

Farbspiel im Labor: Lars Grunenberg, Bettina Lotsch und Julia Kröger (von links) untersuchen unter anderem, bei welchen Wellenlängen des Lichts ihre Fotokatalysatoren aus Wasser Wasserstoff erzeugen. Lars Grunenberg nimmt dabei eine Probe, um den Gasgehalt zu bestimmen.

64



# DIE LICHTWANDLER

TEXT: KARL HÜBNER

Die Sonne schickt mehr Energie auf die Erde, als die Menschheit benötigt. Forschende um Bettina Lotsch, Direktorin am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart, arbeiten an Materialien, die helfen sollen, dieses großzügige Angebot für viele Zwecke nutzbar zu machen – nicht nur für die Energiewende.

Dass aus Sonnenlicht elektrischer Strom werden kann, zeigt jede Fotovoltaikanlage. Wer aber diesen Solarstrom für die spätere Nutzung speichern will, muss damit erst eine separate Batterie laden, in der Regel auf Blei- oder Lithium-Ionen-Basis. Denn bisher gilt: Für das Erzeugen und das Speichern von Solarstrom sind ganz unterschiedliche Materialien und Bauteile notwendig. So gesehen, war es eine kleine Sensation, als eine Gruppe von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung 2018 über

ein Material berichtete, das beides konnte: Sonnenlicht in elektrische Energie umwandeln – und diese auch direkt speichern. „Solarzelle und Batterie in einem“, titelte das Institut damals auf seiner Website.

Der Stoff, mit dem der Coup gelungen war, heißt Polyheptazinimid (PHI) und gehört zur Substanzklasse der Kohlenstoffnitride. Dabei handelt es sich um polymerartige Moleküle, in denen Kohlenstoff- und Stickstoffatome sich streng abwechseln und dabei zu wiederkehrenden Mustern anordnen. Die molekularen Schichten selbst sind zweidimensional, lagern sich aber, ähnlich wie beim Grafit, Schicht für Schicht übereinander.

Bettina Lotsch forscht schon seit ihrer Dissertation an dieser Gruppe von Stoffen. Die Chemikerin leitet am Stuttgarter Max-Planck-Institut die Abteilung Nanochemie und ist Honorarprofessorin an der Ludwig-Maximilians-Universität in München und an der Universität Stuttgart. „Wir er-

forschen funktionale Materialien für die Energiekonversion und -speicherung“, erklärt Lotsch. „Manche davon sind regelrechte Alleskönner.“ So wie die Kohlenstoffnitride, die auch deshalb so interessant sind, weil sie sowohl sehr stabil als auch einfach, nachhaltig und günstig herstellbar sind.

Ein Material für eine Sonnenbatterie zu entwickeln, stand zunächst gar nicht auf der Agenda der Gruppe. Dass dies dann doch geschah, war, wenn man so will, eher ein Nebenprodukt der Forschung an einer anderen Eigenschaft von Kohlenstoffnitriden: ihrer Fähigkeit zur Fotokatalyse. So bezeichnen Chemiker es, wenn ein Stoff (Sonnen-)Licht absorbiert und mit der darin enthaltenen Energie eine chemische Reaktion anstößt. Die Fotokatalyse zählt zu den Forschungsschwerpunkten in Bettina Lotschs Abteilung. Bei den Versuchen ist eine wichtige Reaktion die Herstellung von Wasserstoff aus Wasser. Sie ist auch eine Modellreaktion für weitere

→

interessante Anwendungen der Fotokatalyse, beispielsweise bei der Synthese wichtiger Grundchemikalien aus Kohlendioxid oder Luftstickstoff. Wasserstoff ist aber auch deshalb interessant, weil er als sauberer Energiespeicher, Kraftstoff und grüner Rohstoff der Zukunft gilt. Nicht umsonst hat die Bundesregierung erst in diesem Juni eine „Nationale Wasserstoffstrategie“ verabschiedet, in welcher Wasserstoff als „wichtiger Baustein der Energiewende“ bezeichnet wird. Noch fehlt jedoch eine flächendeckende Infrastruktur für das entzündliche Gas. Hinzu kommt, dass Wasserstoff bisher weitgehend aus Erdgas hergestellt wird – und damit zum einen fossilen Ursprungs ist und zum anderen aus technischen Gründen nicht rein genug etwa für den

