoxpotential hat eigentlich das Chlorophyll. Was für ein Glück! Dieses grüne Molekül hat ein niedrigeres Redoxpotential als Wasser. Na, dann ist ja alles klar: die Elektronen gelangen vom Wasser zum Chlorophyll (siehe Bild rechts). Nur leider hat auch dieses Bild einen kleinen Schönheitsfehler: Das Redoxpotential von Chlorophyll ist nun noch niedriger als das von NADP, wie also sollen die Elektronen vom Chl zum NADP gelangen? Sie müssten irgendwie bergsteigen können (Bild links).

Erinnern wir uns wieder an die Atmungskette: Wenn die Elektronen bergab fließen, so wird Energie frei, die z.B. zum Pumpen von Protonen genutzt werden kann. Wenn umgekehrt Elektronen bergauf transportiert werden müssen, so kostet dies Energie. Und genau hier kommt wieder das Sonnenlicht ins Spiel. Mit Hilfe des Sonnenlichts werden die Elektronen des Chlorophylls bergauf transportiert, so dass das NADP reduziert werden kann.

H₂O → **NADP⁺** (2 e⁻)

H₂O → **Chl** (2 e⁻)

H₂O → **Chl** (2 e⁻)

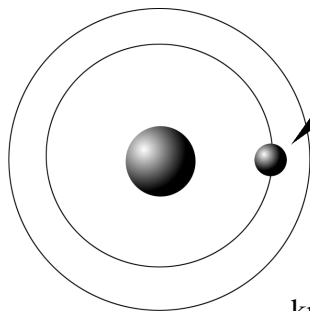
Merke:

Bei der Lichtreaktion gibt das Wasser Elektronen an das Chlorophyll ab. Durch das Sonnenlicht werden diese Elektronen dann auf das Redoxpotentialniveau des NADP gehoben, so dass dieses reduziert werden kann.

Das zweite große Problem der Lichtreaktion wird gleich angesprochen. Vorher wollen wir aber dieses "Anheben des Redoxpotentials" näher untersuchen.

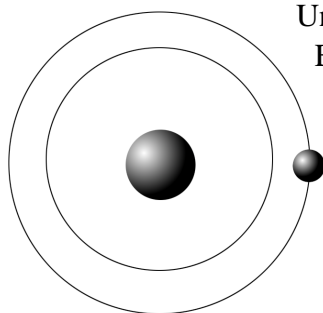
Wie können mit Hilfe von Lichtenergie Elektronen bergauf transportiert werden?

Dazu muss man sich jetzt etwas mit Quantenphysik auskennen, also der Lehre von den Füßen der Physiker. Schauen wir uns mal ein Atom aus dem Fuß eines berühmten Physikers an, am besten ein Wasserstoffatom aus dem Fuß von Nils Bohr. Da haben wir also den Atomkern in der Mitte, und drumherum kreist einsam ein Elektron.



Licht Warum fällt das Elektron eigentlich nicht in den Atomkern? Klar: der Atomkern zieht das Elektron mit einer Kraft F_1 an, und durch die hohe Geschwindigkeit des Elektrons wird es mit einer Kraft F_2 nach außen gezogen (Zentripetalkraft). Wenn nun $F_1 = F_2$, so bleibt der Abstand Elektron - Kern konstant.

Wenn wir dem Elektron aber Energie zufügen, z.B. in Form von Licht, so erhöht sich seine Geschwindigkeit und damit auch die nach außen gerichtete Zentripetalkraft. Der Abstand Kern - Elektron wird größer.

