

# Vom Unsinn der Biokraftstoffe

Hartmut Michel\*



Hartmut Michel,  
Direktor am Max-Planck-  
Institut für Biophysik

Die fossilen Brennstoffe – Mineralöl, Kohle und Erdgas – sind aus der Biomasse längst vergangener Zeiten entstanden. Damit sind sie indirekte Produkte der Photosynthese. Es liegt deshalb nahe zu fragen, ob wir die uns derzeit zur Verfügung stehende Biomasse für die Herstellung von Biokraftstoffen wie Biodiesel und Biogas nutzen sollen. Die Erzeugung von Biowasserstoff wäre eine weitere Option. Man kann des Öfteren lesen, die Nutzung von Biokraftstoffen sei CO<sub>2</sub>-neutral und deshalb eine Maßnahme gegen die Erderwärmung. Ihre Herstellung könne auch den Import von Erdöl und Erdgas reduzieren und damit von Energieimporten unabhängiger machen. Im Folgenden werde ich die Effizienz der Biokraftstoffherstellung diskutieren, sie mit Alternativen vergleichen, die offensichtlichen Schlussfolgerungen ziehen und Visionen präsentieren.

## Effizienz der Photosynthese

Zunächst ist es sinnvoll, die Effizienz der photosynthetischen Lichtenergieumwandlung zu betrachten. Zusätzlich werde ich einige Ideen präsentieren, wie die Effizienz der Photosynthese und damit die Produktion von Biomasse gesteigert werden könnte. Die Photosynthese setzt sich aus Licht- und Dunkelreaktionen zusammen. Bei den

Lichtreaktionen wird Licht von den photosynthetischen Pigmenten absorbiert und die Lichtenergie auf die Reaktionszentren übertragen. Dort finden die primäre Ladungstrennung und ein Elektronentransfer über die photosynthetische Membran statt. Nachfolgende Elektronen- und Protonentransferschritte führen zur Synthese des universellen biologischen Energieträgers ATP aus ADP und anorganischem Phosphat; NADP<sup>+</sup> wird dabei zu NADPH reduziert. In den Dunkelreaktionen werden dann NADPH und ATP dazu verwendet, aus atmosphärischem CO<sub>2</sub> Kohlenhydrate zu synthetisieren.

## Die Produktion von Biokraftstoffen stellt eine extrem ineffiziente Nutzung der verfügbaren landwirtschaftlichen Fläche dar

Die photosynthetischen Pigmente der Pflanzen absorbieren und nutzen nur 47% (energiebezogen) des Sonnenlichts. Grünes Licht, UV- und IR-Strahlung werden nicht genutzt. Theoretisch benötigt die Pflanze 8 Photonen, um 2 Moleküle NADP<sup>+</sup> zu NADPH zu reduzieren, gemessen werden hierfür jedoch 9.4 Photonen. Vergleicht man die durchschnittliche Energie der Photonen mit der in Form von NADPH gespeicherten Energie, so stellt man fest, dass nur 11.8% der Energie des Sonnenlichts in Form von NADPH gespeichert worden sind. Dieser Wert definiert dann auch etwa die obere Grenze

für die Effizienz der photosynthetischen Wasserstoffherstellung.

Die Effizienz der Photosynthese ist bei niedriger Lichtintensität am höchsten. Bereits bei 20% des vollen Sonnenlichts ist der photosynthetische Apparat gesättigt, 80% des Sonnenlichts werden damit nicht genutzt. Limitierend ist sehr wahrscheinlich der Elektronenfluss durch die photosynthetischen Reaktionszentren. Zusätzlich führen hohe Lichtintensitäten zu Schäden an einer zentralen Proteinuntereinheit des photosynthetischen Apparats: Pflanzen reparieren ihr Photosystem-II-Reaktionszentrum in einer Stunde dreimal durch Austausch des D1-Proteins. 3.5 Milliarden Jahre Evolution haben nicht ausgereicht, einen Mechanismus zu entwickeln, der die Schädigung verhindert.

Die Dunkelreaktionen werden einmal dadurch limitiert, dass das Enzym RuBisCO, das CO<sub>2</sub> in Ribulose-1,5-bisphosphat einfügt, nur unzulänglich zwischen CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> unterscheiden kann. Man glaubt, dass etwa ein Drittel der Energie der absorbierten Photonen dazu verwendet wird, das durch den Einbau von O<sub>2</sub> entstehende unerwünschte Produkt 2-Phosphoglycolat wieder abzubauen. Die zweite Limitierung besteht darin, dass die Photosynthese von der Verfügbarkeit großer Mengen Wasser abhängt. Im Sonnenlicht ist diese Bedingung oft nicht erfüllt.

