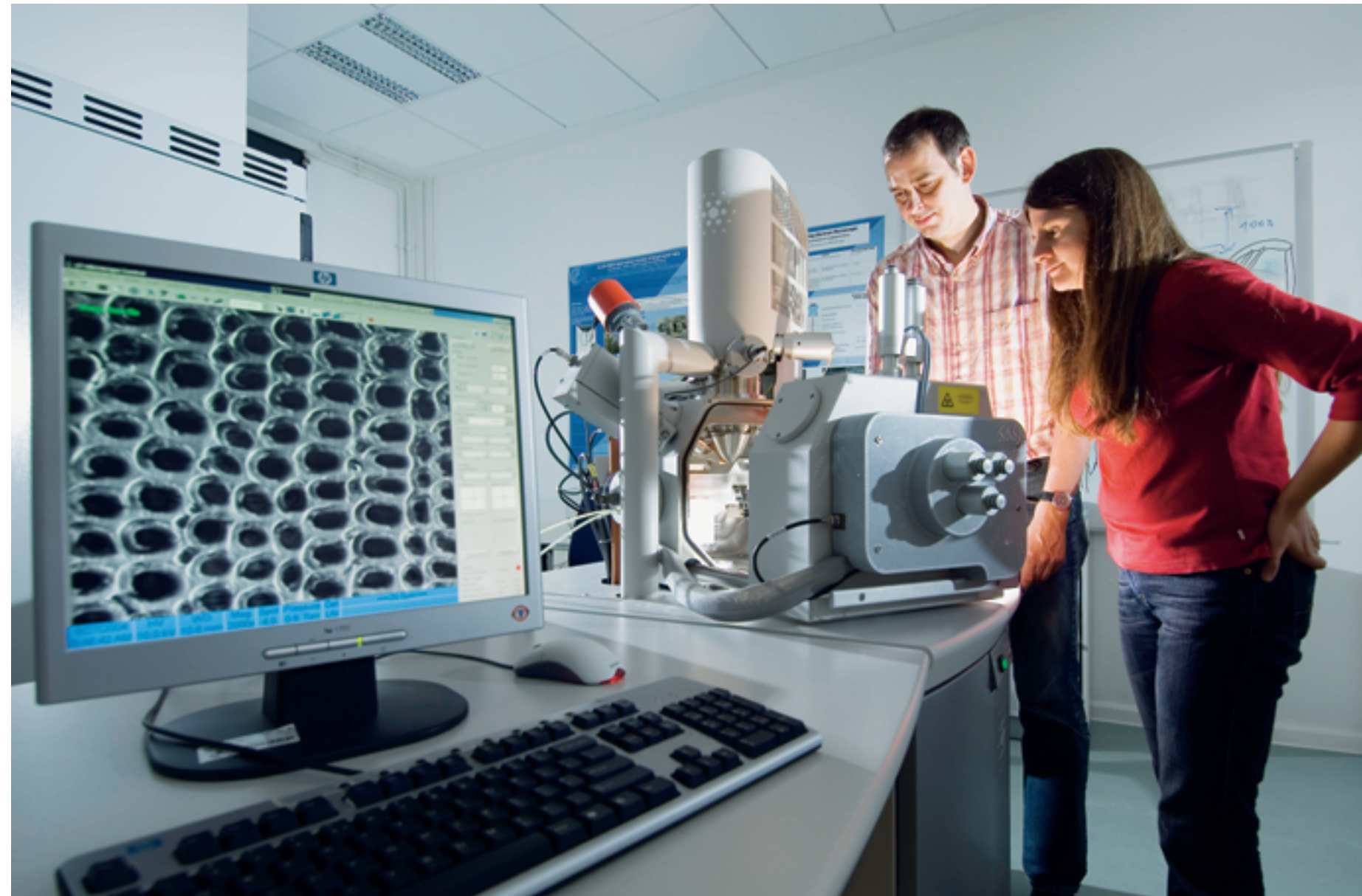


Bäume zeigen Muskeln

*Kraft ist nicht nur eine Sache von Muskelmasse – das beweisen Bäume, die ihre Zweige aufrichten, oder die Körner des wilden Weizens, die sich selber in die Erde bohren. Welche Materialien den Pflanzen diese Kraftanstrengungen ermöglichen, erforschen **PETER FRATZL** und seine Mitarbeiter am **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KOLLOID- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG**. Und nach den Prinzipien, die sie dabei entdecken, konstruieren sie künstliche Muskeln und besonders steife Werkstoffe.*

