

# GRASOLIN

## an der Zapfsäule

Aus potenziellen Nahrungsmitteln wie Mais, Zuckerrohr oder Palmöl Benzin zu gewinnen ist problematisch. Doch inzwischen lassen sich auch Ernteabfälle, Holz und Gräser in Biokraftstoffe verwandeln.

Von George W. Huber und Bruce E. Dale

**D**ie letzten Jahre haben immer deutlicher gezeigt, dass der Westen seine Abhängigkeit vom Erdöl verringern muss. Sie schränkt den politischen Handlungsspielraum ein, belastet durch unkalkulierbare Preissprünge die Wirtschaft und schadet wegen der Emission von Treibhausgasen dem Klima. Doch unsere Gesellschaft ist weiterhin auf hohe Mobilität angewiesen. Neuartige Kraftstoffe sind also gefragt. Dieselöle auf Zellulosebasis, hergestellt aus nicht essbaren Pflanzenteilen, bieten die ökologisch attraktivste Alternative zum Petroleum. Außerdem ist ihre Produktion kurzfristig technisch realisierbar.

Biokraftstoffe lassen sich aus jeder Art von Pflanzengewebe herstellen. Bisher dienen essbare landwirtschaftliche Produkte als Ausgangsmaterial, in den USA hauptsächlich Mais und Sojabohnen, in Brasilien Zuckerrohr, in Südostasien Palmöl und in Europa Raps. Die Technologie zu ihrer Verwandlung in Treibstoff ist ausgereift; allein in den USA produzieren 180 Raffinerien Ethanol aus Mais.

Doch diese Biokraftstoffe der ersten Generation bieten keine langfristig überzeugende Lösung. So reicht das Ackerland nicht aus, um mehr als ein Zehntel des Treibstoffbedarfs der entwickelten Welt zu erzeugen. Auch verteuert die gestiegene Nachfrage das Tierfutter, was auf

den Preis mancher Lebensmittel durchschlägt. Zwar ist der Effekt geringer, als die jüngste Hysterie in den Medien glauben machte. Doch Anbau, Düngung, Ernte und Verarbeitung etwa von Mais sind mit Energieverbrauch verbunden. Stellt man die entsprechenden Kohlendioxidemissionen in Rechnung, dann sieht die Umweltbilanz keineswegs mehr so günstig aus, wie man sich das wünschen würde.

Biokraftstoffe der zweiten Generation aus Zellulose, die man mit einem Wortspiel Grasolin nennen könnte, vermeiden diese Nachteile. Er lässt sich aus Dutzenden, wenn nicht Hunderten von Quellen erzeugen: angefangen bei Holzresten wie Sägemehl über Ernteabfälle wie Maishalme oder Weizenstroh bis hin zu Energiepflanzen, also raschwüchsigen Gräsern oder Hölzern, die speziell zur Umwandlung in Kraftstoffe angebaut werden (siehe Kasten auf S. 92). Mit 10 bis 40 Dollar (7 bis 28 Euro) pro Fass (159 Liter) Biodiesel ist das ein billiger Rohstoff, der überall anfällt und die Erzeugung von Lebensmitteln nicht tangiert. So gedeihen die meisten Energiepflanzen auch auf schlechten Böden, die sich als Ackerland sonst kaum eignen. Einige wie durch häufiges Schneiden gestrüppartig gehaltene Weiden dekontaminieren zudem mit Abwässern oder Schwermetallen verschmutzte Böden.

Jährlich erzeugen Pflanzen rund eine Billion Tonnen Zellulose. Riesige Mengen davon stehen also für die nachhaltige Produktion

### In Kürze

► **Biokraftstoffe der zweiten Generation** aus nicht essbaren Pflanzenteilen bilden kurzfristig die umweltfreundlichste und technologisch aussichtsreichste **Alternative zu Mineralöl**.

► Ausgangsmaterial für dieses »Grasolin« werden überwiegend **Ernteabfälle** wie Maisstängel, unkrautartig wachsende Energiepflanzen und Restholz sein.

