

Vom Abfall zum Kraftstoff

Neuer Hefetyp synthetisiert Biosprit aus Pflanzenabfällen

Sie können zwar nicht Stroh zu Gold spinnen, aber sie machen aus wertlosen pflanzlichen Abfällen hochwertigen Biokraftstoff: Die vielseitigen Hefezellen aus dem Labor unserer Frankfurter Arbeitsgruppe sind wahre Allesfresser. Während herkömmliche Hefe nur bestimmte Zuckerarten zu Ethanol vergären kann, zerlegt der hochgezüchtete Frankfurter Hefestamm auch schwer verdauliche Zucker, die in Weizenstroh, Maisresten, Holzabfällen oder Sägespänen enthalten sind. Damit eröffnen sich der Produktion von nachwachsenden, umweltfreundlichen Biotreibstoffen völlig neue Perspektiven. War man bisher darauf angewiesen, hochwertige Nutzpflanzen wie Zuckerrohr, Mais, Getreide oder Zuckerrüben zur Gewinnung von Biokraftstoffen anzubauen, lassen sich nun auch billige und massenhaft anfallende Pflanzenabfälle nutzen. Möglich ist dies durch gentechnisch veränderte Hefen. Dank zusätzlicher Gene können sie Enzyme produzieren, die es ihnen erlauben, schwer verdauliche Zuckerarten in Ethanol zu vergären.

In einer Zeit immer knapper werdender fossiler Erdölressourcen und steigender Benzinpreise wird Bioethanol zu einer wichtigen alternativen Energiequelle. Auch die Umwelt profitiert von Biokraftstoffen wie Biodiesel, Pflanzenöl und Ethanol: Pflanzen wachsen prak-

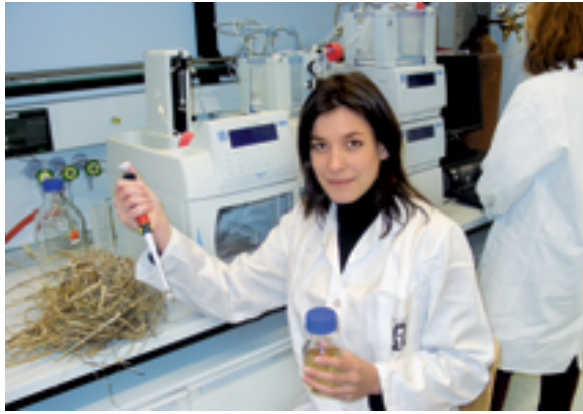
tisch unbegrenzt nach und verbrennen »sauber«, das heißt, es wird nur solches Kohlendioxid freigesetzt, das zuvor beim Pflanzenwachstum gebunden wurde. Auf diese Weise verhindert Biosprit eine weitere Verstärkung des Treibhauseffekts. Während Pflanzenöl und Biodiesel für Dieselmotoren geeignet sind, kann Bioethanol Benzin und Superkraftstoffe ersetzen. Bioethanol ist hinter Biodiesel zurzeit der am meisten genutzte biologisch hergestellte Autokraftstoff. Zulässig ist eine fünfprozentige Beimischung zu Ottokraftstoffen. Mittelfristig soll dieser Anteil steigen. So legt der Aktionsplan der Europäischen Union fest, den Anteil Biokraftstoff am gesamten Kraftstoffverbrauch bis zum Jahr 2010 auf 5,75 Prozent zu erhöhen. Als Technik der Zukunft gelten allerdings die so genannten Flexible-Fuels-Vehicles (FFV) – Fahrzeuge, die sowohl mit reinem Benzin fahren als auch mit einer Benzin-Ethanol-Mischung, die bis zu 85 Prozent Ethanol (E 85) enthalten kann. Die Fahrzeuge müssen dabei nur minimal modifiziert werden.