Einsatz in Brennstoffzellen. Zwar ließe sich der Energieträger mit regenerativ erzeugtem Strom auch elektrolytisch aus Wasser gewinnen. Noch günstiger und eleganter wäre es jedoch, Wasser direkt mit Sonnenlicht zu spalten. Mithilfe der Fotokatalyse also.

## Elektronen übertragen Energie auf das Wasser

Prinzipiell gelang dies schon vor fast 50 Jahren, mit Titandioxid als Fotokatalysator. Industrielle Bedeutung hat dieser Ansatz aber nie erlangt. Zu den aussichtsreicheren Kandidaten, die

heute im Fokus stehen, zählen auch die Kohlenstoffnitride. Wie ihr Einsatz in der Praxis aussieht, kann man jetzt in einem Stuttgarter Labor besichtigen. Dort steht eine grell illuminierte Glasapparatur, auf deren Boden sich ein helles Pulver in einer Flüssigkeit befindet. „Das Pulver ist ein Kohlenstoffnitrid, die Flüssigkeit ist Wasser, und das Ganze ist so hell, weil wir es von oben mit einem Sonnenlichtsimulator bestrahlen“, erklärt Filip Podjaski, Wissenschaftler aus der Gruppe von Bettina Lotsch.

Der Physiker erklärt auch, was prinzipiell passiert: „Das Licht regt bestimmte Elektronen des Materials an, sodass sie ihre Energie auf das Wasser übertragen und daraus Wasserstoff entwickeln können.“ Im Detail ist das

