



In dieser Pilotanlage stellt die Mikroalge *Phaeodactylum tricoratum* das hochmolekulare Polysaccharid Beta-Glucan aus Kohlenstoffdioxid, das aus dem Faulgas der Kläranlage Erbach (Donau) stammt, mithilfe von Licht bei optimalen Wellenlängen her. Das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB aus Stuttgart betreut die Pilotanlage. Foto: Frank Eppler

### Kohlenstoffdioxid biotechnologisch nutzen

# Mikroben recyceln Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid lässt sich mithilfe von Enzymen von Mikroorganismen in Chemikalien auch mit hoher Wertschöpfung umwandeln. Für viele Unternehmen aus der Abfall-, Chemie-, Stahl- oder Zementbranche wird diese biotechnologische CO<sub>2</sub>-Umwandlung künftig einen Weg bieten, relativ kostengünstig ihre Treibhausgas-Emissionen zu senken.

Um eine Kohlenstoffkreislaufwirtschaft aufzubauen, ist es notwendig, gasförmigen Kohlenstoff, der in vielen industriellen Prozessen anfällt, zurückzugewinnen und einer weiteren Nutzung zuzuführen. Dieser Kohlenstoff fällt beispielsweise bei der Abfallverbrennung, der Herstellung von Zement oder Stahl

und bei vielen weiteren chemischen Prozessen an. Stand heute geht er bei diesen Prozessen für die weitere Nutzung meistens verloren.

Um die Emission von diesem nicht vermeidbaren CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre zu verhindern, existiert neben der Abscheidung und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung, dem CCS (Carbon Capture and Storage), auch die Möglichkeit des Abscheidens

und Recyclings, dem CCU (Carbon Capture and Utilisation).

Der CCU-Weg ermöglicht es zum einen, die Abhängigkeit von Primärressourcen zu verringern, zum anderen erhält Abgas-CO<sub>2</sub> hierdurch einen Wert und erlaubt Unternehmen eine Erweiterung ihres Portfolios. Die am weitesten entwickelten Techniken erzeugen aus CO<sub>2</sub> einfach gebaute Kohlenstoffverbindungen

dungen wie Ameisensäure (CH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), Methanol (CH<sub>3</sub>OH) oder Ethanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH).

Die chemische Industrie nutzt diese Substanzen in großen Volumina als Basischemikalien. Eine Herausforderung bei der Entwicklung solcher Prozesse ist die Konkurrenz zu äquivalenten fossil-basierenden Verfahren.

Es gibt mehrere Wege, CO<sub>2</sub> abzuscheiden und gegebenenfalls umzuwandeln: Bei physikalischen Verfahren wird CO<sub>2</sub> verdichtet und unter erhöhtem Druck oder niedriger Temperatur aufgefangen. Bei (katalytisch-)chemischen Verfahren wird das Gas etwa in mineralische Produkte wie Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>) oder einfach gebaute Kohlenstoffverbindungen wie Methanol und Ethanol umgewandelt.

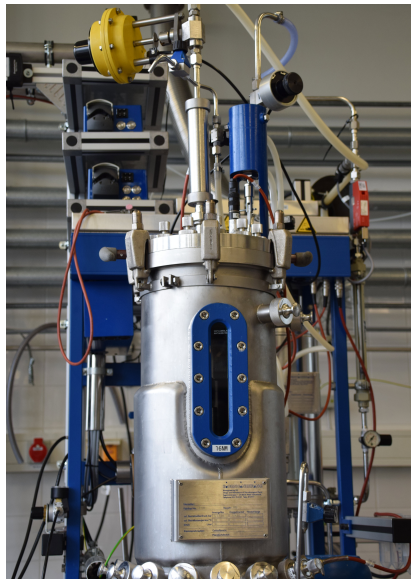
Bei biotechnologischen Verfahren wandeln biologische Katalysatoren wie Enzyme oder auch ganze Mikroorganismen das Klimagas um. Neben verfahrenstechnischen Besonderheiten biotechnologischer Prozesse besteht der große Unterschied zu chemischen Verfahren vor allem in der Produktpalette. Biotechnologische Verfahren können neben einfach gebauten Verbindungen komplexe und damit auch wertvollere Spezialchemikalien wie Polymere, Pharmazeutika, Fette oder Eiweiße herstellen. Damit lassen sich auch schon in kleineren Anlagen, also mit geringen CO<sub>2</sub>-Strömen, Mengen herstellen, die für das Geschäftsmodell umsatzrelevant sind.