Bioethanol wird durch mikrobiologische Vergärung von Zuckern hergestellt, die in pflanzlichen Rohstoffen enthalten sind. Man gewinnt es heute weitgehend aus speziell dafür angebauten stärke- oder zuckerhaltigen Nutzpflanzen wie Zuckerrohr, Mais, Getreide oder Zu-

ckerrüben. Zur Vergärung verwendet man Hefen, die Zucker in Ethanol und CO₂ umsetzen können. Bei stärkehaltigen Rohstoffen sind vor der eigentlichen alkoholischen Gärung noch vorbereitende Schritte notwendig: So muss die Stärke durch spezielle Enzyme verflüssigt und anschließend verzuckert werden. Dieses Verfahren ist zwar ausreichend, um den derzeitigen Bedarf an Bioethanol zu decken. Langfristig wird es den steigenden Bedarf an Bioethanol aber nicht decken können, weil es zahlreiche Probleme aufwirft. Die nur begrenzt zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Anbauflächen, ökologische Probleme bei der notwendigen Intensivierung der Landwirtschaft



1 Beate Wiedemann und Marco Keller vom Institut für Molekulare Biowissenschaften der Universität Frankfurt arbeiten an der Optimierung von Hefen, um aus Stroh und anderen Pflanzenabfällen Ethanol als regenerative und umweltfreundliche Energiequelle herstellen zu können.



und die Konkurrenz zum Lebensmittelmarkt stehen einer großflächigen Produktion von Bioethanol auf diesem herkömmlichen Wege entgegen.

Eine kostengünstige und umweltschonende Alternative wäre, die für den Menschen als Nutzpflanzen weniger interessanten Pflanzen oder Pflanzenabfälle zu nutzen. Diese hauptsächlich aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin bestehenden Materialien fallen in hohen Mengen an und sind billig. Ideal wäre dabei ein Verfahren, in dem in so genannten Bioraffinerien die Zellulose und Hemizellulose in vergärbare Zucker umgewandelt und von den Hefen direkt in Ethanol

vergoren werden. Das Lignin könnte als Brennstoff zum Antreiben des Prozesses benutzt werden. Allerdings verhindern zurzeit noch einige technische Schwierigkeiten den Einsatz dieses Verfahrens. Zum einen ist der Abbau von Zellulose und Hemizellulose zu vergärbaren Zuckern schwieriger und langsamer als bei Stärke, weil diese Verbindungen eine komplexere Struktur besitzen. Zum anderen setzt die Hemizellulose Zuckerarten frei, die von den meisten zur Ethanolproduktion verwendeten Mikroorganismen nicht vergoren werden können. Für einen wirtschaftlich ausgereiften Prozess ist dies jedoch eine wichtige Voraussetzung.

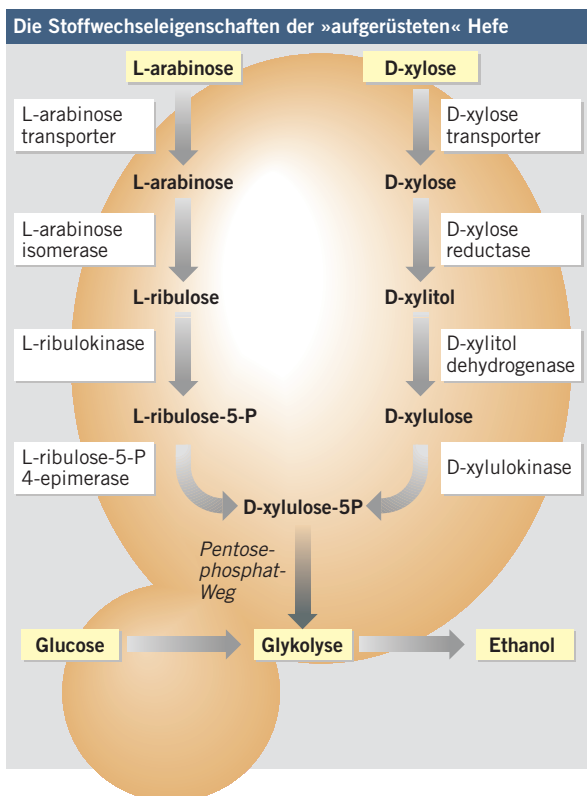
zur Produktion von biobasierten Chemikalien nutzbar zu machen. Wir bedienen uns dabei des »Metabolic Engineering«, einer Methode, mit der man gezielte und zweckgerichtete gentechnische Veränderungen von Organismen erzielen kann, so dass sie bestimmte Produkte oder Biochemikalien produzieren. Im Falle der Hefe suchte unsere Arbeitsgruppe nach Möglichkeiten, die Hefe dazu zu bringen, auch die Pentosen Arabinose und Xylose zu vergären. Dazu suchten wir in Bakterien und Pilzen nach Genen, die dafür verantwortlich sind, dass sich Enzyme für den Abbau von Arabinose und Xylose bilden.

