

Moderne Ansätze der Photosyntheseforschung

Photosynthese als Basis einer biobasierten Wirtschaft

Die Fähigkeit der Pflanzen, Licht zur Produktion energiereicher, chemischer Verbindungen zu nutzen, hat in den vergangenen Jahren eine neue Schlüsselindustrie ins Leben gerufen: die biobasierte Wirtschaft, auch **Bioökonomie** genannt. **Nachwachsende pflanzliche Ressourcen** sollen schrittweise die knapper werdenden fossilen Rohstoffe ersetzen und somit unseren wachsenden Rohstoff- und Energiebedarf stillen. Pflanzen könnten nicht nur Nahrung, Futter und Treibstoffe herstellen, sondern auch Ausgangsmaterialien für die Bau-, Chemie- und Textilindustrie. Für all diese Produkte liefert die Photosynthese die stoffliche Basis.

Foto: © 18percentgrey / fotolia.com

Die Photosynthese ist ein komplexer Prozess, der auf eine sehr kurze Formel reduziert werden kann: Aus Wasser und Kohlendioxid entstehen Kohlenhydrate und Sauerstoff. Die dafür notwendige Energie stammt aus dem Sonnenlicht. Das zentrale Schlüsselenzym der Photosynthese hat einen so langen Namen, dass es meistens mit seiner Abkürzung RuBisCO benannt wird. Die Ribulose-1,5-bisphosphat-carboxylase/-oxygenase hat die Aufgabe, die Kohlendioxidmoleküle aus der Luft an Ribulose-1,5-bisphosphat zu koppeln. Sie katalysiert damit den entscheidenden Schritt der Photosynthese. Da die RuBisCO nur ein bis zwei Reaktionen pro Sekunde katalysieren kann, benötigt die Pflanze große Mengen dieses Enzyms. Es macht daher bis zu 50 Prozent des löslichen Proteingehalts in einem Blatt aus.

Eine der Photosynthese gegenläufige Nebenreaktion ist die Photorespiration, bei der die RuBisCO anstelle von Kohlendioxid Sauerstoff als Substrat verwendet. Durch die Photorespiration verschwendet die Pflanze Kohlendioxid, Stickstoff und Energie. Die Photorespiration tritt umso stärker auf, je höher die Sauerstoffkonzentration im Vergleich zur Kohlendioxidkonzentration im Blatt ist.

Photosynthese 2.0: C₄- und CAM-Pflanzen

Die Evolution hat im Laufe der Zeit auch modifizierte und effizientere Varianten der Photosynthese hervorgebracht. Sowohl die C₄- als auch die CAM-Pflanzen nutzen unterschiedliche Strategien, um die RuBisCO mit ausreichend Kohlendioxid zu versorgen und so die Photorespiration und auch die transpirationsbedingten Wasserver-

luste bei der Kohlendioxidaufnahme durch die Spaltöffnungen gering zu halten.

Bei den C₄-Pflanzen laufen eine Vorfixierung des CO₂ und der CALVIN-Zyklus in unterschiedlichen Blattbereichen ab: In den Mesophyllzellen wird Kohlendioxid vorfixiert und dann in die charakteristischen Bündelscheidenzellen transportiert. Erst dort kommen die RuBisCO und die Enzyme des CALVIN-Zyklus zum Einsatz. Da durch diesen Mechanismus die Kohlendioxidkonzentration in den Bündelscheidenzellen verhältnismäßig hoch ist, wird die Photorespiration unterdrückt und die Photosyntheserate gesteigert. Zu den C₄-Pflanzen zählen viele Gräser wie Mais, Zuckerrohr und Hirse.

Bei den CAM-Pflanzen, die hauptsächlich in trockenen Regionen wachsen, finden eine Vorfixierung des CO₂ und der CALVIN-Zyklus zu unterschiedlichen Tageszeiten statt (CAM = Crassulaceen-Säurestoffwechsel; engl. **Crassulacean Acid Metabolism**). Nachts, wenn es kühler ist, öffnen die Pflanzen ihre Spaltöffnungen und fixieren große Mengen Kohlendioxid, die meist in Form von Äpfelsäure (Malat) in den Vakuolen gespeichert werden. Tagsüber bleiben die Spaltöffnungen geschlossen. Stattdessen werden jetzt die in der Nacht angelegten Vorräte, die Äpfelsäure, in den CALVIN-Zyklus eingeschleust. Auch bei CAM-Pflanzen tritt kaum Photorespiration auf. Allerdings spielen sie als Kulturpflanzen kaum eine Rolle. Eine Ausnahme ist die Ananas.

