Strom, der aus Holz fließt

Sauber, effizient und zuverlässig soll Strom künftig entstehen – etwa in Brennstoffzellen, die letztlich mit Biomasse gefüttert werden. Den Weg vom Acker in die Steckdose ebnen Forscher des **Max-Planck-Instituts für Dynamik komplexer technischer Systeme** und der **Fraunhofer-Institute für Fabrikbetrieb und -automatisierung** sowie für **Keramische Technologien und Systeme**.

TEXT **ALEXANDER STIRN**

Ein Teil des Puzzles ist rostig, staubig und steckt in einem quietschgelben Plastikständer. Die Puzzlesteine sind verpackt in drei Dutzend Röhrchen – gut gefüllt mit einer rötlichen Substanz und beschriftet mit chemischen Formeln, Größenangaben, kryptisch anmutenden Zahlenkombinationen. Die Beschreibungen, mit einem dicken Filzstift auf die Röhrchen gekritzelt, sind nur von Experten zu entziffern.

Peter Heidebrecht nimmt eines der Puzzleteilchen. Er hält das Röhrchen ins Licht und schüttelt es vorsichtig. Das dreckig-rote Pulver staubt auf. „Dieser Stoff ist nur eine von vielen Optionen, die wir derzeit untersuchen", sagt der Verfahrenstechniker. „Aber gerade diese Vielfalt macht den Reiz des Projekts aus."

Das Projekt heißt ProBio, und bislang ist nur klar, was für ein Bild das gesamte Puzzle einmal ergeben soll, an dem Heidebrecht zusammen mit seinen Kollegen des Magdeburger Max-Planck-Instituts für Dynamik komplexer technischer Systeme seit drei Jahren arbeitet: Die Forscher wollen einen Weg weisen, um auf möglichst effiziente Art Strom aus Biomasse zu erzeugen. Wie die einzelnen Puzzleteilchen dabei aussehen müssen, vor allem aber wie sie zusammenpassen, stellt die Wissenschaftler noch vor einige Herausforderungen. Die Zusammensetzung des rötlichen Pulvers, das eine wichtige Substanz auf dem Weg zur Steckdose werden soll, zeigt dabei nur einen kleinen Ausschnitt eines noch viel größeren Puzzles.

Dass Biomasse künftig eine wichtige Rolle spielen wird, steht indes außer Frage. Schon heute deckt sie sieben Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland; unter den erneuerbaren Energien hat sie den mit Abstand größten Anteil. Bis zum Jahr 2020 sollen, so will es die Bundesregierung, 18 Prozent des deutschen Energiebedarfs aus regenerativen Quellen stammen. „Die Herausforderung, Biomasse in elektrischen Strom umzuwandeln, ist daher sehr aktuell und zukunftsträchtig", sagt Kai Sundmacher, Direktor am Magdeburger Institut und Sprecher von ProBio, eines gemeinsamen Projekts von Max-Planck- und Fraunhofer-Gesellschaft. „Auch wenn Biomasse nicht die alleinige Lösung für die Energieversorgung der Zukunft sein wird, kann von ihr ein wichtiger Beitrag ausgehen."

Die Wege hin zur Steckdose sind allerdings vielfältig. Biomasse lässt sich verbrennen, vergären, vergasen. Mit den entstehenden Produkten lassen sich Dampfturbinen, Gasmotoren oder Brennstoffzellen betreiben. Jede Variante hat ihre Vorteile, aber auch ihre Probleme. Manche Wege sind gut erforscht, andere noch immer technisches Neuland.

So wie die Brennstoffzelle, die im Mittelpunkt des ProBio-Projekts steht: Bei Brennstoffzellen handelt es sich um kleine Kraftwerke, sie setzen die in einem Gas gespeicherte chemische Energie direkt um, elektrischer Strom entsteht. „In dem gesamten Park von Energiewandlern, der uns zur Verfügung steht, versprechen Brennstoffzellen den höchsten Wirkungsgrad", sagt Peter Heidebrecht. Bislang werden solche Zellen meist mit Erdgas, Methanol oder reinem Wasserstoff gefüttert. Im Prinzip spricht aber nichts dagegen, sie auch mit sauberem Gas aus Biomasse zu füttern – falls die richtigen Puzzleteilchen zusammenkommen.