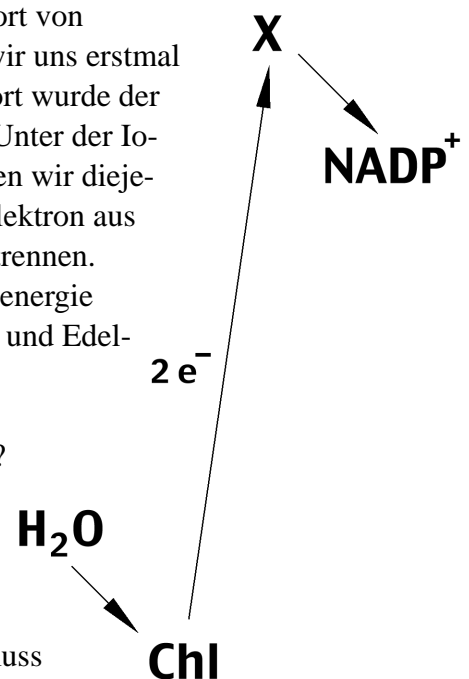


Und was hat das Ganze mit dem Bergauftransport von Elektronen zu tun? Abwarten! Jetzt erinnern wir uns erstmal an den Chemieunterricht in der 9. Klasse. Dort wurde der Begriff der Ionisierungsenergie behandelt. Unter der Ionisierungsenergie eines Elementes verstehen wir diejenige Energie, die erforderlich ist, um ein Elektron aus der Elektronenhülle eines Atoms heraus zu trennen.

Bei den Alkalimetallen ist diese Ionisierungsenergie besonders klein, während sie bei den Edelgasen und Edelmetallen besonders hoch ist.

Was hat denn die Ionisierungsenergie mit dem Bergauftransport zu tun?

Sehr viel. Schauen wir uns noch mal das Bild mit dem Bergsteiger auf der letzten Seite an. Das Chlorophyll gibt Elektronen an das NADP ab, dazu müssen die Elektronen bergauf fließen. Man kann dieses Bild nun etwas präzisieren. Das NADP kann die Elektronen nur von einem Stoff X aufnehmen, der ein höheres Redoxpotential hat. X wiederum muss die Elektronen vom Chlorophyll erhalten.