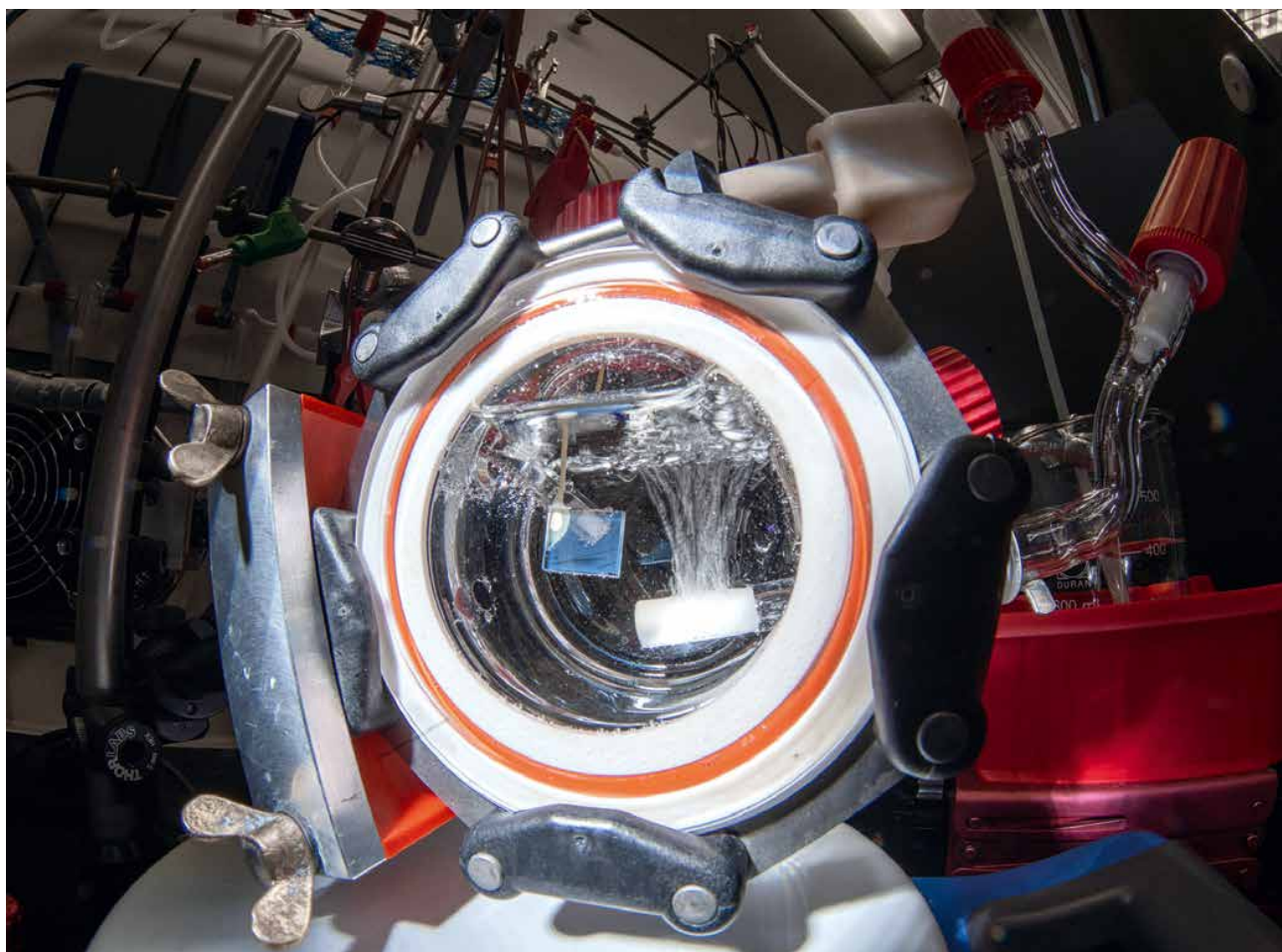


FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE FÜR MPG

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Fotokatalysatoren wie Polyheptazinimid (PHI) oder geeignete kovalente organische Gerüstverbindungen (COFs) treiben mit der Energie des (Sonnen-)Lichts chemische Reaktionen an und erzeugen etwa Wasserstoff aus Wasser.

PHI kann die Energie des Lichts speichern und zu einem beliebigen Zeitpunkt für eine chemische Reaktion oder auch als Strom bereitstellen.

Diese Eigenschaft könnte sich für eine Solarbatterie, die direkt durch Licht geladen wird, für die Produktion von Wasserstoff und von anderen Substanzen sowie für den Antrieb von Mikroschwimmern nutzen lassen.

Nanomaterialien im Prüfstand: In einem eigens entwickelten Reaktor analysiert das Stuttgarter Max-Planck-Team, wie effizient Fotokatalysatoren Wasserstoff produzieren. Die Gasentwicklung an der mit dem Katalysator beschichteten Elektrode (hellblau) ist nicht sichtbar. Die Gasblasen rühren vom Edelgas Argon her. Damit entfernen die Forschenden aus der Reaktionslösung Sauerstoff, der die Messung verfälschen würde.

allerdings nicht ganz so einfach. Zum einen muss die im absorbierten Licht enthaltene Energie groß genug sein, dass sie übertragen werden kann. Zum anderen müssen die Elektronen abgegeben werden, ehe sie in ihren Grundzustand zurückkehren und ihre Energie dabei wieder verlieren. Um Letzteres zu verhindern, setzen die Stuttgarter Forscherinnen und Forscher Substanzen zu, die gerne Elektronen abgeben, sogenannte Elektronen-Donoren. Auf diese Art wird der Grundzustand besetzt, und die angeregten Elektronen bleiben nutzbar. Und dann ist da noch der Co-Katalysator, ohne den kaum ein Wasserstoffbläschen aufsteigen würde. Er wirkt als Kuppler zwischen den Reaktionspartnern. Derzeit nutzen die Stuttgarter für die meisten Versuchszwecke das bewährte, allerdings seltene und teure Platin. Um aber für die spätere Praxis eine wirtschaftlichere und nachhaltigere Lösung zu entwickeln, arbeitet das Team auch an möglichen Alternativen.