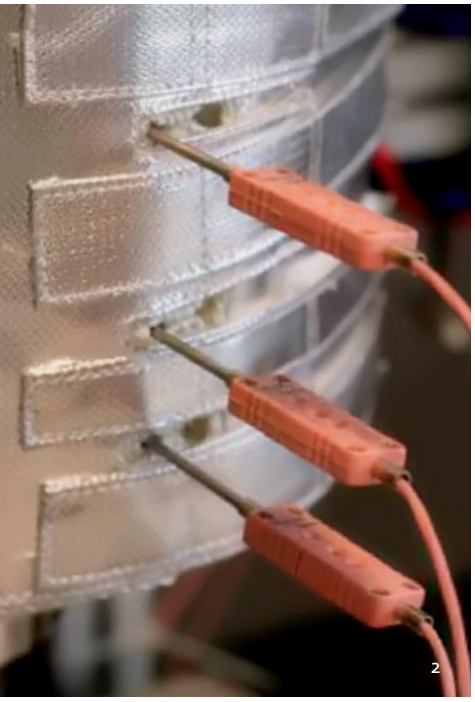
BRENNSTOFFZELLE ERHÖHT DIE STROMAUSBEUTE

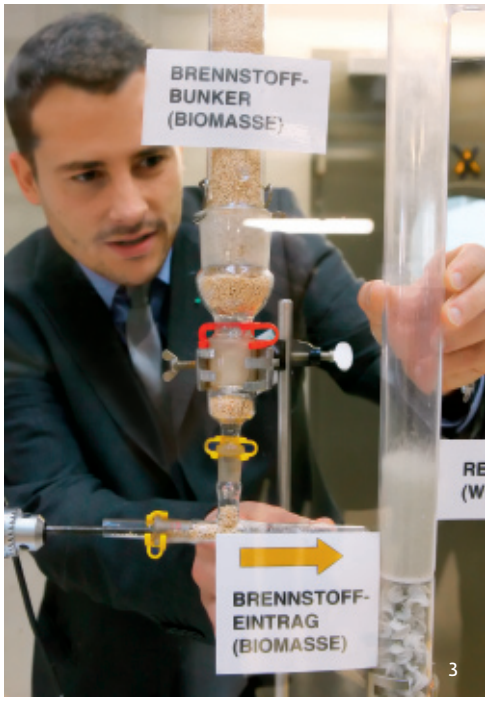
Auch bei der Behandlung der Biomasse geben sich die Max-Planck-Forscher nicht mit dem einfachsten Weg ab: „Die simple Verbrennung ist ausgereizt", sagt Heidebrecht. Bei ihr werden biologische Rohstoffe verfeuert, die freigesetzte Wärme wird zur Stromerzeugung genutzt. „Bei diesem Prozess gibt es Obergrenzen, die durch die Thermodynamik gesetzt sind und an denen man auch mit noch so guter Ingenieurskunst nicht rütteln kann", sagt Peter Heidebrecht.

Auch die Vergärung, bei der Mikroorganismen Biomasse unter Sauerstoffabschluss zersetzen und in Gase verwandeln, hat ihre Probleme: Ausgangsstoffe wie Holz oder Stroh enthalten einen hohen Anteil sogenannter Lignozellulose. Bakterien können mit dem Stoff kaum etwas anfangen. Er ist schwer verdaulich und stößt daher auf

Aus Holzabfällen oder Stroh möchten die Max-Planck-Forscher möglichst effizient Strom gewinnen.

Fotos: Bastian Ehl (unten), iStockphoto (oben)





wenig Gegenliebe. Außerdem verläuft der Prozess langsam – und daran ist auch nicht zu rütteln: „Die Biologie lässt sich nun mal nicht beliebig beschleunigen“, sagt Heidebrecht.

Bleibt also die Vergasung. Hier wird Biomasse unter hohen Temperaturen in ein nur teilweise verbranntes Gas umgewandelt. Das enthält viele energiereiche Komponenten wie Wasserstoff, Kohlenmonoxid und kurzkettige Kohlenwasserstoffe. Es ist daher für die Stromerzeugung gut geeignet. Zumindest in der Theorie.

Sascha Thomas öffnet einen Ofen, der mit seiner metallischen Lochblende an die glänzenden Auspuffrohre amerikanischer Lastwagen erinnert. Der Verfahrenstechniker koordiniert das ProBio-Projekt am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, das nur einen Steinwurf vom Max-Planck-Institut entfernt direkt an der Elbe liegt.