► Vorsichtigen Schätzungen zufolge könnte die gewinnbare **zellulosehaltige Biomasse** weltweit mehr als genug Kraftstoff liefern, um den globalen Bedarf komplett zu decken.



GETTY IMAGES / UPPERCUT IMAGES

## Aus zellulosehaltiger Biomasse lässt sich jede Art von Kraftstoff herstellen

von Kraftstoffen zur Verfügung. Laut einer Studie der US-Ministerien für Landwirtschaft und Energie lassen sich allein in den Vereinigten Staaten 1,3 Milliarden Tonnen getrocknete, aus Zellulose bestehende Biomasse jährlich gewinnen, ohne die Erzeugung von Nahrungsmitteln, Tierfutter oder agrarischen Exportgütern zu schmälern. Daraus ließen sich fast 400 Milliarden Liter Kraftstoff gewinnen – etwa die Hälfte des derzeitigen Verbrauchs von Benzin und Diesel in den USA. Nach ähnlichen Schätzungen entspricht die gewinnbare zellulosehaltige Biomasse weltweit 34 bis 160 Milliarden Fass Mineralöl pro Jahr, was den momentanen Jahresverbrauch von 30 Milliarden Fass deutlich übersteigt. Aus dem Pflanzenmaterial lässt sich jede Art von Kraftstoff herstellen: Ethanol, Benzin, Diesel und Kerosin.

Maiskörner zu vergären ist zwar immer noch bedeutend leichter als die Verarbeitung harter, zellulosehaltiger Stängel, doch wurden letzthin große Fortschritte erzielt. Mit quantenchemischen Rechenmodellen können For-

scher heute am Computer Katalysatoren entwerfen, die Reaktionen gezielt beschleunigen. Ein wichtiger Gesichtspunkt dabei ist, dass sich die im Labor entwickelten Umwandlungsprozesse für das rasche Hochskalieren in den Raffinerie-Maßstab eignen. Obwohl das Forschungsgebiet noch jung ist, laufen schon etliche Demonstrationsanlagen, und die ersten kommerziellen Raffinerien sollen 2011 in Betrieb gehen. Das Zeitalter des Grasolins scheint also nicht mehr fern.

