

Zauber Kohle aus dem Dampfkochtopf

*Dass Grundlagenforschung keineswegs weltfremd ist, sondern mitunter auch praktische Probleme lösen kann, die uns auf den Nägeln brennen, beweist **MARKUS ANTONIETTI**, Direktor am **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KOLLOID- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG** in Potsdam. Er hat einen Prozess entwickelt, mit dem sich Biomasse ganz einfach in wertvolle Rohstoffe verwandeln lässt.*

Institutsdirektor Markus Antonietti zerreibt einen winzigen Kohlekrümel auf seiner Handfläche und schnuppert genüsslich daran: „Hmm, ich mag diesen Geruch!“ Ein neu entwickeltes Herrenparfüm? Nein, viel mehr: vielleicht der Anfang einer neuen Ära in der Energiewirtschaft. Kohlenstoff steht bei Antoniettis Vision im Mittelpunkt – genauso wie er das auch schon in unserer realen Welt tut: Die fossilen Energieträger, die wir Jahr für Jahr im Milliarden-Tonnen-Maßstab aus dem Boden holen, halten die Wirtschaft am Laufen, sind Basis der Energieerzeugung und Rohstoff für die Chemie.

Der Haken bei der Sache: Praktisch bei allen Verwertungsarten entsteht letztlich Kohlendioxid (CO_2). 80 Gewichtsprozent des gesamten industriellen Ausstoßes der Welt bestehen daraus. Und das heißt nicht mehr und nicht weniger, als dass wir unsere fossilen Lagerstätten mit atemberaubender Geschwindigkeit in Gas

verwandeln und in die Atmosphäre jagen. Nur etwa ein Drittel davon kann die Biosphäre weltweit wieder binden. Die Folgen sind inzwischen bekannt: Treibhauseffekt, Erderwärmung, Klimaveränderung.

Markus Antonietti will dem ein Ende machen, und er schlägt die Natur mit ihren eigenen Mitteln: Er hat ein extrem einfaches Verfahren erfunden, das den industriellen Kohlenstoffkreislauf revolutionieren könnte, denn es nutzt die gewaltigen Biomassevorräte der Welt, um daraus Kohle, Humus oder Öl zu produzieren – ohne Umwege und komplizierte Verfahrensschritte, wie sie in der heutigen Biomasseverwertung üblich sind. Und gleichzeitig wird bei diesem Prozess auch noch Energie frei. Der Potsdamer Chemiker arbeitet mit purem Abfall: mit Stroh, Holz, nassem Gras, feuchten Blättern.

Alles, was heute die Landschaft verschmutzt, was der Bauer unterpflügt, um es loszuwerden, und der Hobby-

gärtner auf den Komposthaufen oder in die Biotonne wirft, wird in Antoniettis Szenario zum wertvollen Rohstoff. Auf dem Umweg über die Kohle kann man daraus Benzin, Diesel oder chemische Grundstoffe gewinnen, man kann ihn in Mutterboden verwandeln und sogar in Brennstoffzellen direkt zur Stromgewinnung nutzen. Zusätzliches Kohlendioxid entsteht dabei nicht, ja, es wird sogar in großen Mengen aus der Atmosphäre herausgeholt und gebunden.

Eine Utopie? Spitzfindigkeiten eines akademischen Spinners? Nein. Der Chemiker Markus Antonietti geht

die Sache von der Basis her an. So hat er sich zunächst einmal die Energielandschaft verschiedener Kohlenstoffverbindungen angesehen: „Biomasse besteht letztlich aus Zuckerbausteinen, die sehr viel Energie enthalten. Wenn man sie in einem chemischen Prozess in Kohlenstoff und Wasser zerlegt, muss man keine Energie hineinstecken, sondern es wird dabei sogar noch welche frei.“ Die Natur hat es uns vorgemacht: Kohle, Erdöl und Erdgas entstanden in Jahrmillionen tief in den Schichten der Erde aus abgestorbenen Pflanzen, also letztlich aus Biomasse. Das lernt

man schon in der Schule. „Aber niemand hat sich bisher darüber Gedanken gemacht, wie das wirklich geschieht“, wundert sich Antonietti.