In dem vermeintlichen Auspuff steckt ein sogenannter Wirbelschicht-Vergaser, das Herzstück der Gaserzeugung für das ProBio-Projekt: Von unten strömt das Vergasungsmittel, zum Beispiel Wasserdampf, in die Apparatur. Es trifft auf eine Sandschicht, deren Teilchen so dimensioniert sind, dass sie vom Gas immer in der Schwebe gehalten und verwirbelt werden. „Das garantiert uns einheitliche Temperaturen und Konzentrationen in der Reaktionszone“, sagt Thomas. Genau dort wird auch die Biomasse zugeführt – über eine Förderschnecke. Die ist wassergekühlt, schließlich soll sich der Brennstoff erst in der 800 bis 850 Grad Celsius heißen Reaktionszone zersetzen und nicht schon vorher.

VIELFALT DER BIOMASSE MACHT DIE SACHE KOMPLIZIERT

Durch silbrig glänzende, isolierte Leitungen erreicht das auf diese Weise produzierte Brenngas die Analysegeräte des Fraunhofer-Labors. In einer späteren ProBio-Anlage soll es nach diversen Reinigungsschritten direkt in die Brennstoffzellen wandern. Dann wird auch alles viel größer sein. Ein Wirbelschichtvergaser für ein Kraftwerk mit mehreren Megawatt Leistung müsste einen Durchmesser von etwa einem Meter haben, das Rohr im Magdeburger Labor misst gerade einmal fünf Zentimeter. „Das reicht, um die Umsetzung der Biomasse in der Wirbelschicht zu studieren“, sagt Thomas. „Für eine Pilotanlage wäre die produzierte Brenngasmenge jedoch zu gering.“

Eigentlich ist die Wirbelschichtvergasung ja ein alter Hut. Bereits in den 1920er-Jahren wurde sie erdacht – damals um aus Kohle Synthesegas zu gewinnen. Schon bald aber machte die Erdölchemie diesen Prozess überflüssig. Verglichen mit biologischen Abfällen hat Kohle dennoch einen entscheidenden Vorteil: Ihr Hauptbestandteil ist immer der gleiche – Kohlenstoff. „Biomasse dagegen ist nicht gleich Biomasse“, sagt Thomas.

In durchsichtigen Behältern direkt neben dem Wirbelschichtofen stehen Holzpellets, Rapsstroh, Biomassekoks und Jatropha, ein vor allem in Asien als Biomasselieferant beliebtes Wolfsmilch-

Fotos: Dirk Mahler für Fraunhofer (oben und unten links), Peter Förster für Fraunhofer (unten rechts)

1 Volle Kontrolle: André Herrmann steuert am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung den Wirbelschichtvergaser, die mit metallisch glänzender Folie eingepackte Säule im Bildhintergrund.

2 Ein Detail des Vergasers mit Temperaturmessfühlern.

3 Versuch zum Anfassen: In dem Modellexperiment demonstriert Sascha Thomas das Prinzip, wie aus Biomasse ein Gas erzeugt wird. Ziel ist es, mit dem Gas eine Brennstoffzelle zu betreiben.

4 Prüfung für die Proben: In diesem Reaktor testet Liisa Rihko-Struckmann, wie effizient verschiedene Mischungen auf Eisenoxid-Basis Kohlenmonoxid in den Vergasungsprodukten unschädlich machen.

gewächs. Jeder Stoff wurde im Puzzlespiel namens ProBio ausgiebig getestet – mit verschiedenen Vergasungsmitteln, Temperaturen und Verweilzeiten im Wirbelbett. Jedes Mal unterschied sich die Zusammensetzung des Gases. Selbst die Jahreszeit, das Alter und die Lagerung des verwendeten Holzes wirken sich auf die Gasqualität aus. „Biomasse ist eben kein Reinstoff, sondern ein komplex zusammengesetztes Gemisch“, sagt Kai Sundmacher. „Das macht unser Vorhaben auch so interessant.“

Im Idealfall ist das Gas, das aus Sascha Thomas’ Ofen entweicht, farblos – und damit frei von Verunreinigungen. Meist schimmert es aber gelblich. Dann enthält es Teere, Stäube sowie Halogen- und Schwefelverbindungen. Allesamt Dinge, die Brennstoffzellen überhaupt nicht leiden können, die ihre Elektroden vergiften und deshalb aus dem Gas entfernt werden müssen.