### Das energetische Schloss

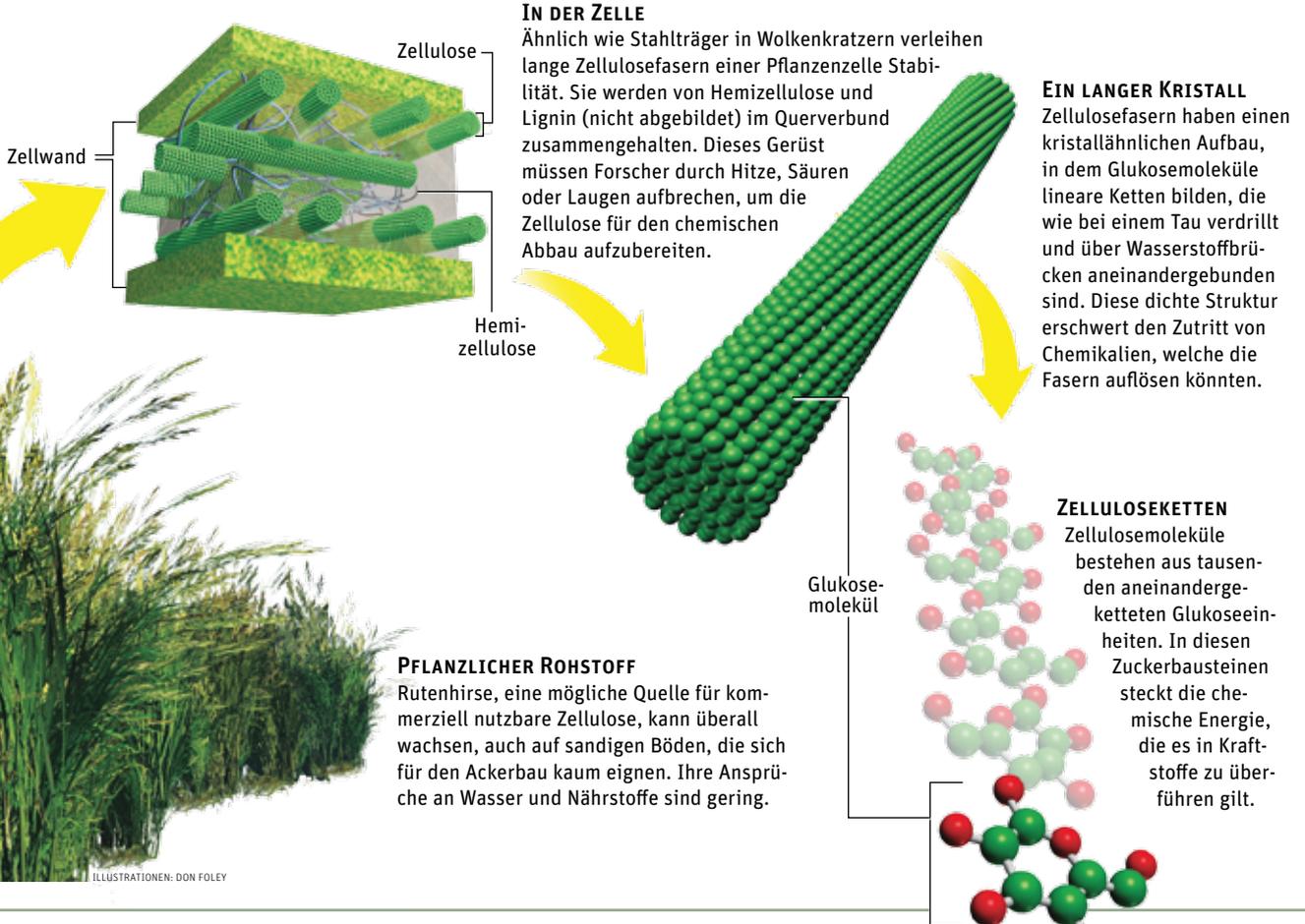
Die Natur benutzt Zellulose, um einer Pflanze Festigkeit zu verleihen. Die Einzelmoleküle werden dabei zu einem starren Gerüst verschränkt, das senkrecht aufragende Strukturen stützt und dem biologischen Abbau Widerstand leistet (Kasten unten). Um die enthaltene Energie freizusetzen, gilt es, zunächst dieses molekulare Geflecht zu entwirren.

Zellulose lässt sich also nicht direkt in Kraftstoffe umwandeln, sondern muss vorher

## DER AUFBAU DES ZELULOSEGERÜSTES

**In der Natur ermöglicht Zellulose** das senkrechte Wachstum der Pflanzen. Sie bildet starre und chemisch schwer abbaubare

Strukturen. Das gibt Halmen, Stängeln und Stämmen Festigkeit, behindert jedoch ihre Umwandlung in Biokraftstoff.



in kleinere Moleküle aufgespalten werden. Das kann bei verschiedenen Temperaturen geschehen. Bei 50 bis 200 Grad Celsius bilden sich diverse Zuckersorten, die sich ähnlich wie Mais oder Zuckerpflanzen zu Ethanol oder anderen Kraftstoffen vergären lassen. Der Abbau bei 400 bis 600 Grad Celsius liefert ein Bio-Öl, das zu Benzin oder Diesel raffiniert werden kann. Bei Temperaturen über 700 Grad Celsius fällt ein Gasmisch an, aus dem sich Flüssigkraftstoffe herstellen lassen.

Bisher ist unklar, welche Methode die in den Pflanzen steckende Energie am vollständigsten und kostengünstigsten nutzt. Möglicherweise kommt es auf die Biomassequelle an. Die Zersetzung bei großer Hitze könnte für Holz am geeignetsten sein, die bei niedrigeren Temperaturen dagegen für Gräser.