## Je komplexer, je wertvoller

Auch auf katalytisch-chemischem Weg lassen sich komplexere Substanzen mit höheren Marktpreisen herstellen. Dies erweitert zwar grundsätzlich den wirtschaftlichen Spielraum. Jedoch gilt vor allem bei chemischen Verfahren: Je komplexer die Endprodukte sind, desto anfälliger sind sie für Nebenprodukte.

Biotechnologische Ansätze können hier einen Ausweg bieten. Für biotechnologisches CO<sub>2</sub>-Recycling sind Mikroorganismen besser als freilandkultivierte Pflanzen geeignet. Genau wie Pflanzen verfügen viele Mikroben über die Fähigkeit, ihren Kohlenstoffbedarf vollständig aus CO<sub>2</sub> zu decken.

Diese sogenannte autotrophe Lebensweise tritt in Bakterien, Archaeen und Mikroalgen auf. Diesen mikroskopisch kleinen Lebewesen ist gemein, dass sie alle in einer wässrigen Suspension wachsen



In diesem 30-l-Bioreaktor am Institut für Bioverfahrenstechnik der Uni Stuttgart fermentieren Mikroorganismen bei Überdruck Gase wie H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und CO. Der hohe Druck bewirkt etwa durch Clostridien eine verbesserte Aufnahme der Substratgase.  
Foto: Emma Schüttoff/UTBW

können. Hierin besteht einer der größten Vorteile für die Nutzung zur Umsetzung von CO<sub>2</sub>. Zudem sind Mikroben verglichen mit chemisch-katalytischen Verfahren meist wesentlich robuster gegenüber typischen Verunreinigungen wie Schwefelwasserstoff.

Mikroben lassen sich in einfachen Reaktoren kultivieren, benötigen keinen fruchtbaren Boden und die Produkte lassen sich mit etablierten Verfahren extrahieren. Das macht die Kultivierung und Handhabung nach bekannten Prinzipien der Prozesstechnik möglich und erlaubt eine industrielle Skalierung. Der einfache Aufbau, die Prozessierung in optimierten Anlagen und der präzise zu kontrollierende Stoffwechsel machen Mikroben bis zu viermal energieeffizienter als Pflanzen. Gleichzeitig können Ressourcen wie Wasser oder Nutzfläche gespart werden.

Je nach Mikroorganismus gestaltet sich die Verfahrenstechnik etwas unterschiedlich. Für technische Verfahren bietet es sich daher an, nach dem verwendeten Energieträger zu unterscheiden: also zwischen Wasserstoff, Licht oder elektrischem Strom.

## Energiequelle Wasserstoff

Der Aufbau organischer Verbindungen aus Kohlenmonoxid (CO) oder CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff ist evolutionär alt und ener-

gieeffizient. Die am weitesten entwickelten technischen Verfahren mit dieser Art von Umwandlung erzeugen einfache Kohlenstoffverbindungen wie Methan, Essigsäure oder Ethanol.

Ethanol ist aktuell das bedeutendste kommerzielle Produkt der mikrobiellen Gasfermentation mit Bakterien der Gattung Clostridium. Bei dem Verfahren der Firma Lanzatech mit Hauptsitz in Skokie, Illinois, USA, werden CO-, CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>-haltige Abgase von Stahlwerken direkt verwendet. Das Produkt der Fermentation ist mit hoher Selektivität Ethanol.

Nach der Aufreinigung wird Ethanol als Lösemittel oder in Parfums eingesetzt beziehungsweise zu Produkten wie Verpackungen oder Bekleidung weiterverarbeitet. Weitere Entwicklungsarbeiten bei Lanzatech zielen darauf ab, mit diesem Verfahren hochpreisigere chemische Basischemikalien wie Aceton, Butanol oder Isopren herstellen zu können.

Auch Methan (CH<sub>4</sub>) kann als Rohstoff für chemische Prozesse dienen. Die Methanisierung von CO<sub>2</sub> mithilfe sogenannter Archaea ist ebenfalls weit entwickelt.