Dazu dienen üblicherweise Wäschersysteme, in denen Düsen Wasser ins Gas sprühen und es schlagartig auf Zimmertemperatur herunterkühlen. Die Schadstoffe werden dabei ausgespült. Übrig bleiben kaltes Gas und lauwarmes Wasser. „Das Problematische daran ist, dass wir das Gas für die nächsten Schritte erst wieder auf 800 Grad Celsius erhitzen müssten“, sagt Peter Heidebrecht.

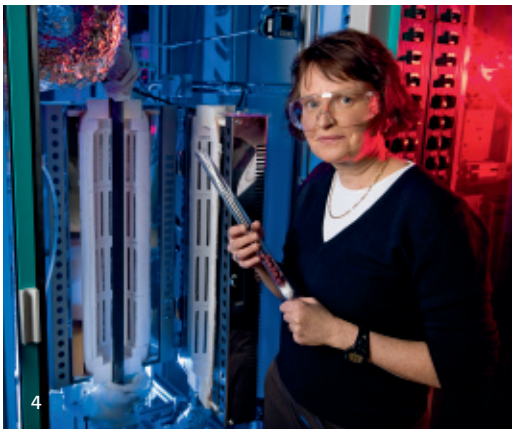
Die ProBio-Forscher haben sich für ihren Prozess daher eine andere Methode überlegt: Sie leiten das Gas durch eine Schüttschicht aus keramischen Kügelchen, an denen die Dreckpartikel haften bleiben. „Das funktioniert ähnlich wie beim Grundwasser, das durch Sandschichten sickert und dabei sauberer wird“, erklärt Sascha Thomas. Gleichzeitig werden die unerwünschten Teerverbindungen durch katalytisch aktive Schüttschichten in zusätzliches Brenngas umgewandelt – das steigert den Energiegehalt des Gases. Halogen und Schwefel werden schließlich mit Metalloxiden entfernt. Die reagieren bei höheren Temperaturen mit den giftigen Komponenten.

Übrig bleibt ein Gas, das sauberen Wasserstoff enthält, zusätzlich aber auch noch große Mengen an Kohlenmonoxid. Das ist gut oder schlecht – je nachdem, welchen Typ von Brennstoffzelle das Gas speist: Hochtemperatur-Brennstoffzellen (sogenannte Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) sind die robusten Allesfresser unter den Energiewandlern. Sie haben einen keramischen Elektrolyten, arbeiten bei etwa 800 Grad Celsius und können selbst aus Kohlenmonoxid noch Strom machen. Am liebsten laufen sie rund um die Uhr bei konstanter Belastung, kurzfristige Änderungen des Strombedarfs mögen sie dagegen nicht.

FUTTER FÜR VERSCHIEDENE BRENNSTOFFZELLEN

„Die Temperaturen im Innern der Zellen müssen sich innerhalb eines bestimmten Fensters bewegen“, erklärt Peter Heidebrecht. „Jeder Lastwechsel ändert dieses Temperaturprofil und kann den Zellen schaden.“ Zudem brauchen die Hochtemperatur-Brennstoffzellen, die im Rahmen des ProBio-Projekts vom Dresdner Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme untersucht werden, je nach Größe einige Stunden oder auch mehrere Tage, um auf Betriebstemperatur zu kommen.