Diese Suche ist knifflig: Zwar gibt es eine Reihe von Lebewesen, die Pentosen nutzen und umwandeln können, aber leider nicht in Ethanol. Will man dieses Problem lösen, muss man erreichen, dass die Hefezellen Pentosen in ihre Stoffwechselwege – den so genannten Pentosephosphat-Weg und die Glykolyse – einschleusen. Im Falle der Arabinose sind dazu drei zusätzliche Enzyme notwendig sowie ein Transportprotein, das die Arabinose in die Zelle hineintransportiert. Für die Xylose benötigt man drei weitere Enzyme. Wir gewannen diese Enzyme, indem wir aus Bakterien und Pilzen, die Arabinose und Xylose abbauen, Gene isolierten. Die Steuerungselemente dieser Gene wie Promotor- und Terminatorsequenzen wurden dann so verändert, dass die Hefe daraus die entsprechenden Enzyme bilden konnte. Dann wurden sie in das Erbgut der Hefezellen eingebaut.

Zunächst sollte die Hefe dazu gebracht werden, Arabinose als Kohlenstoff- und Energiequelle zum Wachstum zu verwerten. Aber obwohl die Hefezellen alle dafür benötigten Enzyme erhalten hatten,

Ein für die Produktion von Ethanol seit Jahrtausenden genutzter Mikroorganismus ist die Bier- und Weinhefe mit dem wissenschaftlichen Namen *Saccharomyces cerevisiae*. Sie ist in der Lage, Zucker rasch und mit hohen Ausbeuten zu Ethanol zu vergären. Allerdings kann auch sie dabei nicht alle Zucker umsetzen – während Zucker mit sechs Kohlenstoffatomen (die so genannten Hexosen wie zum Beispiel Glucose) genutzt werden können, besitzen die Hefezellen nicht die notwendigen Enzyme für die Verwertung von Zuckern mit fünf Kohlenstoffatomen (den Pentosen wie zum Beispiel Arabinose und Xylose). Diese Pentosen machen jedoch einen großen Anteil der Hemizellulose aus.

Da die Hefe schon seit einigen Jahrzehnten intensiv erforscht wird und genetisch leicht veränderbar ist, lag es für unsere Arbeitsgruppe nahe, der Hefe auf gentechnischem Wege neue Eigenschaften zu verleihen. Seit vielen Jahren arbeiten wir bereits daran, die Stoffwechseleigenschaften der Hefe besser zu verstehen und wir für den Menschen



2 Die Hefe *Saccharomyces cerevisiae* wurde mit zahlreichen neuen Enzymen ausgestattet, um außer der Glucose auch die anderen in Pflanzenabfällen vorhandenen Zuckerarten Arabinose und Xylose zu Ethanol zu vergären.

bereitete ihnen die Umstellung ihres Speisezettels Schwierigkeiten. Genauere Untersuchungen ergaben, dass sich die Hefen an der Arabinose gewissermaßen »verschluckten«, das heißt, sie nahmen den Zucker schneller auf, als sie ihn verwerten konnten. Deshalb mussten die verantwortlichen Enzyme zunächst genetisch weiter optimiert werden. Das geschah mit Hilfe der so genannten »Directed Evolution« (also gesteuerten Evolution). Wir zwangen die neue Hefe über viele Wochen und Monate dazu, Arabinose zu verwerten, indem wir ihr diesen Zucker als einziges Nahrungsmittel anboten. Und tatsächlich bildeten sich spontane Hefemutanten, die immer besser mit der Arabinose zurechtkamen. Diese waren letztendlich in der Lage, die Arabinose in Ethanol zu vergären.

Damit die neuen Hefezellen zusätzlich die Fähigkeit erlangten, Xylose zu vergären, startete unsere Arbeitsgruppe eine Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Bärbel Hahn-Hägerdal von der Universität Lund, Schweden. Diese arbeitet schon seit vielen Jahren erfolgreich an der Vergärung von Xylose durch Hefen. Den Arabinose-vergärenden Hefezellen wurden zusätzlich die drei Gene zur Xyloseverwertung eingepflanzt. Und tatsächlich konnte der daraus resultierende Hefestamm neben den Hexosen wie Glucose auch Arabinose und Xylose in Ethanol umwandeln. Das Ergebnis war ein hochgezüchteter und spezialisierter Hefestamm, der als »Allesfresser« die meisten Zuckerarten aus pflanzlichen Abfällen zu Ethanol vergären kann.

Nach diesem beachtlichen Erfolg stehen die nächsten Herausforderungen auf dem Weg zur industriellen Produktion von Bioethanol bevor. Zunächst müssen die fremden Gene in der Hefe stabilisiert werden. Dann will unsere Gruppe die Zuckerverwertung noch effizienter gestalten. Um die Kosten des gesamten Prozesses zu senken, müssen wir den Wirkungsgrad der Ethanolbildung weiter steigern. Und letztendlich gilt es, den im Labormaßstab funktionierenden Prozess in die industrielle Wirklichkeit zu transferieren. Dazu muss geklärt werden, ob die hochgezüchteten Laborhefen unter den »rauen« Bedingungen in der Industrie wider-

standsfähig genug sind. Möglicherweise eignen sich industriell erprobte Hefen besser für die Ethanolgewinnung.

Auch andere Fragen im Umfeld der Biomasse-zu-Ethanol-Umwandlung sind noch zu klären. So müssen beispielsweise die Biomasse-severarbeiter wirtschaftliche Wege finden, die Biomasse zu sammeln, zu transportieren und zu lagern. Eine effektive und schonende Vorbehandlung der Biomasse mit Wärme oder Säure sowie die Entwicklung leistungsfähigerer Enzyme, mit denen das Pflanzenmaterial in die

einzelnen Zuckerbausteine zerlegt werden kann, sind weitere wichtige Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte. Daran arbeitet seit Oktober 2005 ein von der Europäischen Union gefördertes Konsortium von 21 Partnern aus Industrie und Forschung, zu dem auch unsere Arbeitsgruppe gehört. Das europaweite Projekt mit dem Namen NILE (New Improvements for Lignocellulosic Ethanol) ist auf vier Jahre angelegt und wird mit 7,7 Millionen Euro aus dem 6. Europäischen Rahmenprogramm gefördert. Die Partner decken den gesamten

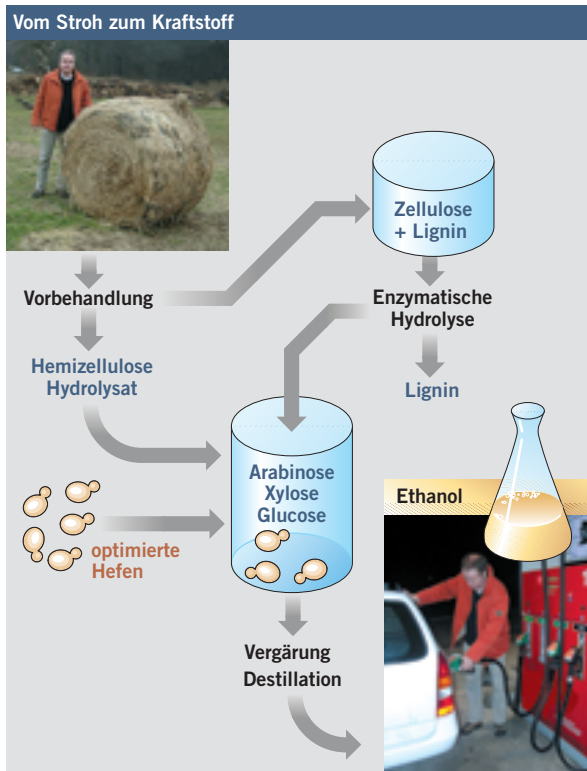
Anzeige

degussa.

creating essentials

F&E sind für uns
das A und O.

Auch in der Wissenschaft spielt die Nummer Eins in der Spezialchemie eine maßgebliche Rolle. Weltweit investieren wir jedes Jahr viele hundert Millionen Euro in Forschung und Entwicklung. Darüber hinaus kooperieren wir mit über 500 Wissenschaftlern an Universitäten und Forschungseinrichtungen auf der ganzen Welt. www.degussa.com



3 Prof. Dr. Boles demonstriert, wie nach Zerlegung des Pflanzenmaterials in einzelne Zucker (Glucose, Arabinose, Xylose) die optimierten Hefen eingesetzt werden können, um daraus Bioethanol als Autokraftstoff herzustellen.

