

Von der Sauerstoffkatastrophe zur Grundlage des Lebens –

Die Erfindung der Photosynthese

Hann-Jörg Eckert

Das Leben auf der Erde begann vor ca. vier Milliarden Jahren mit einfachsten Mikroorganismen, die sich von organischen Molekülen ernährten, die in der so genannten „Ursuppe“ zunächst ausreichend vorhanden waren. Mit der Zeit wurden diese „Nahrungsmittel“ jedoch rarer, da sie aufgebraucht wurden und kein Nachschub in Aussicht war. Die Synthese von komplexen organischen aus einfachen anorganischen Molekülen erfordert die Zufuhr von Energie in einem komplizierten Vorgang, den die damaligen Mikroorganismen nicht beherrschten. Irgendwann vor ca. 3,5 Milliarden Jahren entwickelten Bakterien dann die Fähigkeit die Energie des Sonnenlichtes zu nutzen, um aus anorganischen Molekülen ihre eigene Nahrung herzustellen. Sie verwendeten dafür zunächst die in der damaligen Atmosphäre im Übermaß vorhandenen Schwefelwasserstoffe und Kohlendioxid. Es dauerte noch mal 500 Millionen Jahre bis eine Gruppe von Bakterien die heutige Form der Photosynthese „erfand“, bei der Wasser (H_2O) in Sauerstoff und molekular gebundenen Wasserstoff gespalten wird. Diese Bakterien, die aufgrund ihrer Farbe Cyanobakterien (von griechisch kyano = dunkelblau) genannt werden, gibt es heute noch. Ihre neue revolutionäre Fähigkeit zur Wasserspaltung hatte dramatische Konsequenzen für die damalige Umwelt. Sie führte zur so genannten „Sauerstoffkatastrophe“, da bei dieser Art von Photosynthese Sauerstoff als „Abfallprodukt“ frei wird. Dadurch erhöhte sich der Sauerstoffgehalt der bis dahin weitgehend sauerstofffreien Erdatmosphäre innerhalb von 300 Millionen Jahren auf seinen heutigen Wert von ca. 20%. Für viele der vorher dominierenden Mikroorganismen, die an eine sauerstofffreie „Luft“ gewöhnt waren, war Sauerstoff ein Zellgift. Sie starben daher aus oder mussten in Zukunft eine Nischendasein in kleinen, für sie geeigneten Lebensräumen führen, wie z.B. in der Umgebung von Schwefelwasserstoffquellen.

Der zentrale Funktionsmechanismus der Photosynthese hat sich seitdem nicht verändert. Auch die heutigen Landpflanzen haben die Fähigkeit zur Photosynthese von den Cyanobakterien übernommen. Fast das gesamte Leben auf der Erde basiert also auf dieser Erfindung der Cyanobakterien vor 3,5 Milliarden Jahren.

Viele Naturforscher beschäftigten sich in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts mit der Frage nach der Natur der Luft. Der Engländer Joseph Priestley setzte dabei 1771 eine Maus in ein großes, luftdicht verschlossenes Glasgefäß. Diese starb nach einiger Zeit. Wenn jedoch eine größere Pflanze in der Flasche war, konnte die Maus wesentlich länger überleben. Die Pflanze produzierte also „gute“ Luft, d.h. Sauerstoff, wie wir heute wissen. Wenig später (1778) bemerkte der Holländer Jan Ingenhousz, dass die Pflanzen Licht benötigen, um „gute Luft“ zu erzeugen und dass dazu die grünen Teile der Pflanzen notwendig sind. Die Schweizer Jean Senbier und Nicolas Theodore de Saussure stellten einige Jahre später fest, dass die Pflanzen Kohlendioxid und Mineralien aus Wasser für den Prozess der Luftverbesserung benötigten. Obwohl es damals noch nicht so formuliert wurde, war damit der Gesamtprozess der Photosynthese bekannt, der wie folgt zusammengefasst werden kann:

Pflanzen synthetisieren aus Kohlendioxid und Wasser mit Hilfe der Energie des Lichtes organische Substanzen und setzen dabei Sauerstoff frei.

Heute weiß man, dass die Photosynthese bei Pflanzen in kleinen linsenförmigen Organellen stattfindet. Sie werden Chloroplasten genannt und sind etwa zwei bis vier Mikrometer breit und vier bis sieben Mikrometer lang. Die Chloroplasten können als kleine hoch organisierte Fabriken aufgefasst werden, in denen mit Hilfe der Energie des Lichtes organische Substanzen aus Kohlendioxid und Wasser synthetisiert werden, wobei Sauerstoff als „Abfallprodukt“ freigesetzt wird. Das Licht wird dabei von Chlorophyllmolekülen aufgenommen die überwiegend in so genannten Lichtsammelkomplexen angeordnet sind und den Blättern ihre grüne Farbe geben. Jeder Quadratmillimeter eines Blattes enthält etwa eine halbe Million Chloroplasten. Die in dieser Fabrik ablaufenden Vorgänge können in Primärprozesse und Sekundärprozesse eingeteilt werden.