Die Hochtemperatur-Vergasung von Pflanzenmaterial ist der technisch ausgereifteste Weg zur Herstellung von Biokraftstoff. Sie eignet sich für alle organischen Substanzen und liefert ein Gemisch aus Kohlenmonoxid

und Wasserstoff, das als Wasser- oder Synthesegas bezeichnet wird. Es lässt sich je nach Bedarf in Diesel, Benzin oder Ethanol umwandeln. Das geschieht gewöhnlich durch Fischer-Tropsch-Synthese (FTS), ein Verfahren, das deutsche Wissenschaftler in den 1920er Jahren entwickelt haben. Im Dritten Reich diente es während des Kriegs zur Herstellung von Flüssigkraftstoffen aus heimischer Kohle. Die meisten großen Mineralölgesellschaften sind technisch im Stande, bei explodierenden Ölpreisen auf die Wassergas-Konversion auszuweichen.

### Hochtemperatur-Vergasung

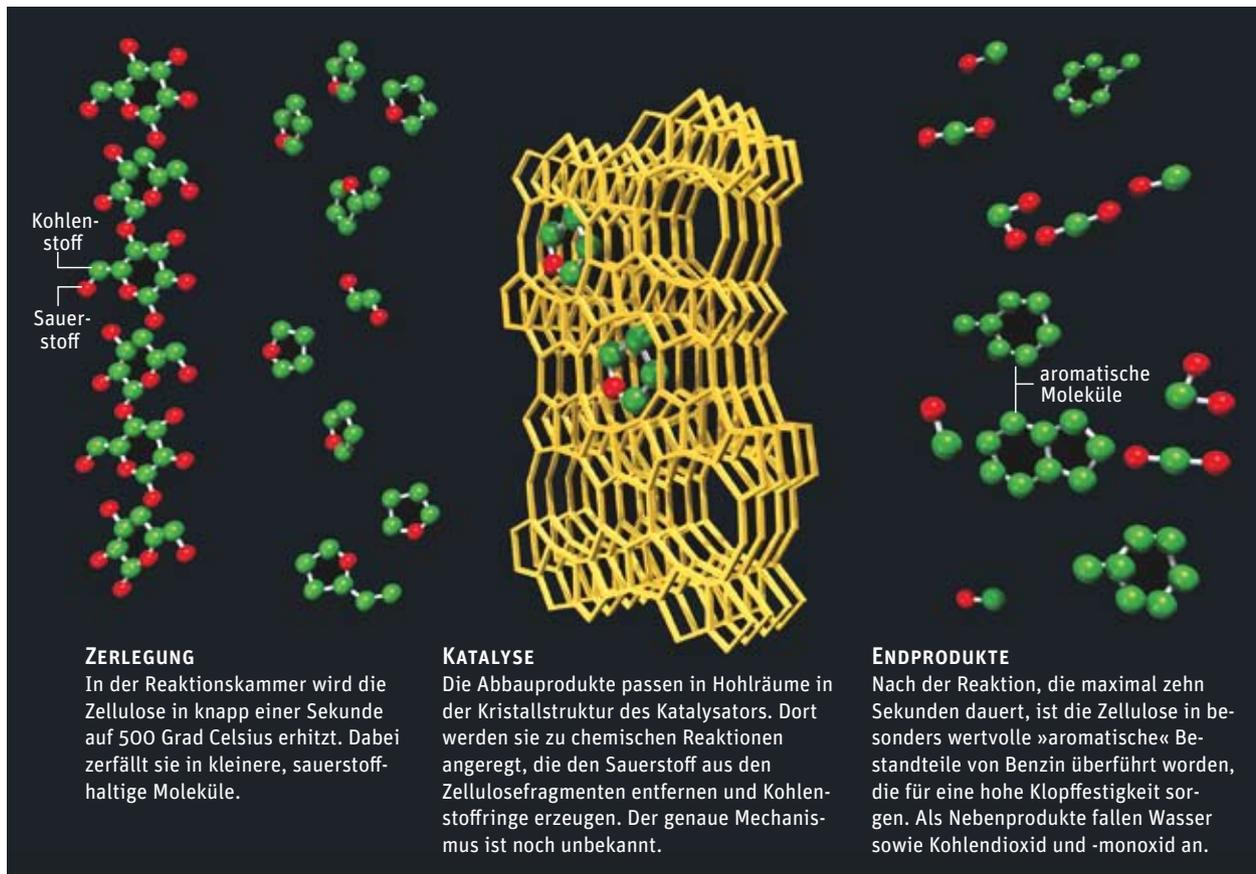
Im ersten Schritt wird das Ausgangsmaterial dabei in einem Reaktor auf über 700 Grad Celsius erhitzt. Durch wechselweise Zufuhr von Sauerstoff und Wasserdampf entsteht dann im Fall von Biomasse ein Gemisch aus Kohlenmonoxid, Wasserstoff und teerartigen Substanzen, die es zunächst abzutrennen gilt. Das Gas wird schließlich auf einen Druck von zwei bis sieben Megapascal (20 bis 70 Atmo-