Bereich der Bioethanol-Herstellung von der Vorbehandlung der Biomasse bis zur Optimierung der Prozesstechnik ab. In diesem Projekt sollen die meisten derzeit noch bestehenden Hindernisse aus dem Weg geräumt werden, die dem Traum von der Umwandlung von Biomasse in Ethanol im Wege stehen. Mit ihren jüngsten Erfolgen sind die Frankfurter Hefewissenschaftler diesem Ziel mit großen Schritten näher gekommen.

Der Autor

Prof. Dr. Eckhard Boles, 42, ist seit 2002 Professor für Mikrobiologie an der Johann Wolfgang Goethe-Universität. Mit den molekularen Grundlagen der Zuckerverwertung durch Hefen beschäftigt er sich seit seiner Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt. Er erhielt dafür den Dissertations-Hochschulpreis der Vereinigung von Freunden der TU Darmstadt. Seine Habilitation an der Universität Düsseldorf im Jahre 2000 schrieb Boles über die Mechanismen und die Steuerung der Zuckeraufnahme in die Hefezellen. In seinen wissenschaftlichen Arbeiten verknüpft er – wo möglich – die Grundlagenforschung mit der industriellen Anwendung, was sich in zahlreichen Industriekontakten widerspiegelt. Die gegenwärtigen Forschungsschwerpunkte seiner Arbeitsgruppe sind das »Metabolic Engineering« von Hefezellen zur Produktion von Biochemikalien wie zum Beispiel Bioethanol. Auf der anderen Seite untersucht Prof. Dr. Boles intensiv die Nährstoffaufnahmesysteme der Hefe und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen.

Die Rechnung geht nicht auf: Weniger Menschen = niedriger Wasserverbrauch

Rückgang der Bevölkerung fordert Planer von Versorgungssystemen heraus

Wir werden weniger, älter, bunter« – so lautet vielfach das Fazit zum demographischen Wandel in Deutschland. Dahinter stehen unterschiedliche, miteinander verbundene Phänomene: Die Bevölkerungszahl nimmt ab, die Altersstruktur verändert sich aufgrund des Geburtenrückgangs und steigender Lebenserwartung, die Bevölkerung differenziert sich immer stärker aus, ausgelöst durch Zuwanderung und Pluralisierung von Lebensstilen und Haushaltsformen. Verändern sich Größe und Struktur einer Bevölkerung, so wirkt sich dies massiv auf ganz unterschiedliche Handlungsfelder aus: Sozialversicherungssysteme, Kinderbetreuung und Bildungseinrichtungen, Pflege- und Krankenhauswesen, öffentlichen Nahverkehr oder den Wohnungsbau.

Folgen hat der demographische Wandel auch für die netzgebundenen Infrastrukturen wie die Wasserversorgung, Abwasserentsorgung und Energieversorgung (Strom,

Wärme). Am Beispiel der Wasserversorgung machen wir deutlich, wie Bevölkerungsveränderungen und sozial-ökologische Probleme der Versorgung zusammenhängen und wie Versorgungssysteme an die neuen Anforderungen angepasst werden können.

Kehrseiten des ökologisch Wünschenswerten

In den neuen Bundesländern wandern immer mehr Menschen ab, gleichzeitig geht die Zahl der Geburten zurück. Die Zahl der Abnehmer verringert sich und damit auch der Wasserverbrauch. Gleichzeitig

sinkt der Pro-Kopf-Verbrauch, was auf effektivere Haushaltsgeräte wie Spül- und Waschmaschinen, aber auch auf sparsameren Umgang wegen steigender Preise zurückzuführen ist. Zudem geht der gewerbliche Wasserverbrauch in den wirtschaftsschwachen Regionen der östlichen Bundesländer zurück. Ökologisch ist die sparsamere Nutzung begrüßenswert, doch der Rückgang zeigt auch negative Auswirkungen: Bereits heute sind die Systeme der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung nicht mehr ausreichend beansprucht. Gravierende Folgen für die zukünftige