DIE FREIHEIT, TRIVIALE FRAGEN ZU STELLEN

Seine eingehende Literaturrecherche ergab zwar viele Vermutungen und Gemeinplätze – häufig ist vom „Inkohlungsprozess“ die Rede –, aber zum Kern der Frage, nämlich wie dieser wirklich abläuft, war bisher noch niemand vorgestoßen. Antonietti hatte den Mut dazu. „Ich nehme mir heute die Freiheit, solche

Fragen zu stellen“, sagt der 46-jährige Chemiker, „auch auf die Gefahr hin, als Spinner zu gelten. Aber lieber setze ich meinen Ruf aufs Spiel, als der Wahrheit nicht näher zu kommen“. Im Fall der Kohle hat das sogar schon beim ersten Versuch geklappt. Der Forscher ist nicht nur der Entstehung der Kohle auf die Spur gekommen, sondern hat ganz nebenbei einen Prozess entdeckt, der die Chance hat, die Welt zu verändern.

Welch große Bedeutung eine nachhaltige Energieversorgung für die Zukunft unserer Gesellschaft hat, weiß zwar grundsätzlich auch die



Die Herstellung der „Zauber Kohle“ setzt Energie frei. Eine Explosion in diesem Labor auf dem Dach des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung bewies das nachdrücklich.

FOTOS: NORBERT MICHALKE



Mittels hydrothormaler Karbonisierung in einem Druckgefäß entsteht aus Biomasse, etwa Orangenschalen, feinstes Kohlepulver (links). Rechts der Erfinder des Verfahrens, Institutsdirektor Markus Antonietti, mit seiner Mitarbeiterin Anna Fischer.

breite Öffentlichkeit. Weit weniger bekannt ist allerdings, dass es noch viel zu erforschen gibt; und es geht nicht nur um Verfahrenstechnik und Prozessführung, um Steigerung der Ausbeuten und Wirkungsgrade. Nein, es geht auch heute noch um ganz fundamentale Probleme, die sich nur mittels echter Grundlagenforschung lösen lassen – und die damit zur angestammten Domäne der Max-Planck-Gesellschaft zählen.

Dazu haben sich im Jahr 2004 fünf Max-Planck-Direktoren zum Forschungsverbund Enerchem zusammengeschlossen, einem „Projekthaus für nanochemische Konzepte einer nachhaltigen Energieversorgung“. Die Projekte reichen von verbesserten katalytischen Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff über Arbeiten zur Nachahmung der Photosynthese bis hin zur Speicherung von Wasserstoff in neuartigen Medien (MAXPLANCKFORSCHUNG 1/2005, Seite 14ff.).

In diesen organisatorischen Rahmen fügen sich auch Antoniettis Kohlearbeiten ein. „Enerchem bietet hier das ideale Umfeld“, betont er, „wir sind gut aufgestellt und haben alle Kompetenz, die wir zum Evaluieren unserer Ideen benötigen, innerhalb der Organisation“. Das ist patentrechtlich, statutenrechtlich, aber auch kommunikationstechnisch

für alle Beteiligten ein Vorteil: „Die Kollegen haben alle den gleichen kulturellen Hintergrund, auch wenn wir persönlich sehr verschieden sind. Da weiß man genau, dass das Signal, das man aussendet, auch entsprechend ankommt.“

KREATIVER KOLLEGENKREIS LIEFERT ANSTÖSSE

So werden alle Ideen, Erfindungen und Probleme im Kollegenkreis intensiv besprochen, unter Experten abgewogen und kritisch getestet. Das gilt für innovative Batteriekonzepte von Joachim Maier in Stuttgart ebenso wie für bessere Wasserstoffspeicher von Ferdi Schüth in Mülheim, für nanotechnische Elektrodenkonzepte von Klaus Müllen in Mainz oder für neue Methanolkatalysatoren von Robert Schlögl in Berlin. Die Kohlenstoffvision des Potsdamer Institutschefs ist also nicht das einzige Ergebnis der hochrangigen Zusammenarbeit. Wichtige Anstöße für zukünftige Energiekonzepte sind aus diesem Kreis der Max-Planck-Wissenschaftler in den kommenden Jahren noch zu erwarten.

Zurück zu Markus Antonietti. Seine Lösung ist bestechend einfach: Man gebe Biomasse plus Wasser in ein Druckgefäß, dazu ein paar Brösel Katalysator und erhitze das Ganze unter Luftabschluss auf 180 Grad.

Nach zwölf Stunden lässt man die Mischung abkühlen, öffnet den „Dampfkochtopf“ und findet eine schwarze Brühe vor. „Unsere Analysen haben gezeigt, dass es sich um feinst verteilte kugelförmige Kohlepartikel in Wasser handelt“, erklärt Magda Titirici, die inzwischen hunderte dieser Experimente durchgeführt hat. Ihr Chef Antonietti hat dafür seinen Garten geplündert und Eichenlaub, Tannennadeln, Holzstückchen und Pinienzapfen mitgebracht. Manche der neu entstandenen Kohlekrümel enthalten deshalb noch wohlriechende Harze und duften herb und würzig.

Auch heute schon wird Biomasse genutzt, allerdings auf andere Art und Weise – etwa in Form von Biodiesel, der aus pflanzlichen und tierischen Fetten gewonnen wird. Mehr als eine Nische kann das jedoch nicht ausfüllen, das ergibt sich sofort aus den Fakten: Die Menschheit verbraucht zurzeit vier Milliarden Tonnen Mineralöl pro Jahr; die Weltproduktion von Fetten beträgt jedoch gerade mal 120 Millionen Tonnen. Damit ließen sich zwar alle Autos in Deutschland mit Biodiesel versorgen, aber die Welt hätte nichts mehr zu essen.

Man darf also nicht hochwertige Produkte wie Fette verwenden, sondern möglichst billigen Abfall. Natürlich kann man ihn einfach ver-

brennen, aber das bringt wenig Energie, denn Biomasse ist meist nass und muss erst getrocknet werden. Außerdem setzt man bei der Verbrennung Kohlendioxid frei. Ein anderer Weg, der heute beschränkt wird, ist die Vergärung von Biomasse, bei der Ethanol und ebenfalls CO₂ entstehen. „Die alkoholische Gärung hat jedoch nur einen geschätzten effektiven Wirkungsgrad von drei bis fünf Prozent der in den Pflanzen gespeicherten Primärenergie“, sagt Antonietti. „Und danach muss man auch noch den Alkohol vom Wasser trennen. Um einen Kubikmeter reinen Alkohol zu machen, braut man 30 Kubikmeter Bier, das ist für Kraftstoffe keine gute Lösung.“

Auch die Umwandlung von Biomasse in Biogas ist energetisch gesehen nicht optimal. „Das, was wir als Energieträger benutzen, ist eigentlich ein Nebenprodukt beim Stoffwechsel von Mikroben“, so der Chemiker, „die Hälfte des Kohlenstoffs wird wieder als CO₂ freigesetzt“. Bleibt noch das Verfahren der Pyrolyse. Bei ihr wird die Biomasse unter Luftabschluss bei extrem hohen Temperaturen verkohlt. Hierzu muss das Pflanzenmaterial aber trocken sein, sonst rechnet sich die Energetik des Prozesses nicht.

Antoniettis Plan zur Nutzung pflanzlicher Abfälle ist viel schlauer,

und deshalb wird ihm die Zukunft gehören: Seine hydrothermale Karbonisierung wandelt Biomasse – auch wenn sie nass ist – vollständig in Kohlenstoff und Wasser um. „Und hier liegt genau die Pointe“, freut sich der Max-Planck-Direktor. „Es entsteht nicht etwa CO₂, sondern das einzige Nebenprodukt ist eben Wasser. Der gesamte Kohlenstoff, den das Material enthält, bleibt im Produkt gebunden. Das heißt: Unsere Kohlenstoffeffizienz beträgt 100 Prozent. Was wir am Anfang an Kohlenstoff reinstecken, kriegen wir am Ende als Kohlenstoff auch wieder raus, für die Kohlenstoffbilanz die optimale Lösung. Mehr Kohlenstoff kann man nicht nachhaltig binden.“

EIN WUNDERBARES GESCHENK DER NATUR

Man sieht das an der Formel: Nimmt man von einem Zuckermolekül fünf Wasser weg, entsteht praktisch reiner Kohlenstoff mit ein paar Restgruppen von Wasserstoff und Sauerstoff: Braunkohle. Sie besteht aus feinsten Kügelchen und ist extrem porös, mit der für viele Anwendungen interessanten Porengröße von acht bis 20 Nanometer. „Das ist reiner Zufall“, meint Antonietti, „das haben wir nie geplant, das ist ein Geschenk der Natur“. Der verkohlte Kiefernzapfen hat zwar noch die gleiche Form wie vor-