Sowohl C₄- als auch CAM-Pflanzen zeigen, dass die Photosynthese effektiver ablaufen kann, als es bei vielen landwirtschaftlich bedeutenden C₃-Pflanzen der Fall ist. Die Wissenschaft arbeitet deshalb daran, das Schlüsselenzym RuBisCO zu optimieren oder den C₄-Photosyntheseweg in C₃-Pflanzen zu installieren.

Neue Einzelteile für ein schnelleres Enzym – die Optimierung der RuBisCO

Die RuBisCO hat sich vor etwa drei Milliarden Jahren entwickelt, als die Erdatmosphäre nahezu frei von Sauerstoff war und es nicht notwendig war, besonders spezifisch zwischen Kohlendioxid und Sauerstoff unterscheiden zu können. Nur sehr langsam konnte sich die RuBisCO dann im Laufe der Evolution dem steigenden Sauerstoffgehalt der Atmosphäre anzupassen. Heute besitzt jeder photosynthetisch aktive Organismus eine abweichende RuBisCO. Die RuBisCO aus manchen Rotalgen kann wesentlich besser Sauerstoff von Kohlendioxid unterscheiden und arbeitet dadurch effizienter als die

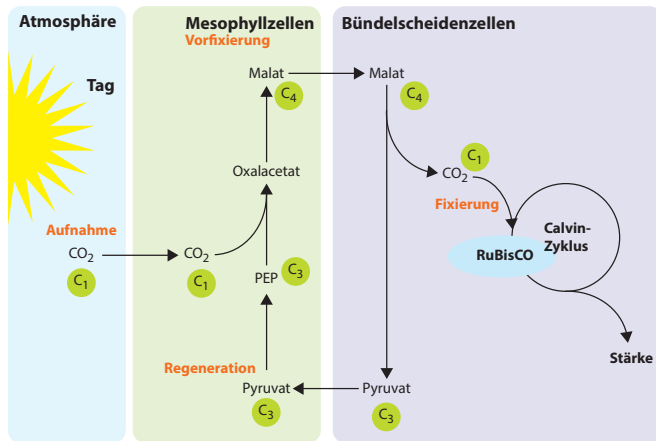
Photosynthese

Infobox

- Bereits vor 3 Milliarden Jahren entstanden auf der Erde die ersten Ansätze der Photosynthese. Vor 2 bis 1,5 Milliarden Jahren war die Photosynthese schon vollentwickelt.
- Der bei der Photosynthese entstehende Sauerstoff stammt aus der Protolyse des Wassers (Wasserspaltung).
- Die Absorptionsspektren der Chlorophylle zeigen zwei Maxima und zwar bei 400-500 nm (blau) und 600-700 nm (rot). Im grünen bis gelben Bereich wird kaum Strahlung absorbiert („Grünlücke“). Daher werden Blätter als grün wahrgenommen.
- Assimilation ist die Umwandlung aufgenommener Stoffe in körpereigene Verbindungen. Bei der Dissimilation werden körpereigene Verbindungen abgebaut.

Einleitung

Modul 1



Schematischer Ablauf der C_4 -Photosynthese. Die Zahlen an den Kohlenstoffsymbolen geben deren Anzahl in der jeweiligen Verbindung an.

RuBisCO der Gefäßpflanzen. Die Wissenschaft versucht herauszufinden, welche Veränderungen für solche verbesserten Eigenschaften verantwortlich sind, um dann gezielt die Kohlendioxidaffinität der RuBisCO beispielsweise von Weizen auf das Niveau der Rotalgen zu steigern.

Umbau im Reisblatt – Mit veränderter Blattanatomie zum Erfolg

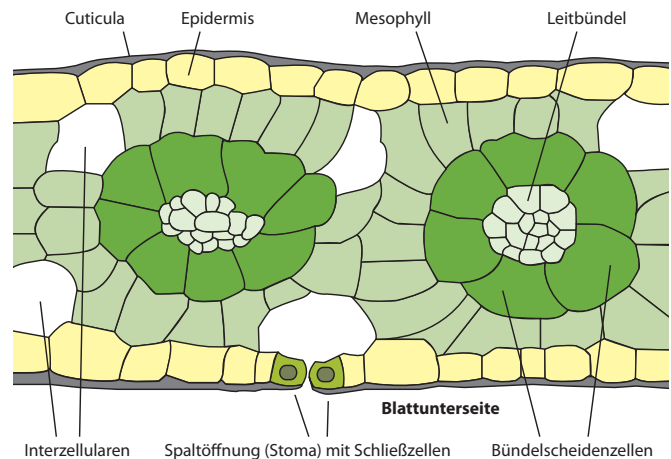
Der C_4 -Stoffwechselweg ist im Laufe der Evolution mehrmals unabhängig voneinander entstanden. Auch wenn sich C_3 - und C_4 -Pflanzen anatomisch unterscheiden: Untersuchungen haben gezeigt, dass der genetische Apparat der Bündelscheidenzellen bereits uralt und in den meisten Pflanzen vorhanden ist. Eine Idee ist es, C_3 -Pflanzen in C_4 -Pflanzen umzuwandeln, um so deren Erträge zu steigern. Besonders bei Reis, der in tropischen Regionen wächst, wird dieser Ansatz intensiv erforscht. Derzeit ist die Wissenschaft vor allem auf der Suche nach Pflanzenmutanten, bei denen zufällige genetische Veränderungen aufzeigen, welche Gene für den Umbau von C_3 zu C_4 -Photosynthese entscheidend sind.