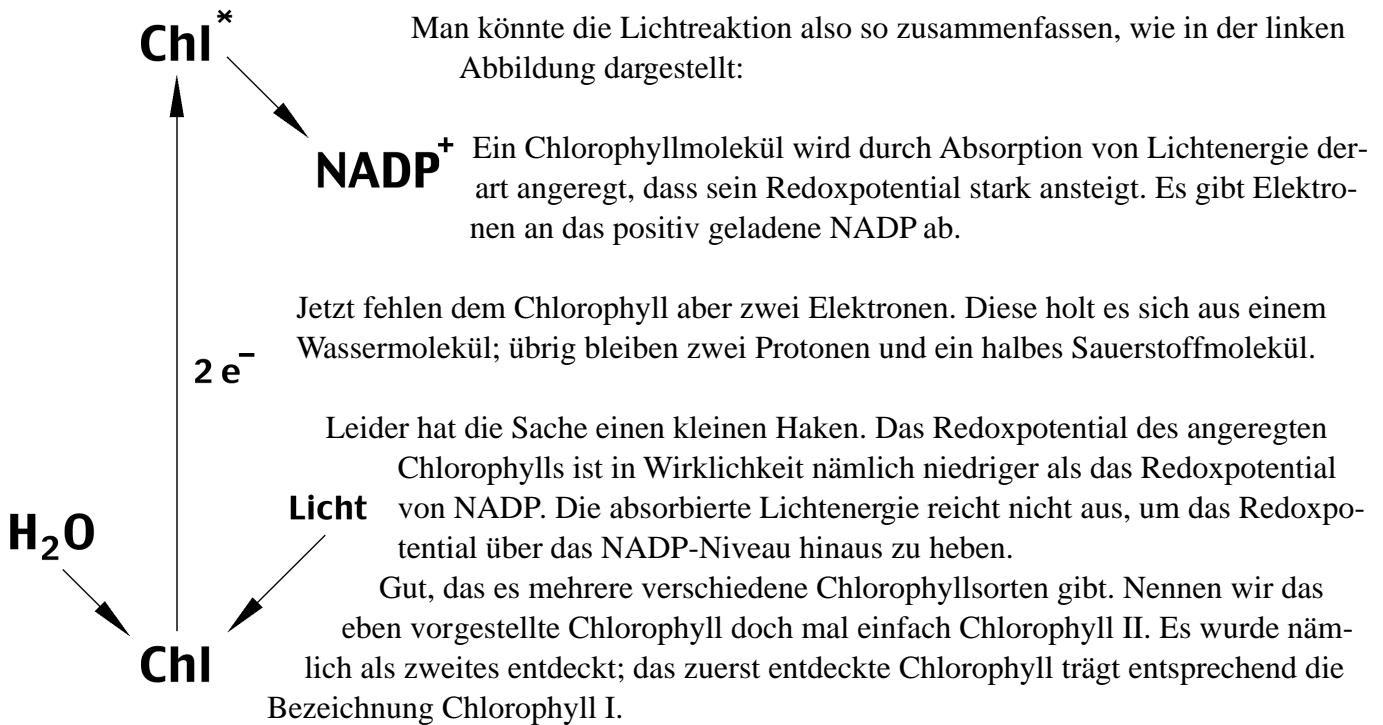


Und jetzt verbinden wir die verschiedenen Punkte, die auf dieser Seite erwähnt wurden, miteinander. Auch das Chlorophyllmolekül hat Elektronen, die durch Aufnahme von Licht in eine höhere Umlaufbahn getrieben werden. Der Kern zieht diese Elektronen nicht mehr so stark an wie vorher, sie können leichter aus dem Chlorophyllmolekül gelöst werden. Die Ionisierungsenergie des Chlorophyllmoleküls sinkt. Und damit steigt die Fähigkeit des Chlorophylls, Elektronen abzugeben. Kurz: durch die Aufnahme von Licht steigt das Redoxpotential des Chlorophylls sehr stark an; es wird so hoch, dass das angeregte Chlorophyll Elektronen an das NADP abgeben kann. Die ominöse Substanz X ist nämlich nichts anderes als das angeregte Chlorophyll, also das Chlorophyll, welches Licht absorbiert hat.

Merke:

Ein Chlorophyllmolekül wird durch Absorption von Lichtenergie stark angeregt, sein Redoxpotential steigt, und es gibt Elektronen an NADP ab. Anschließend holt es sich aus einem Wassermolekül die jetzt fehlenden Elektronen zurück.

Das zweite große Problem der Lichtreaktion



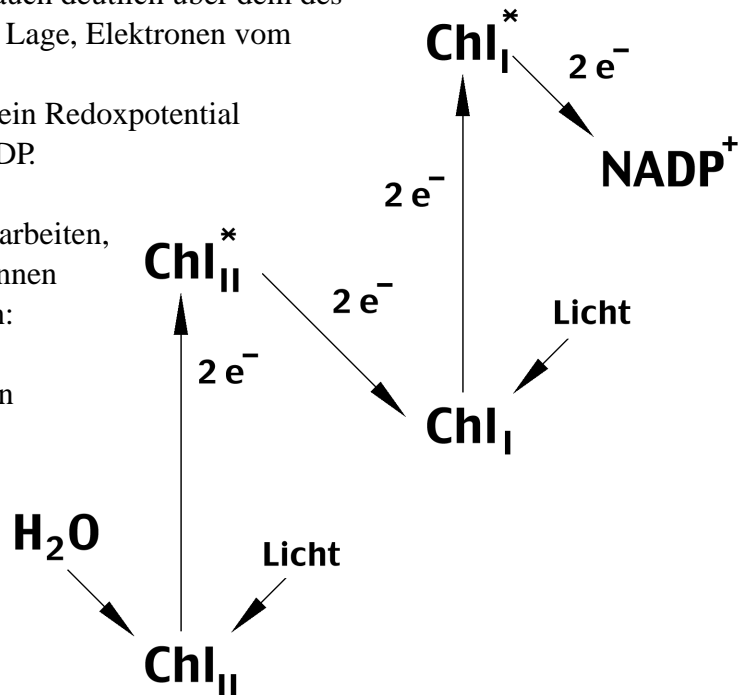
Chlorophyll I hat ein Redoxpotential, welches deutlich höher liegt als das von Chl II. Und das Redoxpotential des angeregten Chl I liegt über dem des NADP.

Andererseits liegt das Redoxpotential von Chl I auch deutlich über dem des Wassers. Chlorophyll I allein ist also nicht in der Lage, Elektronen vom Wasser auf das NADP zu übertragen.

Ebenso wenig ist Chl II dazu in der Lage, denn sein Redoxpotential im angeregten Zustand ist zu niedrig für das NADP.