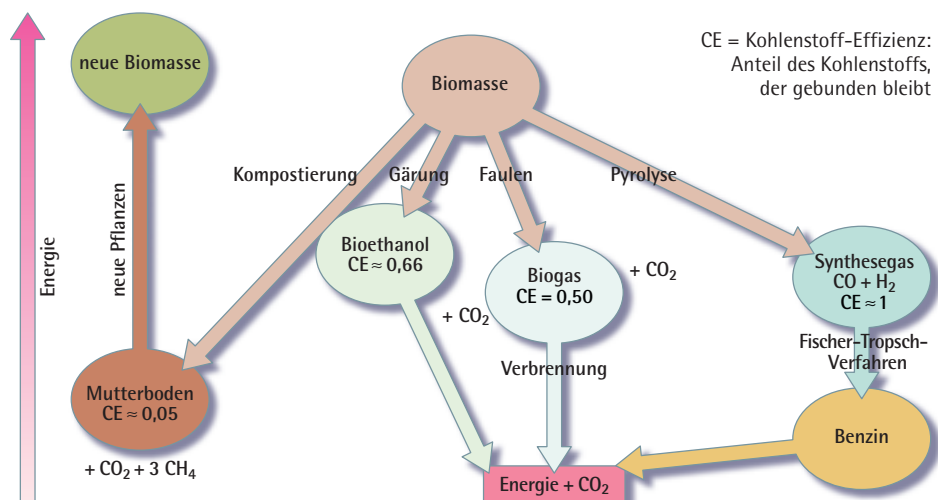
her, er ist jedoch kein Zapfen mehr, sondern genau genommen ein Nanoprodukt.

Die Natur macht genau das Gleiche, aber ganz langsam. Torf braucht zu seiner Entstehung 500 bis 5000 Jahre, Braunkohle 50 000 bis 50 Millionen Jahre, Steinkohle aus dem Karbon ist sogar 150 Millionen Jahre alt. Die Potsdamer Forscher hingegen schaffen das über Nacht. Und die Reaktion ist exotherm, das heißt, es entsteht spontan Wärme. Bei einem der Versuche ist sogar die Reaktionskammer explodiert, weil zu viel Energie frei wurde. „Das Geniale an diesem Prozess ist seine Einfachheit“, sagt Markus Antonietti. Aber er sei wohl zu offensichtlich, um in den Lehrbüchern zu stehen. „Das hat schon Edgar Allan Poe gewusst: Die beste Art, etwas zu verstecken, ist, es offen hinzulegen.“

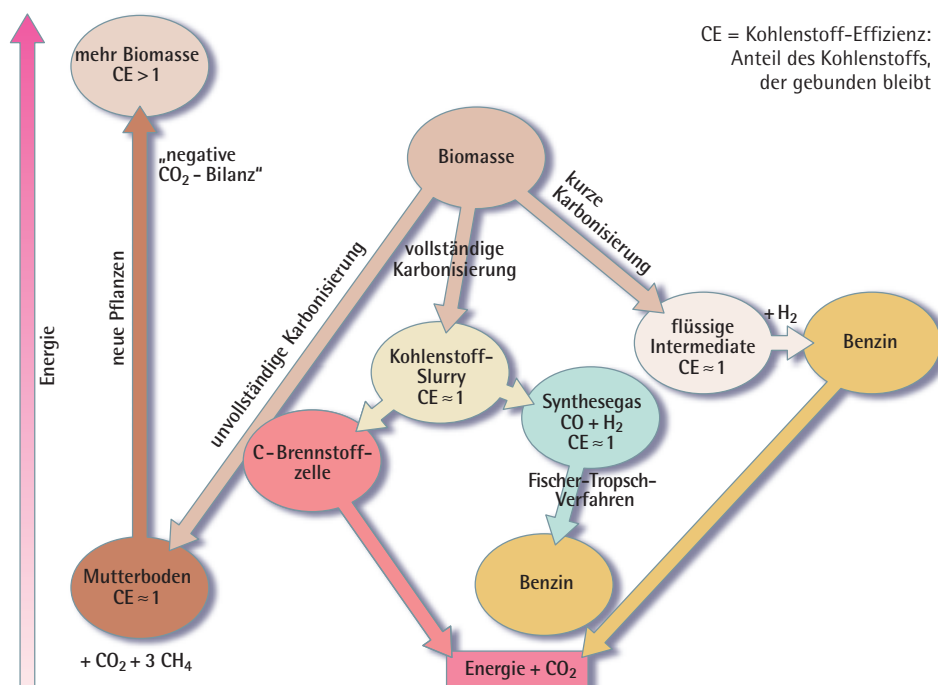
Was kann man nun mit dem Kohle-Wasser-Gemisch anfangen? Man könnte es natürlich als Kohle verheizen, aber das wäre nur die einfachste und keineswegs die beste Lösung. Viel besser ist es etwa, diese feine Kohlepulver-Wasser-Mixtur zum Betrieb einer neuen Art von Brennstoffzelle zu verwenden. Die Prototypen, die es heute davon schon gibt (beispielsweise an der Harvard-Universität), haben einen Wirkungsgrad von 60 Prozent. Man betreibt sie mit „Kohlematsch in