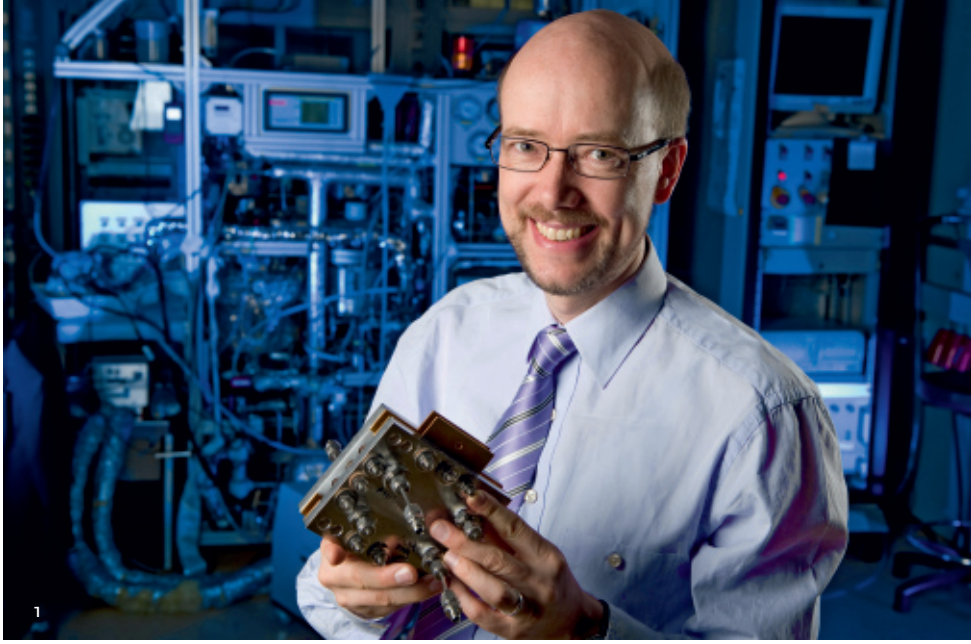
Ganz anders sieht das bei Niedertemperatur-Anlagen aus, sogenannten PEM-Zellen (Polymer Electrolyte Membrane). Sie sind die flexiblen Mimosen unter den Brennstoffzellen. Ihr Elektrolyt besteht aus einer Polymermembran und verträgt daher nur etwa 80 Grad Celsius. Dafür kann die Leistung der Zelle im Stunden- oder notfalls sogar Minutentakt an den wechselnden



Strombedarf angepasst werden. So viel Flexibilität wird allerdings teuer erkauft: Niedertemperatur-Brennstoffzellen vertragen so gut wie kein Kohlenmonoxid. Bereits eine Konzentration von mehr als 0,01 Promille vergiftet die Zelle nachhaltig. Die Leistung bricht dramatisch ein.

Auf der Suche nach dem passenden Teilchen im Brennstoffzellen-Puzzle half den Magdeburger Verfahrenstechnikern der Zufall – und ein staubiges rotes Pulver: „Eigentlich wollten wir nur das Kohlenmonoxid aus dem Brenngas entfernen“, erinnert sich Peter Heidebrecht. Bis zu 20 Prozent des – je nach Brennstoffzellentyp – giftigen oder nützlichen Stoffes kann der Gasstrom enthalten. Um ihm Herr zu werden, versuchten es die Forscher mit rötlich-dreckigem Eisenoxid, im Prinzip nichts anderes als Rost: Strömt das 800 Grad heiße Gas über solch ein Oxid-Pulver, gibt dieses die in ihm gespeicherten Sauerstoffatome teilweise an das Kohlenmonoxid ab. Es entsteht Kohlendioxid, das selbst einer Niedertemperatur-Brennstoffzelle nichts anhaben kann. Das Problem: Trotz aller Bemühungen bleiben noch immer große Mengen Kohlenmonoxid im Gas zurück. Zu große Mengen für eine PEM-Brennstoffzelle. Gleichzeitig

Foto: Bastian Ehl



verwandelt das Eisenoxid auch noch den dringend benötigten Wasserstoff in nutzloses Wasser.

Das Pülverchen erwies sich trotzdem als sehr nützlich, denn es hat eine ganz andere Stärke: Nachdem es sich seiner Sauerstoff-Atome entledigt hat, giert es nach Nachschub. Den kann zum Beispiel Wasserdampf liefern. Kommt der mit dem ausgelaugten Eisenoxid in Berührung, holt sich das Pulver den Sauerstoff aus den Wassermolekülen zurück. Übrig bleibt reiner Wasserstoff – ideal für eine Niedertemperatur-Brennstoffzelle.

GESUCHT: EIN HALTBARER STOFF FÜR DIE GASWÄSCHE

„Als wir das gesehen haben, war klar: So ein Verfahren eignet sich wunderbar zur Auftrennung des Gases“, erinnert sich Peter Heidebrecht. Im ersten Durchgang, wenn das Brenngas über das Eisenoxid strömt, bleibt eine Mischung übrig, mit der Hochtemperatur-Brennstoffzellen sehr gut leben können. Im zweiten Schritt, beim Fluten mit Wasserdampf, entsteht der nahezu reine Wasserstoff für die Niedertemperatur-Zellen.