Als Ergebnis dieser Limitierungen gelten 4.5% bei C<sub>3</sub>-Pflanzen als die Obergrenze für die Effizienz der photosynthetischen Lichtenergieumwandlung. In der Realität werden jedoch selbst für

[\*] Prof. Dr. H. Michel  
Abteilung für Molekulare Membranbiologie  
Max-Planck-Institut für Biophysik  
Max-von-Laue-Straße 3  
60438 Frankfurt am Main (Deutschland)  
E-Mail: hartmut.michel@biophys.mpg.de

schnell wachsende Hölzer wie Pappel lediglich etwa 1 % beobachtet.

### Biokraftstoffe

**K**ennt man die Ausbeute an Biokraftstoffen pro Hektar, kann man leicht ausrechnen, welcher Prozentsatz der Energie des Sonnenlichts in den Biokraftstoffen gespeichert wird. Für deutschen Biodiesel, der aus Rapssamen hergestellt wird, sind das weniger als 0.1 %, für Bioethanol weniger als 0.2 % und für Biogas etwa 0.3 %. Bei diesen Werten ist noch nicht einmal berücksichtigt, dass mehr als 50 % der in den Biokraftstoffen gespeicherten Energie gegen die für die Bereitstellung der Biomasse (für die Herstellung von Düngemitteln und Pestiziden, für die Bodenbearbeitung, für den Transport) und ihre chemische Umwandlung in den Biokraftstoff benötigte Energie aufgerechnet werden muss. Diese Energie stammt in der Regel von fossilen Brennstoffen. Die Herstellung und Nutzung von Biokraftstoffen ist daher nicht CO<sub>2</sub>-neutral. Ganz besonders hoch ist der Energieeinsatz bei der Produktion von Bioethanol aus Mais und Weizen. Einige Wissenschaftler bezweifeln sogar, dass bei Nutzung dieses Bioethanols überhaupt Energie eingespart wird. Mit Sicherheit ist die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung gering. Die Ausbeute an Biokraftstoffen der zweiten Generation, für deren Herstellung ganze Pflanzen verwendet werden, dürfte etwa doppelt so hoch liegen. Jedoch steigt wahrscheinlich auch der Energieeinsatz. So muss bei der Herstellung von Biodiesel nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren Wasserstoff zugesetzt werden, weil Synthesegas aus Biomasse viel zu wenig Wasserstoff enthält. Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Produktion von Biokraftstoffen eine extrem ineffiziente Nutzung der verfügbaren landwirtschaftlichen Fläche darstellt. Dies gilt auch für die Herstellung von Bioethanol aus Zuckerrohr in Brasilien.

### Die Alternative

**D**ie kommerziell erhältlichen Solarzellen wandeln das Sonnenlicht bereits

mit einer Effizienz von mehr als 15 % um, und die erzeugte elektrische Energie kann ohne größere Energieverluste in elektrischen Batterien gespeichert werden. Diese Energiespeicherung ist damit schon 150-mal besser als die in Form von Biokraftstoffen. Hinzu kommt, dass rund 80 % der in der Batterie gespeicherten elektrischen Energie für den Fahrzeugantrieb genutzt werden können, während von einem Verbrennungsmotor nur etwa 20 % der im Kraftstoff steckenden Energie auf die Räder übertragen werden. Beide Fakten zusammen führen dazu, dass die Kombination Photovoltaikzelle/elektrische Batterie/Elektromotor das verfügbare Land um den Faktor 600 besser nutzt als die Kombination Biomasse/Biokraftstoff/Verbrennungsmotor.

### Verbesserung der Photosynthese

**G**anz offensichtlich gibt es Möglichkeiten, die Primärprozesse der Photosynthese und damit der Biomasseproduktion zu verbessern. Zunächst könnte man daran denken, den Spektralbereich des genutzten Lichts durch Veränderungen an den photosynthetischen Pigmenten zu erweitern. Pigmente, die UV-Licht oder grünes Licht absorbieren, könnten hierzu beitragen, obwohl natürlich die Aussicht auf schwarze Blätter nicht sonderlich attraktiv ist. Realistischer scheint es, das Verhältnis von Lichtsammelpigmenten zu Reaktionszentren zu verkleinern. Dies kann dadurch geschehen, dass man die Zahl der Lichtsammelkomplexe, welche die Energie auf ein Reaktionszentrum übertragen, reduziert. Diese Maßnahme würde den Elektronenfluss durch jedes Reaktionszentrum reduzieren, die Photoschäden verringern und den Schwellenwert für die Lichtsättigung bei hohen Lichtintensitäten heraufsetzen. Die Verbesserung der RuBisCO hinsichtlich der Unterscheidung von CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> ist weiterhin ein erstrebenswertes Ziel, und zwar ganz besonders im Lichte der Entdeckung, dass die RuBisCO von Rotalgen CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> wesentlich besser unterscheiden kann als die von Pflanzen.