Bäume haben keine Muskeln, wenigstens keine aus Fleisch und Blut. Und doch: Sie stemmen die eigene Last und wachsen dem Himmel entgegen. „Wenn sich ein Zweig zum Ast entwickelt, wachsen Holzzellen, die Muskeln ähneln, um das zunehmende Gewicht zu tragen“, sagt Peter Fratzl, Leiter der Abteilung Biomaterialien des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Golm bei Potsdam. Die Holzmuskeln biegen den Stamm einer Fichte, die auf einem Berghang wächst, senkrecht nach oben. „Wir verstehen jetzt, wie die Bäume das machen“, sagt der Physiker.

Mit diesem Wissen haben die Forscher einen künstlichen Muskel entwickelt, den eine Änderung der Luftfeuchtigkeit in Bewegung umsetzt.



Um die winzigen Strukturen natürlicher Materialien zu untersuchen, rücken Ingo Burgert und seine Mitarbeiterin Antje Reinecke ihnen mit einer mächtigen Apparatur auf den Leib – einem Umwelt-Rasterelektronenmikroskop.

Die Entdeckung war kein Zufall: Die Wissenschaftler aus Golm suchen systematisch nach Erfindungen der Natur – Steilvorlagen, die Techniker in neue Antriebe, mikroskopisch kleine Ventile oder leichte und trotzdem robuste Werkstoffe verwandeln können. Für ihre Suche fahren die Wissenschaftler ein Arsenal von Laborgeräten und mathematischen Rechenmethoden auf; denn die Natur lässt sich nicht leicht in die Karten schauen.

Peter Fratzl erklärt, warum die Erfindungen der Natur so schwer zu kopieren sind: Dafür seien Organismen viel zu komplex aufgebaut. Beispiel Roboter: „Ihr Gang war früher zackig und wirkte unbeholfen“, sagt Fratzl. „Starre Schenkel und Gelenke reichen nicht aus, um den geschmeidigen Gang des Menschen nachzuempfinden.“ Dieser werde erst durch das ausgefeilte Zusammenspiel von steifen Knochen sowie elastischen Muskeln

FOTO: NORBERT MICHALKE

und Sehnen möglich. „Techniker mussten erst verstehen, welche Rolle die unterschiedlichen Komponenten des Bewegungsapparates spielen, bevor sie einen Roboter bauen konnten, der geht wie ein Mensch.“

Bloßes Kopieren ist noch aus einem anderen Grund selten möglich. „Die Natur bietet aus der Sicht des Ingenieurs nicht immer die beste Lösung“, sagt Fratzl. Zum Beispiel könnte ein Ingenieur auf die Idee kommen, einen

Knochen nachzubauen, um ein robustes und gleichzeitig leichtes Material zu gewinnen. Knochen sind aber nicht nur Stützpfeiler für den Körper, sondern dienen gleichzeitig als Ionen-speicher des Körpers und beherbergen das Knochenmark.

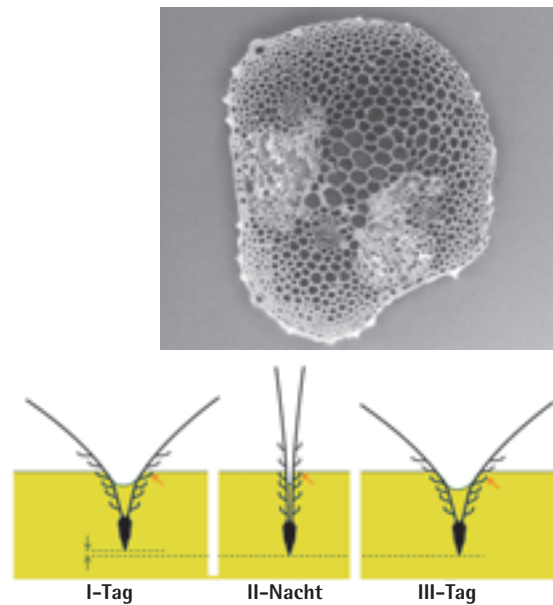
„Ein und dasselbe biologische Gewebe kann viele Funktionen haben“, sagt Fratzl. Knochen, Muskeln oder Äste sind Multitalente; die Antwort auf eine Unmenge von Problemen,