Zur Verwandlung in Kraftstoff muss **Zellulose** zunächst in kleine Moleküle zerlegt werden

## VON DER ZELLULOSE ZUM TREIBSTOFF IN ZEHN SEKUNDEN

**Benzin besteht aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen** (nicht dargestellt), während Zellulose zusätzlich Sauerstoff enthält. Diesen muss man also entfernen, um Biokraftstoff (»Grasolin«)

aus den Stützstrukturen von Pflanzen zu erzeugen. Bei der hier gezeigten katalytischen Schnellpyrolyse geschieht das sehr effizient und schnell in einem Schritt.



## ZELLOSEHALTIGE ROHSTOFFE

**Zellulosehaltiges Material** zur Umwandlung in Biokraftstoffe kann aus vielen Quellen stammen. Hier sind die drei bedeutendsten aufgeführt.



GETTY IMAGES / AURORA / PETER ESSICK

### FORSTPRODUKTE

Beim Einschlag von Bäumen sowie bei der Verarbeitung der Stämme in Sägewerken und in der Möbel- oder Papierindustrie fallen bisher nicht verwertete Holzreste an. Auch das regelmäßige Auslichten von Wäldern durch Entfernen von Niederwuchs liefert zellulosehaltiges Pflanzenmaterial.



GETTY IMAGES / FIRST LIGHT / VAST PHOTOGRAPHY

### ERNTEABFÄLLE

Nicht essbare Stängel, Halme, Strünke und Blätter machen etwa die Hälfte der Erntemenge aus. Einige dieser Abfälle müssen zur Regeneration des Bodens auf dem Acker verbleiben, doch die meisten verrotten derzeit ungenutzt.

### ENERGIEPFLANZEN

Sie wachsen schnell und stellen geringe Ansprüche an Bodenqualität, Düngung und Bewässerung. Beispiele sind Rutenhirse (Bild), Sudangras, Chinaschilf und eine auf hohen Biomasseanteil gezüchtete Zuckerrohrsorte (*energycane*). Manche Energiepflanzen wie etwa durch häufiges Schneiden gestrüppartig gehaltene Weiden gedeihen auch auf Böden, die mit Abwasser oder Schwermetallen verseucht sind, und entgiften sie dabei sogar.



GETTY IMAGES / WALTY EBENHART

**Termiten sind natürliche Biokraftstoff-Fabriken. Mikroben in ihrem Darm bauen Zellulose zu Zucker ab. Bio-Ingenieure versuchen, diesen Vorgang auf industrieller Ebene nachzuahmen.**

sphären) verdichtet und über einen Spezialkatalysator geleitet: einen Festkörper, der die Gasmoleküle an seiner Oberfläche anlagert und sie dazu bringt, bestimmte chemische Reaktionen einzugehen. Solche Katalysatoren wurden von der Petrochemie hauptsächlich dafür entwickelt, Erdgas in flüssige Treibstoffe

umzuwandeln. Doch funktionieren sie genauso gut mit Wassergas aus Kohle oder Biomasse.