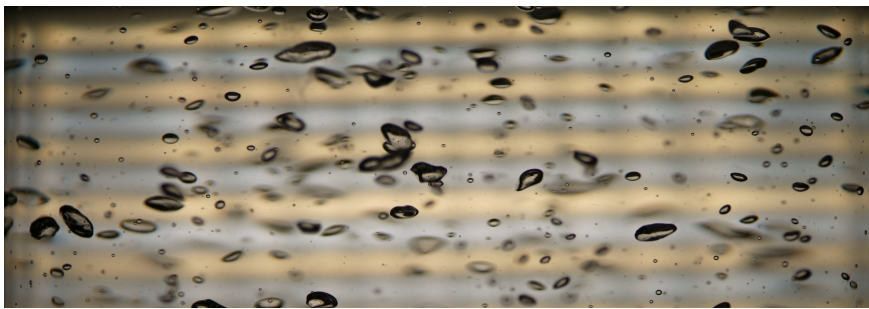
In allen Fermentationen bauen Mikroorganismen nicht nur einfach gebaute Kohlenstoffverbindungen auf, sondern bilden immer auch Biomasse. Diese besteht zu einem großen Teil aus Eiweißen. Einige Firmen entwickeln daher Prozesse, die diese Proteine in Futter- oder Lebensmittelqualität erzeugen und zielen hierdurch auf die Herstellung von Futter- oder Lebensmitteln ab, ohne auf landwirtschaftliche Nutzfläche angewiesen zu sein.

## Energiequelle Licht

Wird einem Prozess Energie in Form von Licht zugeführt, macht das den Vergleich zu Pflanzen noch offensichtlicher. Dabei können auch Mikroalgen fotosynthetisch Biomasse aus CO<sub>2</sub>, Licht und anorganischen Nährstoffen wie Ammonium und Phosphat aufbauen. Im Gegensatz zu komplexen Pflanzen lassen sich durch die Anwendung moderner Prozesstechnik höhere Energieausbeuten bei geringerem Wasser- und Flächenverbrauch erreichen.

Diese geschlossenen Systeme ermöglichen zudem eine gute Kontrolle der Kultivierungsbedingungen und die Nutzung des gesamten Volumens des Reaktors.

Aktuelle Entwicklungen in der LED-Beleuchtungstechnik verbessern die Energieausbeute der Prozesse so weit, dass



In diesem Blasensäulenreaktor am Institut für Bioverfahrenstechnik der Uni Stuttgart werden Gasblasen vermessen. Kleinere haben pro Volumen eine größere Oberfläche und ermöglichen einen besseren Stoffaustausch und damit auch eine schnellere Aufnahme der Substratgase. Foto: Yannic Mast/IBVT

diese eine Freiflächenkultivierung der Algen ablösen können und eine witterungsunabhängige Ganzjahresproduktion ermöglichen.

Den höheren Strom- und Investitionskosten für die künstliche Beleuchtung steht dabei eine um acht- bis zehnfach höhere Biomasseproduktivität gegenüber.

Neben Raffinationsansätzen zur Weiterverarbeitung der Algenbiomasse zu Produkten für den Kosmetik-, Lebensmittel- oder Kraftstoffbereich wurden Mikroalgen bereits gentechnisch so verändert, dass diese etwa biologisch abbaubare Kunststoffe wie Polyhydroxyalkanoate (PHA) herstellen.

Eine vielversprechende Anwendung für die Mikroalgenkultivierung besteht im Einsatz nährstoffreicher Gärrückstände aus Biogasanlagen und Agrarabwässern. Dadurch lässt sich die Nitratbelastung für Böden und Grundwässer senken. CO<sub>2</sub> aus Biogasanlagen kann dabei als Kohlenstoffquelle genutzt werden.

## Energiequelle Strom

Die Elektrobiosynthese ermöglicht den Brückenschlag zwischen der stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub> und der direkten Verwendung elektrischer Energie. Der stoffliche Transport von Energie in Form chemischer Energieträger wie Wasserstoff ist dabei nicht notwendig.

Mikroorganismen katalysieren die Fixierung von CO<sub>2</sub> zu komplexen Verbindungen, indem sie mit einer Elektrode interagieren. Dabei nehmen sie Elektronen direkt oder über Shuttlemoleküle von dieser Elektrode in ihren Stoffwechsel auf.

Die Vorteile des Verfahrens liegen in der Prozessführung. Denn auf diese Weise lassen sich auch Abgasgemische mit CO<sub>2</sub> und Sauerstoff verwenden, die in Verbindung mit Wasserstoff explosionsgefährlich wären.