die während der Evolution auf den Organismus einstürzten. „Welchen Umweltbedingungen sich ein Gewebe während seiner Entwicklung anpassen musste, wissen wir nicht“, sagt Fratzl. Der niederländische Bioingenieur Rik Huiskes brachte dieses Problem auf den Punkt: „Wenn Knochen die Antwort sind, wie lautete die Frage?“

WASSER GIBT HOLZMUSKELN KRAFT

Welche seiner Aufgaben das biologische Gewebe bestmöglich erfüllt und welche sozusagen nur nebenbei bewältigt werden, wissen die Forscher erst einmal nicht. Um das herauszufinden, studieren die Wissenschaftler des Golmer Max-Planck-Instituts Pflanzenteile, Zellen oder Knochen unter Bedingungen, wie sie in der Natur herrschen. „Wir versuchen, den wesentlichen Kern einzelner Funktionen des Gewebes herauszuschälen“, sagt Fratzl. Diese Funktionsprinzipien können Ingenieure dann so abwandeln, dass die technische Lösung ihren Zweck bestmöglich erfüllt.

Dem Funktionsprinzip der Holzmuskeln sind die Wissenschaftler nun auf die Spur gekommen. Die Hülle der röhrenförmigen Holzzellen kann wie ein Schwamm Wasser aufsaugen. Möglich macht dies ein poröses Knäuel aus Hemizellulose, einem Makromolekül, ähnlich der Zellulose. Durch den Schwamm aus Hemizellulose zie-



Ein Samen bohrt sich durch: Die Anordnung der Zellulosefäden in seinen Grannen – oben ein Querschnitt, in dem zwei ungeordnete Bereiche zu erkennen sind – sorgt dafür, dass die Antennen strampeln, wenn die Luftfeuchtigkeit schwankt. Dank der Widerhaken schiebt sich das Korn in die Erde.

hen sich Fasern aus Zellulose wie die Tragkabel einer Hängebrücke. Die Fäden sind hunderttausendmal dünner als ein menschliches Haar, aber extrem steif, tragen also große Lasten, ohne sich zu dehnen. Sie sind etwa hundertmal steifer als der sie umgebende Schwamm, mit dem sie fest verbunden sind.

Wenn der Schwamm aus Hemizellulose Wasser einsaugt, quillt er. Die Zellulosefäden nehmen hingegen kein Wasser auf. Die Orientierung der Zellulosefasern entscheidet nun, ob sich die Holzzelle streckt oder zusammenzieht. Da sich die feuchten Zellulosefasern nicht dehnen, kann sich die Holzzelle nur senkrecht zu ihr ausdehnen. Liegen die Fasern also quer zum Ast, dehnen sich die Holzzellen in Längsrichtung des Astes aus. Wenn die Fasern hingegen fast parallel zum Ast laufen, geschieht etwas anderes: „Obwohl die Zelle insgesamt aufquillt, zieht sie sich in der Richtung des Astes zusammen“, sagt Ingo Burgert, einer der Wissenschaftler in Peter Fratzls Abteilung. Die feuchten Zellulosefasern verdrehen sich nämlich und werden kürzer. Zellen mit

solchen Fäden können also am Ast ziehen. „Nimmt die Last zu, die ein Ast tragen muss, bilden sich an seiner Oberseite ziehende Zellen und an seiner Unterseite drückende Zellen“, erklärt Burgert. Der lebende Baum versorgt die Zellen immer mit ausreichend Wasser, damit sie ihre Zug- oder Druckkraft aufrechterhalten können. Tote Äste hingegen saugen Feuchtigkeit aus der Luft. Diese Tatsache nutzen Menschen seit jeher für die Wettervorhersage: Dazu nageln sie einen fingerdicken Zweig auf ein Brett. