



Sprit aus Sonnenlicht

Pflanzen wandeln Kohlendioxid und Licht in Zucker.
Forscher ahmen die **Fotosynthese** nun nach, um mit
biologischen Methoden Chemikalien herzustellen - von
Gesichtscreme bis zu Kerosin.

TEXT ANDREAS MENN



Bunte Mischung
Wie in einem natürlichen Blatt erzeugen Forscher im Labor mithilfe von Licht in verschiedenen Wellenlängen aus Wasser Wasserstoff

Die Blätter, die nun im Herbst von den Bäumen fallen, werden meist achtlos aus dem Weg geräumt, ein Fall für den Laubbläser. Dabei ist jedes einzelne ein Wunderwerk der Natur: Tag für Tag wandeln kleine Kraftwerke in den Blättern Kohlendioxid aus der Luft in Zucker um. Die Energie, die dafür nötig ist, besorgen sich die Blätter einfach aus dem Sonnenlicht. Fotosynthese heißt die Methode. Sie macht Blätter, Algen und manche Bakterien zu kleinen Chemiefabriken, wie der Mensch sie nicht zu bauen vermag. Bisher.

Im Labor von Thomas Hannappel reift Stück für Stück eine Technologie heran, die die natürliche Fotosynthese kopiert – und sie eines Tages bei Weitem übertreffen soll. „Wir bauen ein künstliches Blatt“, sagt Hannappel, Leiter des Fachgebiets Grundlagen von Energiematerialien an der TU Ilmenau. Seine Version soll aber nicht im Herbst verrotten, sondern aus haltbaren Materialien wie Metallen bestehen. Und es soll keinen Zucker produzieren – sondern Wasserstoff und andere wichtige Treibstoffe.

Sollte das im großen Maßstab funktionieren, wäre das eine Revolution für die weltweite Energieversorgung. Statt Erdöl und Gas aus der Erde zu saugen, um Treibstoffe und Chemikalien zu produzieren, könnten künstliche Blätter Sprit aus Sonnenlicht produzieren. Gelänge es, die Fotosynthesefabriken in Serie zu bauen, würden Rohstoffe preiswert und in Massen verfügbar. Dabei würden sie wie natürliche Blätter sogar Kohlendioxid aus der Luft saugen – und den Klimawandel eindämmen.

Noch ist das eine Vision. Forscher wie Hannappel arbeiten mit Hochdruck daran, sie Wirklichkeit werden zu lassen. Im Labor haben sie erste künstliche Blätter entwickelt, die aus Sonnenlicht unter anderem Wasserstoff erzeugen. Mehrschichtige flache Sonnenkollektoren aus Halbleitern und Katalysatoren sind das, bisher nur wenige Quadratzentimeter groß und ziemlich teuer. Und noch halten sie nur wenige Stunden.

Aber schon in den nächsten Jahren könnten erste industrielle Anlagen entstehen, die Sonnenlicht in Chemieprodukte umwandeln: Statt ein Blatt in einem integrierten Gerät nachzuahmen, folgen sie der Fotosynthese in mehreren Schritten mit unterschiedlichen Technologien – und nutzen dabei teilweise bewährte Geräte wie Solarzellen. Und eines Tages könnten Biologen sogar lebende Organismen aufmotzen: Schon heute forschen sie daran, den Stoffwechsel in Mikroben oder Pflanzen radikal

zu optimieren. So ließen sich etwa Bakterien in lebende Treibstofffabriken verwandeln. Perfektioniert für die Zwecke der Industrieproduktion.

„Wir sehen ein Wettrennen verschiedener Technologien“, sagt Matthias Beller, Direktor am Leibniz-Institut für Katalyse in Rostock. „Niemand kann sagen, welche in 20 Jahren dominieren wird.“ Alle aber nehmen sich den Prozess der Fotosynthese zum Vorbild, den die Natur über Millionen von Jahren entwickelt hat. Er besteht aus zwei Schritten. Zunächst fängt der grüne Farbstoff Chlorophyll Sonnenlicht ein und erzeugt elektrische Ladungen – negative Elektronen hier, dort positiv geladene Orte, an denen Elektronen fehlen. Diese Spannung verwendet das Blatt, um Wassermolekülen Elektronen zu entziehen – und sie dadurch zu spalten. Heraus kommen Wasserstoff und Sauerstoff. In einem zweiten Schritt erzeugt das Blatt mit dem Wasserstoff und mit Kohlendioxid aus der Luft Zuckermoleküle – die Grundlage für den Aufbau von Biomasse. Für den Prozess benötigt die Natur eine Reihe von speziellen Molekülen, Enzyme genannt, die die Reaktionen anschieben. Es ist eine großartige Erfindung der Evolution. In einem ist die Natur allerdings nachlässig: Sie verschwendet Energie. „Die Fotosynthese ist ein komplexer, faszinierender Prozess – aber kein effizienter“, sagt Forscher Beller. „Mehr als 99 Prozent der Energie, die im Sonnenlicht steckt, gehen bei der Fotosynthese verloren.“

Wie eine künstliche Seerose

Darum würde es für die Rohstoffversorgung der Menschheit nicht reichen, einfach nur aus heute existierenden Pflanzen Treibstoffe wie Biodiesel zu produzieren. Wollte Deutschland seinen gesamten Energiebedarf mit Pflanzen decken, bräuchte es allein dafür mehr als dreimal so viel landwirtschaftliche Nutzfläche wie heute, wie aus einer Studie der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften hervorgeht. Will man also per Fotosynthese in großen Mengen Treibstoff produzieren, müssen die Forscher sie in einen Turbomodus versetzen.

Das Team um Halbleiterforscher Hannappel ist dem Ziel in den vergangenen Jahren ein deutliches Stück näher gekommen. Hält Hannappel sein künstliches Blatt, groß wie eine Briefmarke, mit einer Pinzette in ein Wasserglas, beginnt das Wasser drum herum zu blubbern: Das Blatt spaltet es in Wasserstoff und Sauerstoff. Aus dem Wasserstoff lassen sich mit Kohlendioxid Treibstoffe herstellen – auch das gelingt Hannappels Blatt bereits. ▶

Seit 2018 halten die Forscher dabei einen Weltrekord: Ihr künstliches Blatt nutzt bei der Wasserstoffproduktion 19,3 Prozent des einfallenden Sonnenlichts. Und erst Mitte Oktober verkündete Hannappels Team einen weiteren Durchbruch, in einem Projekt zusammen mit anderen deutschen Forschungspartnern und dem California Institute of Technology: Nun kann das Blatt mit einem Wirkungsgrad von fünf Prozent Treibstoffe wie Kohlenmonoxid und Methan herstellen. „Unser künstliches Blatt ist viel effizienter als das echte“, sagt Hannappel. Als Baustoffe verwendet der Forscher nicht Chlorophyll oder Enzyme, sondern anorganische Materialien, wie sie etwa auch in Solarzellen vorkommen: Halbleiter und Katalysatoren aus verschiedenen Metallen wie Platin, Iridium und Rhodium. „Alles sehr kostbare Materialien“, räumt Hannappel ein.

Um die Kosten für das künstliche Blatt zu senken, fahnden die Forscher nach preiswerteren und noch wirkungsvolleren Katalysatoren. Auch an den Halbleitern, die Hannappel zu leistungsstarken Solarzellen aufeinanderschichtet, ist noch einige Forschungsarbeit nötig, etwa bei der Effizienz. Ein weiteres Problem ist die Haltbarkeit des künstlichen Blatts: Im blubbernden Wasserbad erleidet das Material schnell Schäden, das Blatt geht nach wenigen Tagen kaputt. Es dürfte also noch einige Jahre an Grundlagenforschung brauchen, ehe die Technik reif für erste Anwendungen ist.

Winzige Helfer im Chemiepark

Thomas Haas will schneller vorankommen. Haas leitet den Bereich für künstliche Fotosynthese bei Evonik. Er hofft, dass Chemieunternehmen wie seines statt Gas und Öl schon bald in ersten Anwendungen Kohlendioxid als Rohstoff nutzen. Ganz nach dem Vorbild der Natur, nur mit einem Unterschied: „Wo die Natur Glukose herstellt, wollen wir Chemikalien für Lacke, Kosmetik oder Schmierstoffe produzieren“, sagt Haas.

In einer Versuchsanlage im Chemiepark Marl verfolgt Haas mit seinem Team einen mehrstufigen Ansatz. Wo es heute schon technische Lösungen gibt, will er das Blatt nicht neu erfinden. Bei der Nutzung von Sonnenlicht etwa setzt er auf Solarzellen, die mit hohem Wirkungsgrad Strom erzeugen. „Jeden Tag geht auf der Erde die Sonne auf, seit Milliarden Jahren, absolut zuverlässig“, sagt Haas. „Die Natur hatte es nie nötig, die Lichtausbeute zu optimieren. Das können wir Menschen viel besser.“

Die so gewonnene elektrische Energie müssen die Forscher dann noch in chemische Energie umwandeln, um sie in ihrer

künstlichen Fotosynthese weiterverwenden zu können. Hier kommt ein Container ins Spiel, den Siemens Energy, ein Partner des Projekts in Marl, vor der Forschungshalle aufgestellt hat. Darin erzeugen Elektrolyseure mit dem Strom Wasserstoff aus Wasser. Die Geräte sind größer und aufwendiger als Hannappels künstliches Blatt, das Solarzelle und Wasserstoffproduktion in einem schlanken Gerät vereint. Dafür aber sind Solarzellen und Elektrolyseure ausgereift, langlebig und preiswert.

Meister der Moleküle
Max-Planck-Forscher Tobias Erb baut mithilfe von Enzymen eine effizientere Version der Fotosynthese



„Wir könnten Rohstoffe nachhaltig produzieren – nur mit Licht, Wasserstoff und Kohlendioxid“

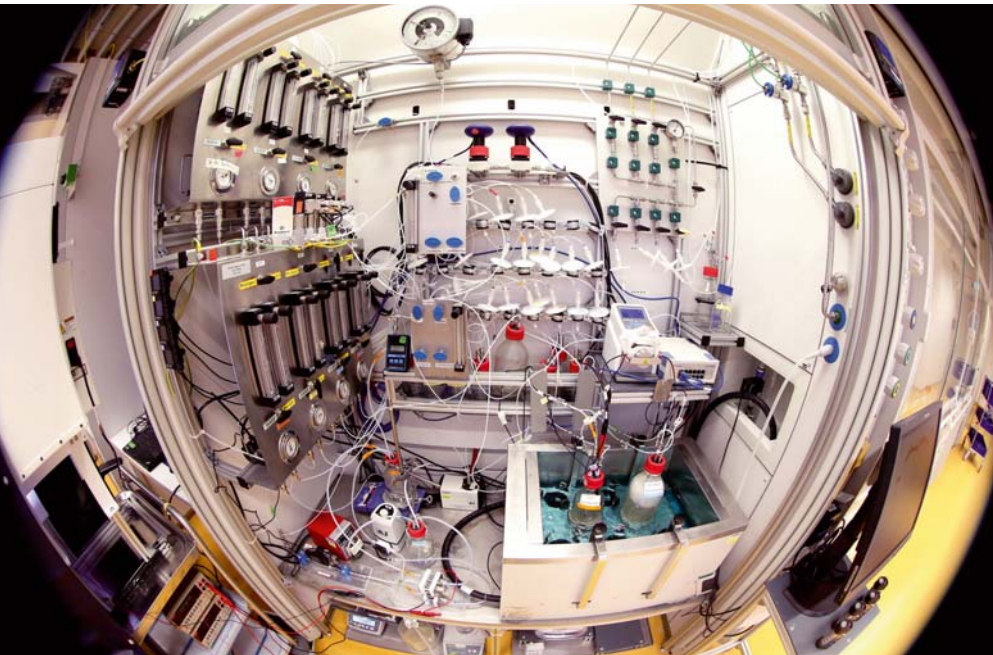
TOBIAS ERB
Direktor des Max-Planck-Instituts für terrestrische Mikrobiologie