**D**ie Herstellung von Biowasserstoff – hierzu werden zurzeit Hydrogenasen an

### Wir sollten auf den Anbau von Pflanzen für die Herstellung von Biokraftstoffen verzichten

die reduzierende Seite des Photosystems I gekoppelt – wird nur dann mit Photovoltaikzellen und anschließender Wasserelektrolyse konkurrenzfähig, wenn man das wasserspaltende Photosystem II so verändert, dass es Wasserstoff produziert, entweder direkt oder durch Vermittlung eines intermediären Elektronenüberträgers mit geeignetem elektrochemischem Potential. Die Wasserstoffherzeugung durch das Photosystem II würde die Zahl an benötigten Photonen um mehr als 50 % reduzieren. Jedoch scheint die Erfolgswahrscheinlichkeit für diese Protein-Engineering-Aufgabe derzeit noch sehr gering.

**M**ikroalgen wurden und werden sehr für die Herstellung von Biokraftstoffen beworben. Es gibt viele unbelegte Behauptungen bezüglich ihrer Ausbeute; manche davon liegen oberhalb der theoretischen Effizienz der Photosynthese. Ich gestehe ein, dass Mikroalgen bezüglich der Effizienz der Lichtenergieumwandlung besser sein könnten als Landpflanzen, weil sie nur aus photosynthetisch aktiven Zellen bestehen und nicht an Wassermangel leiden. Jedoch werden die Vorteile durch die Existenz von Lichtsättigung und Photoschäden und das Vorliegen einer noch ineffizienteren RuBisCO limitiert. Zudem sind Anlagenbau und Ernte aufwendig.

### Visionen

**D**ie Verbesserung der Photosynthese, ein für die Sicherstellung einer ausreichenden Lebensmittelproduktion höchst erstrebenswertes Ziel, kann an der Überlegenheit der Kombination Photovoltaikzelle/elektrische Batterie/Elektromotor nichts ändern. Der Hauptnachteil dieser Kombination liegt in der begrenzten Speicherkapazität der heutigen elektrischen Batterien. Mit Befriedigung habe ich in dieser Zeitschrift über eine neuartige polymere Zinn-Schwefel-Lithiumionen-Batterie

mit der zehnfachen Speicherkapazität verglichen mit den derzeit verfügbaren Lithiumionen-Batterien gelesen.<sup>[1]</sup> Falls sich diese Batterien bis zur Marktreife entwickeln lassen, können leicht Elektrofahrzeuge gebaut werden, die dieselbe Reichweite haben wie die heutigen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Zugleich könnten diese Batterien zur großtechnischen Energiespeicherung genutzt werden. In einem ganz visionären Ausblick könnte man auf die Speicherung von elektrischer Energie verzichten, wenn es supraleitende Kabel geben würde. In diesem Fall würde eine geringe Zahl an Photovoltaikfeldern in verschiedenen Zeitzonen der Erde, etwa eine in Nordafrika und/oder in der Kalahari, eine in Ostasien/Australien und eine in Mexiko, verbunden durch diese Kabel und mit den Verbrauchern, kontinuierlich elektrische Energie liefern.

## Empfehlungen

**W**egen der geringen Photosyntheseeffizienz und der Konkurrenz mit der Nahrungsmittelerzeugung sollten wir auf den Anbau von Pflanzen für die Herstellung von Biokraftstoffen verzichten. Der Anbau von Energiepflanzen wird zweifelsohne zu einem Anstieg der Lebensmittelpreise führen, der hauptsächlich die ärmere Bevölkerung trifft. Die beste Nutzung von Biomasse liegt in der Erzeugung werthaltiger Bausteine für chemische Synthesen. Auch die Nutzung verfügbarer Biomasse für die Heizung oder zur Erzeugung elektrischer Energie in Kraftwerken und damit ebenfalls als Ersatz fossiler Brennstoffe ist ihrer Nutzung zur Biotreibstoffherzeugung vorzuziehen. Die eingesparten fossilen Brennstoffe stehen dann für Transportfahrzeuge zur Verfügung. Das Abholzen tropischer Regenwälder, um Ölpalmsplantagen anzulegen, ist extrem nachteilig, weil das organische Material des unter den

Regenwäldern liegenden Torfs mikrobiell oxidiert wird, sodass viel mehr CO<sub>2</sub> freigesetzt als durch die Ölpalmen fixiert wird. Die Regenwälder spielen eine wichtige Rolle für das Klima und sind eine wertvolle Ressource für neue biologisch aktive Substanzen, z.B. für die Arzneimittelentwicklung. Bezüglich der CO<sub>2</sub>-Bilanz ist es ohnehin viel besser, das für den Anbau von Energiepflanzen genutzte Land aufzuforsten, weil bei einer 1-proz. photosynthetischen Effizienz die wachsenden Bäume etwa 2.7 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>2</sup> fixieren, während die Biokraftstoffe mit einer Nettoeffizienz von 0.1 % lediglich fossile Kraftstoffe im „Gegenwert“ von 0.31 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>2</sup> ersetzen würden!!!

**D**ie Zukunft muss den Elektrofahrzeugen gehören!

---

[1] J. Hassoun, B. Scrosati, *Angew. Chem.* **2010**, 122, 2421–2424; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, 49, 2371–2374.