Bei der Pflanzengattung *Flaveria* aus der Familie der Korbblütler (*Asteraceae*) gibt es sogar C_3/C_4 -Zwischenformen. Das nutzt man in der Wissenschaft ebenfalls um herauszufinden, welche Gene dafür verantwortlich sind, dass sich eine C_3 -Pflanze zu einer C_4 -Pflanze entwickelt. Mittlerweile sind bereits einige Kandidatengene identifiziert worden, die für die spezielle C_4 -Anatomie in Mais verantwortlich sind. Im nächsten Schritt sollen diese Gene in Reis eingebracht werden um zu prüfen, ob dann tatsächlich eine C_4 -ähnliche Bündelscheide ausgebildet wird.

Cyanobakterien als Wasserstoff-Fabriken

Wasserstoff ist eine saubere Energiequelle, weil bei dessen Verbrennung ausschließlich Wasser entsteht. In der Wissenschaft experimentiert man deshalb damit, Cyanobakterien (Blualgen) zu Wasserstoff-Fabriken umzubauen. Damit das gelingt, müssen energie-reiche Elektronen aus der Photosynthese umgeleitet und auf das eigens zu diesem Zweck eingebaute – Enzym Hydrogenase übertragen werden, das den Wasserstoff produziert.

Ein Vorteil der Produktion von Wasserstoff durch Cyanobakterien wäre, dass keine Konkurrenz um Anbauflächen für Nahrungsmittel entstünde. Denn Tanks mit Cyanobakterien könnten auf



Schematischer Blattquerschnitt einer C_4 -Pflanze mit den typischen Bündelscheidenzellen (nach Nultsch, *Allgemeine Botanik*. 11. Auflage, Thieme-Verlag, Stuttgart 2001).

Hausdächern installiert oder in landwirtschaftlich ungeeigneten Regionen aufgestellt werden. Da Cyanobakterien im Süß- und Salzwasser wachsen, wären auch Meeresküsten als Standorte geeignet.

Verbesserte Solaranlagen – Das „halbkünstliche Blatt“

Auch außerhalb lebender Zellen soll die Natur nachgeahmt werden. So wird versucht, Solaranlagen zu entwickeln, die Wasserstoff produzieren, der sich im Gegensatz zu Strom und Wärme einfach speichern lässt. Es wurde bereits herausgefunden, dass das Photosystem I, ein Teil des pflanzlichen Photosynthese-Apparats, in einem speziellen Gel eingebettet, wesentlich schneller arbeitet als in seiner natürlichen Umgebung. Es könnte somit zum nachwachsenden Rohstoff für die Solarzellindustrie werden und eines Tages die Silizium-Halbleiter ersetzen. Bisher ist das System aber noch zu instabil. Auch in ihrer Effizienz sind herkömmliche Solarzellen auf Siliziumbasis den „halbkünstlichen Blättern“ bisher überlegen. Der entscheidende Vorteil von „halbkünstlichen Blättern“ wäre jedoch, dass sie ständig ressourcensparend produziert werden könnten.

Arbeitsaufträge

1. **Sammeln Sie die grundlegenden Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Vorteile der C_4 -Photosynthese und des CAM-Stoffwechsels im Vergleich zur C_3 -Photosynthese.**
2. **Überlegen Sie, wie kann man relativ einfach eine C_3 - von einer C_4 -Pflanze unterscheiden kann?**
3. **„Pflanzen trockener Regionen haben sich ständig zwischen Verdursten und Verhungern zu entscheiden“. Erläutern Sie diese Aussage, indem Sie sich die Gaswechselströme bei der Photosynthese vergegenwärtigen.**
4. **Beschreiben Sie mit eigenen Worten die Ziele von einem der genannten Ansätze der modernen Photosyntheseforschung: a) Optimierung der RuBisCO, b) Umbau im Reisblatt, c) Wasserstoff-Fabriken, d) „halbkünstliches Blatt“.**