Füllt man Biomasse, zum Beispiel Grünzeug, in ein Druckgefäß (links), gibt ein paar Brösel Katalysator dazu und erhitzt das Ganze unter Luftabschluss auf 180 Grad, erhält man nach zwölf Stunden das schwarze Pulver aus Kohle-Nanokügelchen (rechts).





BISHERIGES BIOMASSE-MANAGEMENT: Bei weitem der Großteil der Biomasse verrottet am Ort der Entstehung direkt wieder zu atmosphärischem Kohlendioxid und auch Methan, nur sehr kleine Mengen werden zu Mutterboden oder auf andere Weise zur Kohlenstoffsinke (etwa in Sümpfen oder auf dem Meeresgrund). Die jetzigen Technologien der Biomassenutzung umfassen – neben der direkten Verbrennung von Holz und Stroh – die alkoholische Gärung, die Erzeugung von Biogas in Faultürmen sowie die direkte Synthesegaserzeugung.



VISION EINES ALTERNATIVEN BIOMASSE-MANAGEMENTS: Durch die verschiedenen Techniken der hydrothermalen Karbonisierung kann man mit sehr hoher Kohlenstoffeffizienz künstlichen Mutterboden herstellen, der bei kargen Böden nachhaltig die Qualität verbessert. Auf diese Weise dient er der Bildung größerer Mengen Biomasse (negative CO₂-Bilanz). Der bei „vollständiger Karbonisierung“ aus Abfallstoffen entstehende Kohlenstoffschlamm lässt sich aber auch für energetische Zwecke nutzen, etwa in zentralen Anlagen zur Herstellung von Synthesegas. Oder er wird – so eine Vision – in Kohlenstoff-Brennstoffzellen verstromt. Ein besseres Verständnis der bei der Karbonisierung auftretenden Prozesse dürfte auch die direkte Gewinnung von flüssigen Brennstoffen erlauben, wobei hier aufgrund der involvierten chemischen Grundgleichgewichte Wasserstoff aus anderen Quellen zugeführt werden muss.

Wasser“ – wie er bei der hydrothermalen Karbonisierung entsteht.

Wer nicht Strom, sondern lieber Kraftstoff damit erzeugen will, muss das Kohlenstoff-Wasser-Gemisch einfach noch heißer machen, denn dann entsteht daraus wieder mittels einer exothermen Reaktion so genanntes Synthesegas, also Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Daraus lässt sich direkt Benzin herstellen, und zwar mittels des altbewährten Fischer-Tropsch-Verfahrens. Die eingesetzte Biomasse ist also zu einem hoch wertvollen Ausgangsprodukt geworden, das man verstromen oder in Benzin umwandeln kann. „Anstatt einen Kubikmeter Kompost einfach in einer Gartenecke verrotten zu lassen, könnte man ihn in Zukunft zu einer lokalen Fabrik bringen, um dafür 200 Liter Sprit zurückzukriegen“, stellt sich Antonietti die praktische Umsetzung vor.