Aus Licht wird chemische Energie: Der erste Teil der Fotosynthese ist so erledigt – mit einem bewährten elektrochemischen Verfahren. Nun geht es darum, Kohlendioxid aus der Luft zu holen, den Kohlenstoff im Kohlendioxid zu nutzen – und mit ihm alle jene Moleküle zu bauen, die die Chemieindustrie benötigt. „Diese Synthese gelingt der Natur unglaublich gut“, sagt Haas. Anders als die Chemie, bei der immer unerwünschte Nebenprodukte entstünden, produziere die natürliche Fotosynthese fast keine Abfälle.

Darum überlässt Haas die weiteren Schritte in Marl Milliarden kleinen Helfern aus der Natur. In dem zweistöckigen Versuchsgebäude leben sie in einem Stahltank, einen halben Meter breit, acht Meter hoch:

2000 Liter voll Bakterien der Gattung Clostridium. In der Natur kommen die Einzeller etwa in der Tiefsee vor. Die Forscher haben sie aus unzähligen Kandidaten ausgewählt, weil sie genau die richtigen Eigenschaften haben: Sie haben sich aus Urzeiten in ihren Genen die Fähigkeit bewahrt, als Energiequelle nicht Sonnenlicht, sondern Wasserstoff zu nutzen, wie er in heißen Tiefseequellen entsteht. Sie können Kohlendioxid aus der Luft aufnehmen. Und sie produzieren in ihrem Innern Moleküle, aus denen sich Chemikalien herstellen lassen.

Fermentation heißt das Verfahren, ein Prozess, der auch beim Bierbrauen genutzt wird. Dabei füttern die Forscher die Bakterien mit Wasserstoff, Kohlendioxid und einigen Mineralstoffen. Dann aktivieren die Mikroben ihre uralten Gene und gehen an die Arbeit. Sie teilen und vermehren sich, bauen so nützliche Moleküle. „Die Bakterien ergänzen sich dabei“, sagt Haas. Der erste Bakte-



rienstamm verwandelt die Gase in mehr als 20 Schritten in ein chemisches Zwischenprodukt. Aus diesem erzeugt der zweite Bakterienstamm jene Kohlenwasserstoffe, auf die Haas' Team es abgesehen hat.

In weiteren Reaktoren destillieren die Forscher diese aus der Bakterien-Molekülbrühe. „Das Produkt muss immer gleich sein, absolut rein sein – das sind Dinge, mit denen wir noch zu kämpfen haben“, sagt Haas. Anfangs kamen die Chemikalien Butanol und Hexanol heraus. Inzwischen haben die Forscher die Fermentation weiterentwickelt. Jetzt können die Bakterien auch andere gängige Chemikalien erzeugen. Partner wie der Hamburger Konsumgüterkonzern Beiersdorf testen die biologisch produzierten Chemikalien aus Marl derzeit, um daraus etwa Hautpflegeprodukte zu kreieren.

Ein Motor mit Fehlzündung

Noch ist die künstliche Fotosynthese in Marl ein Pilotprojekt. Die jährliche Produktion: 10 bis 20 Tonnen Chemikalien. Doch eine größere Fertigungsanlage haben die Evonik-Forscher schon konzipiert. Sie soll dann etwa 10 000 Tonnen produzieren können. „Wenn wir genügend Zusagen unserer Kunden haben, legen wir mit dem Bau los“, sagt Haas. Der beste Standort wäre neben einer Fabrik, die viel Kohlendioxid (CO₂) produziert. Denn noch hat das Verfahren in Marl einen Makel: Die Bakterien brauchen hochkonzentriertes Kohlendioxid, um reichlich Chemikalien zu produzieren. Der CO₂-Gehalt in der Luft ist dafür zu gering. Doch auch an dieser Stelle lässt sich die Fo-