Wenn aber beide Chlorophyllsysteme zusammenarbeiten, sozusagen eine Zick-Zack-Kette bilden, dann können die Elektronen vom Wasser zum NADP gelangen:

Das Chl II wird belichtet, gibt zwei Elektronen an das Chl I ab. Anschließend holt es sich zwei Elektronen vom Wasser zurück, dabei entsteht Sauerstoff als Abfallprodukt. Nun hat das Chl I die beiden Elektronen. Wenn dieses nun Licht absorbiert, steigt das Redoxpotential des Moleküls so stark an, dass die Elektronen jetzt an NADP abgegeben werden können.



Merke:

Keines der beiden Chlorophyllsysteme I oder II ist in der Lage, die Elektronen vom Wasser zum NADP zu transportieren. Erst wenn beide Systeme zusammenarbeiten, gelingt dieser Transport.

Wie kann man die Existenz von zwei Chlorophyllsystemen, die zusammenarbeiten, beweisen?

Dazu gibt es ein ganz einfaches Experiment - nicht so einfach, dass man es im Schülerversuch durchführen könnte - aber trotzdem ziemlich einfach. Allerdings muss man zuvor wissen, dass die beiden Chlorophylle, Chl I und Chl II, unterschiedliches rotes Licht absorbieren. Das eine absorbiert bevorzugt hellrotes Licht (ca. 650 - 680 nm), das andere eher dunkelrotes Licht (700 - 720 nm).

Und hier der Versuch:

Fertige eine Chloroplastensuspension an und bestrahle sie im Reagenzglas mit hellrotem Licht der relativen Intensität 1. Ermittle, wieviel Sauerstoff pro Minute entsteht.

Wiederhole den Versuch mit dunkelrotem Licht. Notiere auch hier die Sauerstoffproduktion.

Wiederhole nun den Versuch mit doppelter Lichtintensität (sowohl mit hell- wie auch mit dunkelrotem Licht). Ergebnis: die Sauerstoffproduktion wird jeweils doppelt so intensiv sein.

Und nun der entscheidende Versuch: bestrahle die Chloroplastensuspension gleichzeitig mit hellrotem Licht der Intensität 1 und mit dunkelrotem Licht der Intensität 1. Rein theoretisch müsste die Sauerstoffproduktion den relativen Wert 2 haben. Man beobachtet aber eine höhere Intensität als 2.

Auswertung:

Hellrotes Licht aktiviert das eine der beiden Chlorophyllsysteme optimal. Das andere System arbeitet zwar ebenfalls, aber nicht optimal.

Bei dunkelrotem Licht ist es genau umgekehrt; wieder arbeitet nur ein Chlorophyllsystem optimal.

Bestrahlt man die Pflanzen mit beiden Wellenlängen gleichzeitig, arbeiten beide Systeme optimal. Entsprechend hoch ist dann auch die Sauerstoffproduktion.

Dieser Versuch heißt übrigens - nach seinem Erfinder - EMERSON-Versuch.

Merke:

EMERSON fand heraus, dass es zwei Photosysteme I und II gibt, die für die Lichtreaktion verantwortlich sind. Nur wenn beide Systeme optimal zusammenarbeiten, kann die Photosynthese mit maximaler Effektivität ablaufen.

Wie entsteht das ATP während der Lichtreaktion?

Im Prinzip haben wir diese Frage schon beantwortet: genau wie bei der Atmungskette. Die Elektronen fließen vom Wasser über das Chl II zum Chl I und von dort zum NADP. Allerdings nicht auf "geradem" Wege, wie die Schemazeichnung suggeriert, sondern auf Umwegen. Und vor allem gibt es Zwischenstationen, die wir hier nicht berücksichtigt haben. Die einzelnen Stationen der Elektronen sind geschickt in der Membran der Thylakoide angeordnet, genau wie bei der Atmungskette. Durch den Transport der Elektronen kommt es kurzzeitig zu negativen bzw. positiven Aufladungen bestimmter Membranbereiche, was dazu führt, dass Protonen durch die Membran gepumpt werden können. Auf diese Weise wird ein Protonengradient aufrechterhalten, der dann die Synthese von ATP nach dem Prinzip des umgekehrten aktiven Transportes ermöglicht.