Noch gibt es einiges zu tun: „Nimmt man nur Eisenoxid, belastet der Sauerstoffaustausch das Material sehr stark, die Ausbeute an Wasserstoff geht rasch zurück“, sagt Liisa Rihko-Struckmann, die zusammen mit Peter Heidebrecht das ProBio-Projekt am Max-Planck-Institut koordiniert. Deshalb stehen in dem quietschgelben Probenständer in den Magdeburger Laborräumen auch so viele unterschiedliche Pulver-Pröbchen. Manche enthalten nur die roten, ein bis fünf Zehntelmillimeter großen Eisenoxid-Partikel, einige bestehen zusätzlich aus Aluminium- oder Siliciumoxid, viel häufiger ist aber Cer-Zirkonium-Oxid im Spiel.

Jede Probe heizen die Forscher in einem Laborofen auf 800 Grad Celsius und testen sie anschließend mit einem sorgfältig gemischten Gas. „Aktuell achten wir besonders darauf, dass die Materialien stabil und lange einsetzbar sind“, sagt Rihko-Struckmann. Tausend Gas- und Wasserdampfzyklen sollten die Pülverchen schon aushalten.

Proben, die im Labor positiv auffallen, dürfen sich im Technikum, einem grauen Würfel am Nordende des Max-Planck-Instituts, bewähren. Dort haben die Ingenieure eine Versuchsanlage aufgebaut – ein beheizbares Stahlrohr, das sie auf etwa 20 Zentimeter Länge mit der Eisenoxidmischung füllen. Statt 250 Milligramm wie im Labor brauchen die Forscher hier 100 Gramm des Stoffes.

„Gerade sind wir dabei, aus unserem schönen feinen Pulver gröbere Partikel zu formen, um die herum das Gas strömen kann“, sagt Liisa Rihko-Struckmann. Dann wollen die Verfahrenstechniker untersuchen, wie sich das Gas im Pulver ausbreitet, wie sich der Sauerstoff in den Oxiden optimal ausnutzen lässt, wie die Schaltzeiten für den Wechsel zwischen Brenngas und Wasserdampf aussehen müssen. „Solche erzwungenen dynamischen Prozesse gehören zu den Dingen, mit denen sich unser Institut schon seit Langem beschäftigt“, sagt Kai Sundmacher.

Gasreiniger im Max-Planck-Technikum, Wirbel- und Schüttschichten im Fraunhofer-Institut, Brennstoffzellen in Dresden und in Magdeburg: Noch liegen die einzelnen Puzzleteilchen einer möglichen ProBio-Anlage weit verstreut. Zusammen kommen sie derzeit nur in den Schaltkreisen eines Computers: Dort lassen sich die Komponenten – auf Basis der im Labor gemessenen Werte – simulieren, kombinieren und gezielt verändern.

Mit den am Rechner ermittelten Verbesserungsmöglichkeiten geht es anschließend wieder zum Reaktor, „in

Fotos: Bastian Ehl (3)

1 Bio-Brennstoffzelle: Kai Sundmacher mit einer Niedertemperatur-Brennstoffzelle. Dass sich diese auch noch mit Brenngas füttern lässt, nachdem Gas aus der Biomasse bereits in eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle gespeist wurde, macht die Verwandlung in Strom besonders effizient.

2,3 Rost für die Gasreinigung: Mit dem feineren Eisenoxid haben die Forscher im Labor Kohlenmonoxid aus dem Brenngas entfernt (3), im Technikum haben sie den Prozess mit dem gröberen Granulat (2) im größeren Maßstab gefahren.

4 Auf der Suche nach dem richtigen Pulver: Peter Heidebrecht und Liisa Rihko-Struckmann testen, welches der verschiedenen Materialien das Brenngas für Hoch- und Niedertemperatur-Brennstoffzellen am effektivsten auftrennt.

der Hoffnung, dass alles so läuft, wie man sich das gedacht hat“, sagt Peter Heidebrecht und lacht: „Meist ist das beim ersten Mal natürlich nicht der Fall.“ Mit den neuen Erkenntnissen aus dem Labor füttern sie dann wieder das mathematische Modell, um das Experiment weiter zu optimieren. Ein ständiges Hin und Her, das sich langsam dem realen Kraftwerk annähert.