Winzige Helfer
Forscher von Evonik verwandeln Bakterien in kleine Chemiefabriken – hier noch im Labor in Marl

tosynthese noch verbessern, glaubt Tobias Erb, Direktor des Max-Planck-Instituts für terrestrische Mikrobiologie in Marburg. „Der Schritt, bei dem CO₂ in den Stoffwechsel eingebracht wird, ist langsam und fehlerhaft“, sagt der Wissenschaftler, „wie ein Motor, der eine Fehlzündung hat und gerade noch so durchtuckert.“

Erb hat diesem Motor in den vergangenen Jahren ein Tuning verpasst. In der Natur greift ein Enzym namens Rubisco Kohlendioxidmoleküle aus der Luft und schleust sie in die Zelle ein. Erb und sein Team fanden in einem Bakterium ein Enzym, das Kohlendioxid schneller und präziser aus der Luft schnappen kann. Um mit ihm das Rubisco zu ersetzen, mussten die Forscher einen ganz neuen Stoffwechselweg mit insgesamt 17 Enzymen entwickeln – mit erstaunlichem Ergebnis: „Unsere künstliche Fotosynthese braucht 20 Prozent weniger Energie als natürliche Prozesse und kann in der gleichen Zeit zehnmal so viel CO₂ fixieren“, sagt Erb.

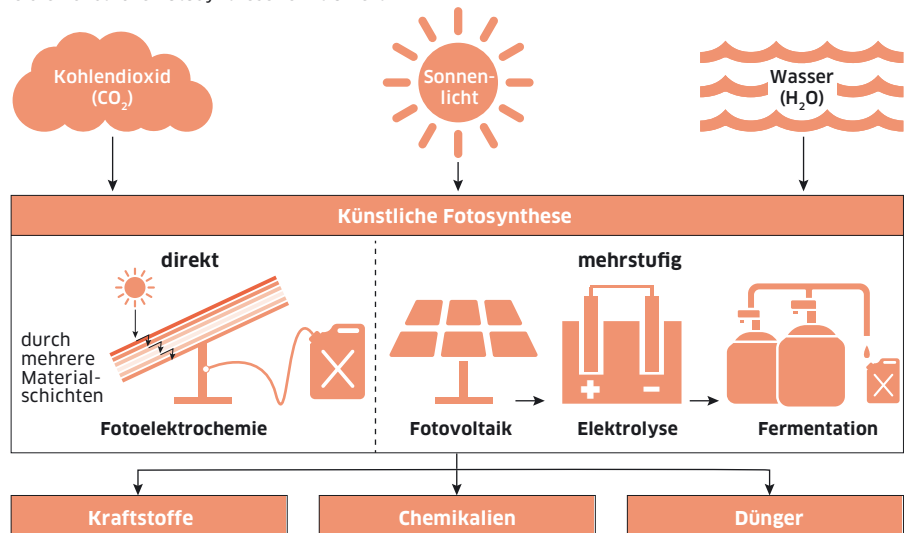
Heißhunger auf Kohlendioxid

Im Labor gelang es seinem Team mit diesem Verfahren bereits, Kohlendioxid in Pentadecan umzuwandeln, einen Hauptbestandteil von Dieselmotoren, und in ein Polyketid, das ein Vorläufer eines Antibiotikums ist. Noch klappt das nur in kleinen Flüssigkeitstropfen. Als Nächstes möchten die Marburger Forscher aber eine ganze funktionsfähige Zelle bauen, in der ihre verbesserte Fotosynthese funktioniert. Gelänge es etwa, einzellige Algen mit dem Turbomotor auszustatten, dann könnten vielleicht ganze Sonnenkraftwerke aus Algen CO₂ direkt aus der Atmosphäre saugen und preiswerte Chemikalien produzieren.

Aber Geduld ist angebracht. Die Natur hatte Hunderte Millionen Jahre, um die Fotosynthese zu entwickeln. Um sie umzubauen, dürften Forscher nun auch noch einige Jahre brauchen. ■

BESSER ALS DIE NATUR

Wie die künstliche Fotosynthese funktioniert



Quelle: eigene Recherche

FOTOS: PR (2)