Prinzipiell funktioniert die Wasserstoff-erzeugung im Labormaßstab schon gut. Doch noch sind eine Reihe technischer Fragen zu klären, ehe so ein Verfahren auch in kommerziell verfügbaren Anlagen flächendeckend zum Einsatz kommen kann. Am Rande dieser Forschung haben sich die Stuttgarter aber auch gefragt: Was passiert eigentlich, wenn wir den Co-Katalysator einfach weglassen? Der Theorie nach würden dann bei anhaltendem Lichteinfall immer weitere Elektronen energetisch angeregt, ohne mit sich und ihrer Energie irgendwohin zu können. „Üblicherweise geben die Elektronen ihre Energie dann ungenutzt wieder ab, indem sie in ihren Grundzustand zurückfallen, und es entsteht einfach nur Wärme“, sagt Filip Podjaski.

Doch bei einer Substanz war das anders: dem PHI. Sofern auch ein Elektronen-Donor anwesend war, behielten die Elektronen die Energie dauerhaft und reicherten sich im Material an. Und das sogar über mehrere Tage. So lange, bis die Wissenschaftler den

Co-Katalysator hinzugaben. Dann kam die Wasserstoffbildung sofort in Gang. Das Phänomen hat die Forscher elektrisiert. Denn nun schien es plötzlich möglich, Lichtabsorption und Katalyse zeitlich zu entkoppeln – ganz so also, wie es die Natur mit den Licht- und Dunkelreaktionen bei der Fotosynthese macht. Dabei wird zunächst Lichtenergie aufgenommen und in einem anderen Prozess Zucker produziert. Man könnte also die Energie zunächst tatsächlich wie in einer Batterie speichern und dann zu einem beliebigen Zeitpunkt, auch nachts, quasi auf Knopfdruck, für eine chemische Reaktion nutzen. In der Wissenschaftlergemeinschaft machte der paradoxe Begriff der „dunklen Fotokatalyse“ die Runde. Und die Idee der Sonnenbatterie war geboren.

## Wasserstoffantrieb ohne Tank

67

Seither arbeiten die Wissenschaftler daran, dem Lade- und Speichermechanismus auf die Spur zu kommen. Denn wie kann es überhaupt sein, dass sich so viele negativ geladene Elektronen auf engem Raum anreichern? Inzwischen wissen die Forschenden, dass positiv geladene Ionen aus dem Material selbst und aus dem umgebenden Wasser eine stabilisierende Rolle spielen.

Das Material, das Lichtenergie elektrisch speichern kann, könnte für verschiedene Anwendungen nützlich sein. Filip Podjaski etwa denkt an Wasserstoffantriebe, die ohne Wasserstofftank auskommen: „Per Licht könnte man im PHI jederzeit Elektronen anreichern, mit denen dann im gewünschten Moment der benötigte Wasserstoff aus Wasser produziert wird.“ Für Bettina Lotsch wiederum eröffnet der Batteriecharakter die Möglichkeit, „die gespeicherte Energie wahlweise auch elektrisch zu nutzen“. Mit einem einfachen Schalter könnte dann jeder Nutzer selbst regulieren, ob er mit der ge-

→



ladene Batterie gerade Wasserstoff fürs Auto erzeugen oder damit doch lieber Lampe und Kühlschrank betreiben will. Eine vielseitige Sonnenbatterie für jeden Haushalt. Die Möglichkeit, Lichtabsorption und Fotokatalyse zeitlich zu trennen, hat sich inzwischen noch bei einer ganz anderen Anwendung als fruchtbar erwiesen. Dabei handelt es sich um sogenannte Mikroschwimmer, an denen Kollegen vom Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme forschen (siehe *Max-PlanckForschung* 3/2016). Es hat sich gezeigt, dass man solche Mikroschwimmer auch aus Kohlenstoffnitridpartikeln konstruieren und die Fotokatalyse dann effizient für ihren Vortrieb in einer Flüssigkeit nutzen kann.