MODELLKRAFTWERK MIT IMMENSEM WIRKUNGSGRAD

Mehr als hundert verschiedene Varianten haben die Verfahrenstechniker im Rahmen von ProBio simuliert. Herausgekommen ist etwas, womit zu Beginn des auf drei Jahre angelegten Projekts niemand gerechnet hatte: In der optimalen Anlage arbeiten beide Brennstoffzellentypen parallel – vorausgesetzt, das rote Pülverchen kann auch im Praxiseinsatz das Brenngas in einen sehr reinen und einen weniger sauberen Gasstrom trennen. „Das ist eine Art Kombinationskraftwerk“, sagt Peter Heidebrecht. „Es liefert ein breites Produktspektrum aus elektrischer Grundlast, dynamischer Spitzenlast und gut nutzbarer Abwärme.“

Vor allem aber arbeitet es mit fast unschlagbarem Wirkungsgrad: Für ihre Simulation haben die Ingenieure ein Modellkraftwerk gewählt, in das Biomasse mit einem Heizwert von knapp 19 Megawatt gesteckt wird – das entspricht etwas mehr als einem Kilogramm Holz pro Sekunde. Dank Wirbelschichtvergaser, Reinigung in Schüttschichten, Wasserstoff-Abtrenner und parallelem Betrieb von Hoch- und Niedertemperatur-Brennstoffzelle würden am Ende knapp neun Megawatt an elektrischer Leistung herauskommen. Das entspricht einem elektrischen Wirkungsgrad von beinahe 50 Prozent; eine klassische Biogasverwertung über einen Ottomotor erreicht lediglich 35 Prozent. „Heutzutage wird schon eine Verbesserung um wenige Prozent bejubelt, weil sie auf Dauer hilft, sehr viel Energie zu sparen“, sagt Liisa Rihko-Struckmann.

Auch wenn das ProBio-Projekt, das die beiden Forschungsgesellschaften mit 4,2 Millionen Euro gefördert haben, Anfang des Jahres offiziell ausgelaufen ist, wollen die Forscher auf eigene Faust weitermachen. Am Magdeburger Fraunhofer-Institut entsteht gerade eine Pilotanlage, die im Sommer in Betrieb gehen soll. „Dann können wir die einzelnen Komponenten, zu denen wir jetzt schon Erfahrungen gesammelt haben, endlich zusammen und im größeren Maßstab untersuchen“, sagt Sascha Thomas.

Auch am Max-Planck-Institut, wo man sich ohnehin dem Studium komplexer chemischer Prozesse und der damit verbundenen Grundlagenforschung verschrieben hat, arbeiten die Wissenschaftler weiter an den einzelnen Puzzleteilchen– unter anderem an der Brennstoffzelle und dem staubigen

4

roten Pulver. „Der schönste Wirkungsgrad nutzt nichts, wenn die Geräte nur ein paar Stunden oder Tage durchhalten“, sagt Kai Sundmacher. Daher werden sie vor allem an den Betriebsbedingungen und Werkstoffen feilen, um die Lebensdauer deutlich zu verlängern. Die Forscher müssen im großen Puzzle namens ProBio also noch ein paar Teilchen passend machen. ◂

GLOSSAR

Lignozellulose
Zellulose, die durch Lignin stabilisiert wird. Sie bildet die Zellwand von Holzzellen, die dadurch gleichzeitig zug- und druckfest werden.

Wirbelschichtvergasung
erzeugt aus Kohle oder Biomasse brennbares Gas. Dabei werden die festen Bestandteile meist mit einem Trägermaterial verwirbelt und erhitzt. In einer chemischen Reaktion mit Wasserdampf oder einem anderen Vergasungsmittel entstehen unter anderem Wasserstoff und Kohlenmonoxid.

Synthesegas
Wasserstoff- und kohlenmonoxidreiches Gas, das bei der Vergasung von Kohle mit Wasserdampf entsteht und sich als Ausgangsstoff für chemische Synthesen eignet.

Solid Oxide Fuel Cell, SOFC
Die Festoxid- oder Hochtemperatur-Brennstoffzelle verdankt ihren Namen dem keramischen Material, das ihren Elektrolyten bildet und für Sauerstoffionen, nicht aber für Elektronen durchlässig ist. Sie erzeugt bei Temperaturen bis zu 1000 Grad Celsius sehr effizient Strom und reagiert unempfindlich auf Kohlenmonoxid.

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC
Die beiden Pole dieser Niedertemperatur-Brennstoffzelle trennt eine Membran, die nur von Protonen passiert werden kann. Die PEM-Brennstoffzelle ist in ihrer Leistung flexibel. Allerdings toleriert sie kaum Kohlenmonoxid, da dieses die Elektrodenoberflächen besetzt und sie damit für die Ausgangsstoffe der Zellreaktion unzugänglich macht.

Foto: Bastian Ehl