In den Primärprozessen wird das Licht zunächst von den Chlorophyllen absorbiert. Die so gesammelte Lichtenergie wird dann extrem schnell an die Reaktionszentren von zwei Photosystemen (Photosystem I und Photosystem II) weitergeleitet. Diese Photosysteme können die Lichtenergie in einem komplizierten Prozess in chemische Energie umwandeln, die in den Molekülen ATP (Adenosintriphosphat) und NADPH (Nicotinamid-adeninucleotidphosphat) gespeichert wird. In den Sekundärprozessen werden mit Hilfe der im ATP und NADPH gespeicherten Energie Kohlehydrate synthetisiert. Die Sekundärprozesse der Photosynthese sind schon seit ca. 50 Jahren weitgehend aufgeklärt. Der amerikanische Biochemiker Melvin Calvin erhielt 1961 den Nobelpreis dafür. Bei den Primärprozessen gibt es dagegen noch sehr viele offene Fragen. Bei der Untersuchung der Primärprozesse der Photosynthese, die gegenwärtig weltweit Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen sind,

spielt das Licht wiederum eine herausragende Rolle und zwar als Werkzeug. Dies lässt sich anhand einer Messmethode gut veranschaulichen.

Damit die Energie des Lichtes für die Photosynthese verwendet werden kann, wird das Licht von den Chlorophyll-Molekülen absorbiert. Sie werden dadurch in einen angeregten Zustand versetzt, in dem die Energie des Lichtes für eine kurze Zeit gespeichert wird. Die Pflanzen können einen großen Teil dieser Energie zur Photosynthese nutzen. Der Rest wird entweder in Wärme umgewandelt oder wieder in Form von Licht abgestrahlt, das als Fluoreszenz bezeichnet wird.

Nach dem Gesetz der Energieerhaltung, kann Energie nicht verloren gehen, sondern nur in verschiedene Formen umgewandelt werden. Daher muss nach der Absorption einer bestimmten Lichtmenge durch die Chlorophylle die Summe aus chemischer Energie, Wärmeenergie und als Fluoreszenz wieder abgestrahlter Lichtenergie konstant sein. Daraus folgt, dass die in Form von Fluoreszenz abgestrahlte Energiemenge davon abhängt, welchen Anteil der absorbierten Energie die Pflanze zur Photosynthese verwenden kann. Diese einfachen Überlegungen zeigen, dass Messungen der Fluoreszenzintensität Informationen über die molekularen Prozesse liefern können. Darauf beruht eine sehr wichtige Methode in der Photosyntheseforschung: Man bestrahlt ein Blatt mit einem kurzen Lichtblitz und misst, wie sich die Intensität der Fluoreszenz als Funktion der Zeit ändert. Diese Messung kann z.B. Aufschluss darüber geben, wie schnell die primären Prozesse der Photosynthese ablaufen und inwieweit die Photosyntheseeffizienz von Pflanzen durch Umwelteinflüsse beeinflusst wird.

Mit dieser und weiteren physikalischen Methoden, bei denen das Licht meist auch eine wichtige Rolle spielt, kann man gewissermaßen in das Innerste der Pflanzen hineinschauen und die molekularen Reaktionen der Primärprozesse der Photosynthese erforschen. So konnte z.B. gezeigt werden, dass die Chlorophylle die Lichtenergie in weniger als einer Nanosekunde zu den Reaktionszentren der beiden Photosysteme weiterleiten.

Die Cyanobakterien, die diese Art der „oxygenen“ Photosynthese vor ca. 3,5 Milliarden Jahren „erfunden“ haben, existieren heute noch in vielen Unterarten und gehören zu den bedeutendsten Bakterienarten. Sie verdanken ihre enorme Überlebensfähigkeit im Laufe der Evolution auch ihrer großen Anpassungsfähigkeit an die unterschiedlichsten Lichtbedingungen. Je nach Intensität und spektraler (farblicher) Zusammensetzung des Lichtes können sie die Pigmentzusammensetzung ihrer Lichtsammelkomplexe und damit ihre Farbe ändern, sodass sie das vorhandene Licht sehr effektiv nutzen können. Dadurch können sie auch an Orten leben, an denen es für die meisten anderen photosynthetischen Organismen zu dunkel ist. Ein besonderes Beispiel für ihre enorme Überlebenskunst ist das Cyanobakterium *Acaryochloris marina*, das erst

vor ca. zehn Jahren im Süd-Pazifik entdeckt wurde. Es verwendet eine besondere Chlorophyllsorte (nämlich Chl-d) zur Photosynthese, mit deren Hilfe es das nicht sichtbare Licht oberhalb von 700 nm nutzen kann, das von anderen Organismen der oxygenen Photosynthese nicht absorbiert wird. Dies widersprach dem bis dahin allgemein akzeptierten „Dogma“, dass für die Primärprozesse Photosynthese von Pflanzen, Algen und Cyanobakterien immer die Chlorophyllsorte Chl-a benötigt wird.

Die besonderen Eigenschaften von *Acaryochloris marina* erlauben diesem einzigartigen Cyanobakterium das Überleben in einer dunklen Umgebung, in die, aufgrund der Absorption durch andere photosynthetischen Organismen, fast kein sichtbares Licht vordringen kann.