1300 LITER BIODIESEL PRO HEKTAR

Biomasse gibt es genug auf der Welt, auch wenn sich ihr Potenzial schwer abschätzen lässt. Die Internationale Energieagentur zitiert verschiedene Studien, deren Spektrum von neun bis zu mehr als 360 Billionen Kilowattstunden jährlich reicht. Eine Studie des World Energy Council nennt Biomasse sogar „die potenziell größte und nachhaltigste Energiequelle der Welt“. Allerdings merken die Experten auch an: „Sowohl die Produktion als auch die Nutzung der Biomasse müssen noch modernisiert werden.“

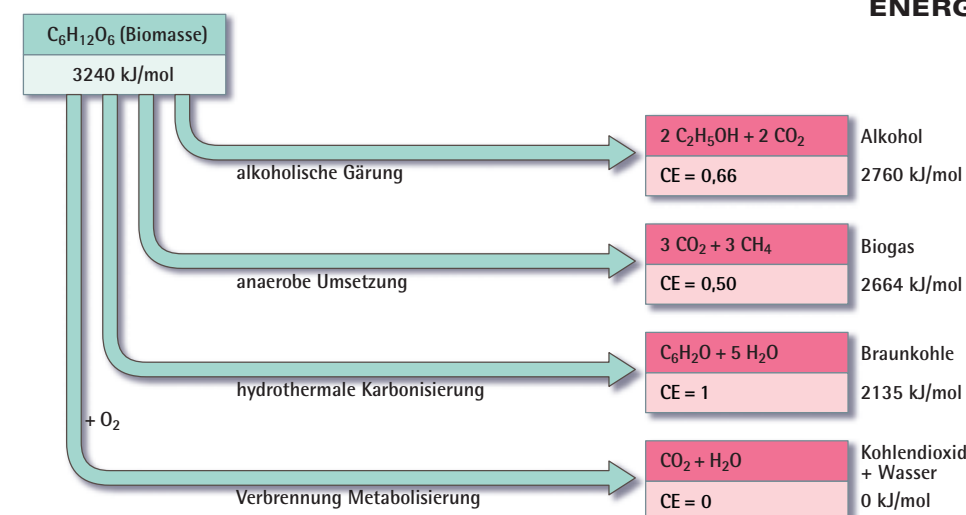
In der Tat ist die heutige Nutzung etwa als Kraftstoff nicht besonders effizient: Wenn man Biodiesel aus Ölfrüchten herstellt, erzeugt man letztlich rund 1300 Liter Kraftstoff pro Hektar Ackerland, weil man nur die Samen der Pflanzen verwendet. „Würde man eine schnell wachsende Pflanze dort anbauen, etwa Weidenholz, Schilf oder auch nur normalen Wald, und dann den Kraftstoff durch hydrothermale Karbonisierung aus der gesamten Biomasse herstellen, könnte man pro Hektar 14 Kubikmeter Sprit erzielen“, sagt Antonietti.

Das wäre das Zehnfache des oben genannten Werts. Allein in Deutschland fallen nach Schätzungen des Forschungszentrums Karlsruhe jährlich rund 70 Millionen Tonnen organische Trockensubstanz aus biogenen Rest- und Abfallstoffen an. Das würde für unsere Kraftstoffversorgung locker reichen.

Aber es kommt noch besser, denn Antonietti's Prozess kann noch viel mehr: Im Innern des Dampfkochtopfs verwandelt sich nicht Biomasse schlagartig in Kohle, sondern es laufen nach und nach Vorgänge ab, bei denen Zwischenprodukte entstehen. Und die sind mindestens ebenso nützlich wie das Endprodukt Kohlenstoff. Öffnet man das Gefäß schon nach wenigen Minuten, findet man eine Vorstufe zu Erdöl. „Man nimmt vom Zuckermolekül zum Beispiel nur drei, nicht fünf Wasser weg“, erklärt der Forscher. Das jetzige Intermediat ist noch zu reaktiv, aber mit einiger Forschungsarbeit hofft er es so weit zu zähmen, dass „wir auch direkt Öl aus Pflanzenabfällen machen können“.

Ein anderes Zwischenprodukt der hydrothermalen Karbonisierung ist technisch schon weiter ausgereift: Nach der flüssigen Phase entsteht im Innern des Druckgefäßes ein matschiger Feststoff, der nichts anderes ist als das, was wir im Gartencenter als Blumenerde kaufen: Humus. Die Potsdamer Chemiker sind mit ihrem Verfahren tatsächlich in der Lage, aus Pflanzenmaterial mit 100-prozentiger Kohlenstoffeffizienz reinen Mutterboden zu machen. Bei der natürlichen Kompostierung hingegen entstehen im Allgemeinen nur rund zehn Prozent Erde, der Rest entweicht als Methan und Kohlendioxid in die Luft. „Dies ist der wichtigste Prozess in der Natur, bei dem sich Energie verflüchtigt“, erklärt Markus Antonietti.