Ein großer Nachteil dieser Technologie ist der hohe Preis der Reaktoren. Eine FTS-Anlage, die im Jahr 2006 in Qatar für die Umwandlung von Erdgas in 34000 Fass Flüssigtreibstoff gebaut wurde, kostete 1,6 Milliarden Dollar. Wäre ein Konverter für Biomasse genauso teuer, müsste er 5000 Tonnen davon täglich über 15 bis 30 Jahre verarbeiten, um sich zu amortisieren. So viel Pflanzenmaterial an einen Ort zu schaffen, würde bedeutende logistische und wirtschaftliche Probleme aufwerfen. Hauptforschungsziel ist deshalb, die Kapitalkosten der Wassergas-Technologie zu senken.

### Billiges Bio-Öl

Für Äonen waren Zooplankton und Algen aus dem Kambrium im Erdinnern hohem Druck und großer Hitze ausgesetzt. So verwandelten sich ihre Ablagerungen in die heutigen Mineralölfelder. In ähnlicher Weise lässt sich auch in sehr viel kürzerer Zeit zellulosehaltiges Pflanzenmaterial in ein Bio-Rohöl überführen. Dazu erhitzt man es in einer Raffinerie unter Ausschluss von Sauerstoff auf 300 bis 600 Grad Celsius. Bei einer solchen Pyrolyse zersetzt sich die Zellulose in gasförmige Produkte, einen holzkohleartigen Feststoff und das Bio-Öl. Dieses ist mit etwa einem halben



PHOTO RESEARCHERS / EYE OF SCIENCE

## ETHANOLGEWINNUNG AUS ZELLULOSE MIT AMMONIAK

**Es gibt viele Möglichkeiten zur Vorbehandlung** von Pflanzenfasern, um die enthaltene Zellulose aufzuschließen. Meist werden Säuren und hohe Temperaturen eingesetzt. Eine einmalige

Kombination aus niedrigem Energiebedarf, geringen Kosten und hohem Wirkungsgrad bietet das AFEX-Verfahren (*ammonia fiber expansion*), das mit Ammoniak arbeitet.



Dollar pro Gallone (knapp 0,1 Euro pro Liter) Benzinäquivalent (die Kosten für die Rohbiomasse nicht gerechnet) der billigste flüssige Biokraftstoff.

Das Verfahren eignet sich auch für relativ kleine Betriebe nahe den Erntegebieten, was die Transportkosten für das Pflanzenmaterial senkt. Allerdings ist das so erzeugte Bio-Rohöl sehr teuer, nicht mit Treibstoff auf Petroleumbasis mischbar und nur halb so energiereich wie Benzin. Es verbrennt zwar in einem Dieselmotor, ruiniert ihn aber binnen Kurzem.

Raffinerien könnten das Bio-Rohöl jedoch in nützlichen Treibstoff verwandeln, und viele Unternehmen suchen nach Möglichkeiten, ihre Anlagen für diesen Zweck einzusetzen. Einige erzeugen schon eine andere Art von »grünem« Dieseltreibstoff, was nahelegt, dass Raffinerien durchaus Bio-Rohöl auf Zellulosebasis verarbeiten könnten. Diese Firmen beschicken ihre Reaktoren mit einem Gemisch aus Pflanzenöl, Tierfetten und Petroleum. So hat Conoco-Phillips in Borger (Texas) kürzlich in einer Demonstrationsanlage aus Rinderfett von einem nahe gelegenen Schlachthaus der Firma Tyson Foods 45 000 Liter Biodiesel am Tag produziert. Im April dieses Jahres fuhr auch das Unternehmen High Plains Bioenergy in Guymon (Oklahoma) eine Bioraffinerie an, die sich neben einem Schweineverarbei-

tungsbetrieb befindet und Schweinefett zusammen mit Pflanzenöl zu Kraftstoff verarbeitet. Die Anlage soll mehr als 100 Millionen Liter Biodiesel im Jahr produzieren.

Forscher suchen zudem nach Wegen, den Zweistufenprozess – die Umwandlung der festen Biomasse in Öl und dessen anschließende Raffination zu Treibstoff – in einem einzigen Reaktor durchzuführen. Einer von uns (Huber) verfolgt mit seiner Gruppe den Ansatz der katalytischen Schnell-Pyrolyse (Kasten auf S. 91). Dabei wird die Biomasse nach dem Eintritt in den Reaktor binnen einer Sekunde auf 500 Grad Celsius erhitzt. Das lässt die langen Glukoseketten in kleinere Moleküle zerbrechen, die von ihrer Form und Größe her perfekt in die Hohlräume des Katalysators passen – ähnlich wie Eier in einen Eierkarton. Dort verwandeln sie sich über eine Serie von Reaktionen in Benzin – und zwar speziell in dessen hochwertige »aromatische« Komponenten, welche die Oktanzahl erhöhen, so dass sich das Luft-Benzin-Gemisch im Zylinder höher verdichten lässt, ohne vorzeitig zu zünden, was den Wirkungsgrad steigert. Der gesamte Vorgang dauert nur zehn Sekunden. Die neu gegründete Firma Anellotech arbeitet daran, das Verfahren vom Labor auf eine Großanlage zu übertragen. Bis 2014 soll der erste kommerzielle Reaktor in Betrieb sein.

**Bio-Öl ist mit einem Preis von 0,1 Euro pro Liter der billigste flüssige Biokraftstoff**

NEIN, ES IST KEINE SO GUTE IDEE,  
AUS DEINEM GEMÜSE GLEICH  
BIODIESEL ZU MACHEN!



Die meisten öffentlichen und privaten Mittel sind bisher in den

Aufschluss der Zellulose bei Temperaturen unter 200 Grad Celsius geflossen. Dabei werden die Zuckermoleküle aus ihrem Verband gelöst und zu Ethanol oder anderen Biokraftstoffen vergoren. Man kann sich Dutzende verschiedener Wege vorstellen, um die gegen Verdauung resistente Zellulose sowie die Hemizellulose, welche die Zellulosefasern zusammen mit Lignin zu verschränkten Gerüststrukturen verschnürt, in ihre Zuckerbausteine aufzuspalten. So haben Forscher die Biomasse zu einem feinen Brei zermahlen, mit Gammastrahlen behandelt, hoch erhitztem Dampf ausgesetzt, mit konzentrierten Säuren oder Laugen übergossen oder in Lösungsmitteln eingeweicht. Sie haben sogar Mikroben durch Genmanipulation die Fähigkeit verliehen, Zellulose zu fressen und abzubauen.

### Kochen mit Ammoniak

Leider taugen viele Methoden, die im Labor gut funktionieren, nicht für kommerzielle Verfahren. Geeignet sind sie nur dann, wenn sie leicht fermentierbare Zucker in hoher Ausbeute und Konzentration liefern und keine allzu teuren Investitionen erfordern. Ferner sollten sie ohne giftige Substanzen auskommen und möglichst wenig Energie verbrauchen. Schließlich müsste das erzeugte Grasolin preislich mit konventionellem Benzin konkurrieren können.

Am aussichtsreichsten scheint die Behandlung der Biomasse mit starken Säuren oder Laugen bei relativ hohen Temperaturen. Einer von uns (Dale) hat in seinem Labor ein Verfahren namens *ammonia fiber expansion* (AFEX) entwickelt (Kasten S. 93). Dabei lässt man basisches Ammoniakgas bei 100 Grad Celsius unter hohem Druck mehrere Minuten bis eine Stunde lang auf die zellulosehaltige Biomasse einwirken und dann über ein Ventil schlagartig entweichen. Nach dieser Vorbehandlung wandeln Enzyme wie Zellulase und Xylase das Pflanzenmaterial zu mehr als 90 Prozent in Zucker um. Zu der hohen Ausbeute trägt bei, dass die Methode den Abbau der Glukosemoleküle vermeidet, der bei sauren Reaktionsbedingungen oder sehr großer Hitze auftritt.

Wie eine kürzlich durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse ergab, sollte AFEX auch sehr preiswert sein. Wenn die Tonne Biomasse einschließlich Transport zur Fabrik 50 Dollar (35 Euro) kostet und ein weiterentwickelter Fermentationsprozess namens *consolidated bioprocessing*, der die Vergärung des Zuckers einschließt, zum Einsatz kommt, lässt sich da-

mit Bioethanol mit dem Energiegehalt einer Gallone (3,785 Liter) Benzin für etwa einen Dollar erzeugen. An der Zapfsäule sollte es höchstens zwei Dollar kosten (was 0,38 Euro pro Liter entspricht). Damit wäre es selbst in den USA billiger als Benzin, für das man dort derzeit rund 2,6 Dollar pro Gallone (0,5 Euro pro Liter) zahlen muss.

### Der Preis des Wandels

Natürlich werden letztlich die Kosten darüber entscheiden, wie schnell sich Biokraftstoff aus Zellulose durchsetzt. Sein Hauptkonkurrent bleibt das Erdöl. Dessen Raffination profitiert von einem Jahrhundert zielgerichteter Forschungen. Außerdem haben sich die Anlagen längst amortisiert. Raffinerien für Biokraftstoff benötigen dagegen Investitionen von hunderten Millionen Dollar, die über die Jahre in den Treibstoffpreis eingehen müssen.

Auf der anderen Seite hat Grasolin mehrere Vorteile gegenüber Kraftstoffen aus Erdöl oder verwandten Quellen wie Ölsanden und verflüssigter Kohle. Zunächst sind die Ausgangsstoffe viel billiger, was niedrige Betriebskosten nach dem Bau der Anlagen verspricht. Außerdem wird Grasolin im eigenen Land produziert und führt damit nicht zu politischen Abhängigkeiten. Schließlich ist es weit aus umweltfreundlicher als irgendeine Alternative auf der Basis fossiler Energieträger.

Neue Untersuchungsmethoden und computergestützte Simulationsverfahren erlauben es, die Raffinerieverfahren für Biokraftstoff in einem Tempo zu verbessern, von dem Petrochemiker noch vor einem Jahrzehnt nur träumen konnten. Wir gewinnen immer schneller immer mehr Erkenntnisse über die Eigenschaften des pflanzlichen Rohmaterials und über die optimale Art, es zu Treibstoff zu verarbeiten. In den USA fördert die neue Regierung die Entwicklung inzwischen mit staatlichen Mitteln. Nach einem von Präsident Barack Obama jüngst unterzeichneten Gesetz fließen 800 Millionen Dollar in das *Biomass Program* des US-Energieministeriums, das die Forschung und Entwicklung von Biotreibstoffen sowie kommerzielle Bioraffinerie-Projekte unterstützt. Außerdem sind sechs Millionen Dollar an Bürgschaften für alle neuen Anlagen vorgesehen, mit deren Bau bis Oktober 2011 begonnen wurde.

In den kommenden fünf bis 15 Jahren dürfte die Technologie zur Verflüssigung von Biomasse den Schritt vom Labor zur großtechnischen Anlage schaffen. Zugleich sollte die Zahl der Fahrzeuge, die Kraftstoff aus Zellulose nutzen, dramatisch steigen. Dieser Wandel wird die Welt verändern, und er ist längst überfällig. ◀



**George W. Huber** (links) ist Professor für Verfahrenstechnik an der University of Massachusetts in Amherst. Er hat das Unternehmen Anellotech gegründet und berät gelegentlich verschiedene Öl- und Biokraftstoffunternehmen.

**Bruce E. Dale** ist Professor für Verfahrenstechnik an der Michigan State University in East Lansing und einer der Direktoren des Great Lake Bioenergy Research Center ([greatlakesbioenergy.org](http://greatlakesbioenergy.org)). Auch er betätigt sich ab und an als Berater für Biokraftstoffunternehmen.

**Brändle, M. et al.:** Biokraftstoffe der Zukunft: Strategien für eine nachhaltige Mobilität. Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn 2006.

**Romanko, R.:** Biokraftstoffe als Ersatz fossiler Energieträger: eine umwelt- und ressourcenökonomische Analyse. Grin, München 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002944](http://www.spektrum.de/artikel/1002944).