## Mikroschwimmer für Medizin und Umweltschutz

68

Die Forschenden wissen schon länger, dass so ein fotokatalytischer Antrieb funktioniert. Mit der Speicherbarkeit der absorbierten Energie im PHI haben sich aber völlig neue Möglichkeiten ergeben. „So ein Mikroschwimmer wird nicht nur durch direktes Licht angetrieben, er bewegt sich vielmehr auch im Dunkeln weiter fort“, so Bettina Lotsch. Die Chemikerin kann sich nun sogar vorstellen, dass sich derartige Mikroschwimmer eines Tages auch für den Einsatz im menschlichen Körper konzipieren lassen. Einmal aufgeladen, würden sie dann im (dunklen) Organismus weiterschweben. Eine Vision ist auch, solche Vehikel mit Medikamenten zu beladen, um diese an einen ganz konkreten Ort im Körper zu bringen. Und vielleicht, so Lotsch, könne ein Mikroschwimmer, der aus einem Fotokatalysator gebaut ist, den benötigten Wirkstoff sogar vor Ort, also am Krankheitsherd, aus dort vorhandenen Substanzen katalytisch herstellen.

Für Bettina Lotsch sind aber auch medizinische Anwendungen außerhalb

des Körpers denkbar. So könne die Fotokatalyse vielleicht dazu beitragen, bei Dialysen störende Stoffwechselprodukte im Blut chemisch abzubauen. Ähnliches sei für die Abwasserbehandlung vorstellbar. Quasi ein fotokatalytisch aktiver Schwimmer, der lichtgetrieben durch schmutzige Gewässer patrouilliert und unerwünschte Substanzen unschädlich macht. Solche Ideen wollen die Forschenden um Bettina Lotsch künftig gemeinsam mit ihren Kollegen am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme verfolgen.

Die Gruppe setzt bei der Fotokatalyseforschung aber nicht nur Kohlenstoffnitride wie das PHI ein. Große Erwartungen knüpfen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch an die sogenannten kovalenten organischen Netzwerke, kurz COFs (Covalent Organic Frameworks). Ähnlich wie die Kohlenstoffnitride bilden COFs großflächige Schichten, die sich dann übereinanderlagern. Sie zeichnen sich durch eine hohe Porosität aus, mit spezifischen Oberflächen, die je Gramm eine Größe von der Hälfte eines Fußballfeldes erreichen können. Für einen Fotokatalysator ist das perfekt, denn an genau dieser Oberfläche werden Reaktionen katalysiert.

Vor allem aber: COFs lassen sich prinzipiell aus fast beliebigen organischen Basismolekülen aufbauen, die lediglich ein paar Grundvoraussetzungen mitbringen müssen. Eine große Spielwiese also für das Moleküldesign. Für die Chemiker bringt das vor allem die Möglichkeit mit sich, einen COF über die Wahl der Bausteine hinsichtlich bestimmter Eigenschaften „maßzuschneidern“, wie Bettina Lotsch es formuliert. Das Absorptionsverhalten ist so eine gerade für die Fotokatalyse wichtige Eigenschaft. Und tatsächlich haben die Stuttgarter COF-Designer inzwischen Varianten geschaffen, die von Violett bis Orange absorbieren – und damit fast den gesamten sichtbaren Teil des Spektrums, der immerhin rund 50 Prozent der im Sonnenlicht enthaltenen Energie repräsentiert. Bei Kohlenstoffnitriden be-



schränkt sich die Absorption dagegen auf blaues Licht. Dass die Forschenden generell an Materialien mit breiter Lichtabsorption interessiert sind, hat einen einfachen Grund: Je mehr ein Fotokatalysator vom Sonnenlichtspektrum absorbiert, desto mehr Ladungsträger kann er auch für die Katalyse bereitstellen.