Unsere Fressfeinde sind sozusagen die Mikroben. Wenn wir etwas in den Wald werfen, Stroh, Blätter, Holz, dann ist das irgendwann einmal verschwunden; aber auch die damit verbundene Energie verschwindet. Wir



DER DRITTE WEG: Kohlenhydrate wie Zellulose, Stärke und Zucker sind Energiespeichermoleküle, bei deren Verbrennung viel Energie frei wird. Bei der Verflüssigung von Zucker zu Alkohol gehen schon theoretisch 15 Prozent der gespeicherten Energie verloren, auch werden zwei der sechs Kohlenstoffatome gleich wieder als CO₂ freigesetzt (Kohlenstoffeffizienz CE = 0,66). Bei der anaeroben Umsetzung, der Erzeugung von Biogas, gehen im Idealfall 18 Prozent Energie verloren, und die Hälfte des gebundenen Kohlenstoffs wird wieder freigesetzt. Sowohl alkoholische Gärung als auch Biovergasung sind jedoch biologische Prozesse, die nicht so effizient ablaufen, wie das die Theorie vorhersagt.

Der hier beschriebene Weg der hydrothermalen Karbonisierung bindet in einem chemischen Prozess nahezu 100 Prozent des ursprünglichen Kohlenstoffs als Kohle oder Mutterboden, wobei 66 Prozent des ursprünglichen Brennwertes erhalten bleiben, der Rest als Prozesswärme anfällt. Dieser dritte Weg ist überall dort sinnvoll, wo die direkte Verbrennung nicht möglich oder das entsprechende Material den biologischen Prozessen nicht ausreichend zugänglich ist.

haben zwar ein gutes Gefühl dabei, weil wir nicht sehen, was passiert, aber die Wahrheit ist: Wir erzeugen auf diese Weise gewaltige Mengen an Kohlendioxid und Methan. Markus Antonietti: „So gesehen ist der Wald nicht nur ein Segen für die Umwelt, sondern auch der größte Umweltverschmutzer der Welt!“

KOHLENDIOXID MIT NEGATIVER BILANZ

Wenn man hingegen den künstlich erzeugten Mutterboden dazu benutzen würde, um erodierte Flächen in Südspanien oder in den Tropen zu begrünen, könnte man mittels des Pflanzenwachstums große Mengen an Kohlendioxid aus der Luft binden. Damit hätte man dort eine negative CO₂-Bilanz. Johannes Lehmann von der Cornell University in Ithaca (USA) beschäftigt sich seit Jahren mit dieser Methode, brandgerodete Böden am Amazonas wieder fruchtbar zu machen – mit äußerst ermutigenden Ergebnissen. Lehmann und seine Mitstreiter verwenden bisher jedoch

Material, das durch Verkohlung mittels Pyrolyse hergestellt wurde.

Markus Antonietti ist stolz darauf, wie er und sein Team die Erfolge erreicht haben: „Wir haben alles der Natur abgeschaut, also den Begriff der Biomimese mit Inhalt gefüllt. Es ist der alte Trick: Wenn man etwas nicht weiß in einer Klassenarbeit, dann setzt man sich neben den Klassenbesten und versucht, von dessen Vorgehen zu lernen. Und wir leben ja in einem System, das seit Millionen von Jahren im Kreislauf funktioniert. Von seinen Regeln können wir viel lernen.“

Dass sich seine Ideen erst ganz langsam durchsetzen werden, darüber ist sich der Forscher im Klaren: „Ich würde mich freuen, wenn Leute kommen und sagen: Da möchte ich mitmachen. Besitzer einer kleinen Gartenfirma, die etwas ausprobieren wollen, dabei sein bei diesem Wandel der Werte. Mein Wunsch ist, dass Leute wieder eine Zukunft sehen, zu Mäzenen der Wissenschaft oder vielleicht selbst aktiv werden.“

BRIGITTE RÖTHLEIN www.filme.mpg.de