Auch stellen die biologischen Elektroden einen Katalysator für Prozesse dar, die in der konventionellen Elektrochemie nur unter Einsatz teurer oder kritisch zu beschaffender Materialien zu erreichen sind. Aktuell befinden sich diese Verfahren noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Die Produkte dieser Prozesse decken ein ähnlich beeindruckendes Spektrum ab wie die zuvor genannten Verfahren und reichen von Methan über Basischemikalien und Biopolymere zu Proteinen.

## Biotechnische Skalierung

Produkte aus recyceltem CO<sub>2</sub> machen derzeit noch einen sehr kleinen Teil am Markt aus. Die Technik befindet sich erst am Anfang ihrer Entwicklung. Einige Akteure konnten sich bereits etablieren und einen Vertrieb aufbauen. Die Chancen für weitere Erfolgsgeschichten stehen gut, da die Produkte der Verfahren häufig identisch zu konventionellen Industrieprodukten sind.

Derzeit stellen die Sicherheit von Investitionen, das frühe Stadium der technischen Entwicklung, der rechtliche Rahmen und die Notwendigkeit von Anreizen die größten Hürden für eine breite Einführung von biologisch inspiriertem CO<sub>2</sub>-Recycling dar. Mit der zunehmenden Verbreitung der Kohlenstoffabscheidung, Preissteigerungen fossiler Rohstoffe und breit verfügbarer, günstiger und grüner Energie werden die Kosten im Laufe der Zeit deutlich sinken.

## Ressourcen schonen

Mit Blick auf Rohstoffsicherheit und Ressourcenschonung gilt es, zügig Veränderungen für eine nachhaltigere Zukunft einzuleiten. Die Verringerung von Treibhausgasen für unser Erdklima stellt Un-

ternehmen vor große Herausforderungen. Selbst in den ehrgeizigsten Szenarien zur Emissionsverminderung wird ein Anteil fossiler Brennstoffe einkalkuliert.

Durch Rückführung von CO<sub>2</sub> in die Wertschöpfungskette können die Akteure mithilfe biologischer und biologisch inspirierter Techniken auf Basis von Gasfermentation, Algen und Elektrobiosynthese neuartige Produkte und Konzepte für mehr Nachhaltigkeit umsetzen. Das biologische CO<sub>2</sub>-Recycling ist für Industriezweige mit hohen prozess- oder rohstoffbedingten Emissionen eine wichtige Möglichkeit, langfristig klimaneutral zu werden und Rohstoffsicherung zu betreiben. Vor dem Hintergrund der kontinuierlich steigenden Kohlenstoffpreise sind die Geschäftsmöglichkeiten beträchtlich, die Skalierbarkeit von Lösungen vorausgesetzt.

Dabei verbessern diese Techniken nicht per se die Klimabilanz industrieller Prozesse. Die Energiekosten sind hoch, da der Ausgangsstoff CO<sub>2</sub> sehr stabil ist und aufwendig aktiviert werden muss. Für die Umsetzung ist daher entscheidend, sich genau zu überlegen, in welchen Prozessen sich CO<sub>2</sub>-Recycling lohnt.

Die größte Klimawirkung erzielt nach wie vor jede Emission, die gar nicht erst anfällt. Ist dies nicht vermeidbar, sollten die Anstrengungen in Richtung möglichst langlebiger Produkte gehen, die am Ende ihrer Lebensdauer im Stoffkreislauf gehalten werden und erst als letzte Option wieder verbrannt werden. CO<sub>2</sub>-Recycling ist als Teil einer Kreislaufwirtschaft zu verstehen und schließt den Stoffkreislauf an einer Stelle, die bisher eine Lücke aufweist. ■

### H I N W E I S

Das Land Baden-Württemberg unterstützt den Aufbau biotechnologischer Anwendungen zur Nutzung von CO<sub>2</sub> im Rahmen des Netzwerks „Innovation Hub CCU<sub>BIO</sub>“.

Dr.  
**S e b a s t i a n**  
**B e b l a w y**

Gesamtleiter  
Bioökonomie bei der  
Umwelttechnik BW GmbH

sebastian.bebrawy@  
umwelttechnik-bw.de

Foto: Umwelttechnik BW