Zumindest potenziell. Denn um die absorbierte Energie am Ende wirklich zu verwerten, ist es auch wichtig, dass die Elektronen sie möglichst dauerhaft behalten und effizient weitergeben. Das gelingt mit den bisherigen COFs noch nicht so gut wie mit den Kohlenstoffnitriden. Aktuell arbeitet die Gruppe um Bettina Lotsch daran, dies durch die Wahl der COF-Bausteine zu ändern. Dann wäre eines Tages vielleicht auch möglich, was bisher mit noch keinem Covalent Organic Framework ge-



Auf der Suche nach dem optimalen Katalysator: Filip Podjaski, Bettina Lotsch, Lars Grunenberg und Julia Kröger (von links) diskutieren die elektronischen Prozesse, die bei der Wasserspaltung eine Rolle spielen. Das Verständnis der Vorgänge hilft ihnen, Materialien zu entwickeln, die dabei effizienter arbeiten.

69

lungen ist: das direkte, stabile Speichern von Sonnenenergie in einer ganz neuen Art von Batterie.

Bleibt die Frage der Nachhaltigkeit. Denn das Stuttgarter Team sucht nicht einfach nur funktionale Materialien, die etwas besonders gut können wie etwa die Fotokatalyse. „Wir wollen natürlich immer auch, dass sich diese Substanzen leicht und nachhaltig herstellen lassen, am besten aus erneuerbaren Rohstoffen“, stellt Bettina Lotsch klar. Kohlenstoffnitride sind vor diesem Hintergrund geradezu perfekt. Denn sie können leicht aus Harnstoff gewonnen werden – und damit aus einem natürlichen Rohstoff. COFs sind derzeit je nach verwendeten Bausteinen noch erdöl-basiert. Doch das muss nicht so bleiben. „Da es sich um organische Substanzen handelt, sind sie immer auch

potenziell erneuerbar“, betont Bettina Lotsch. Ihr Mitarbeiter Filip Podjaski erinnert in diesem Zusammenhang daran, dass die chemische Industrie aus historischen Gründen praktisch alle wichtigen Basischemikalien – und damit auch Folgeprodukte wie etwa die COF-Bausteine – letztlich aus dem Gemisch Wasserstoff/Kohlenmonoxid, dem sogenannten Synthesegas, gewinnt. Diese beiden bisher auf fossilen Quellen basierenden Komponenten wären aber auch fotokatalytisch aus Wasser und Kohlendioxid herstellbar. Einschließlich geeigneter Recyclingkonzepte sei mit den vielseitigen Lichtwandlern deshalb eine von Grund auf nachhaltige Kreislaufwirtschaft möglich, erklärt Podjaski. So gesehen, hätte die Fotokatalyse sogar das Zeug, eines Tages große Teile der Chemieproduktion ergrünen zu lassen.

## GLOSSAR

### GRUNDZUSTAND

Der elektronische Zustand eines Atoms oder eines Moleküls, in dem diese ein Minimum an Energie aufweisen. Durch sichtbares Licht passender Energie, also geeigneter

Farbe, werden Elektronen angeregt. Die aufgenommene Energie können sie auf unterschiedliche Weise abgeben und kehren dabei in den Grundzustand zurück.

### KOVALENTE ORGANISCHE GERÜSTVERBINDUNGEN

Englisch: Covalent Organic Frameworks – COFs –, sind aus organischen Bausteinen aufgebaut, weisen eine große spezifische Oberfläche auf und sind wegen der Vielfalt der Ausgangsstoffe in Aufbau und Zusammensetzung sehr variabel.

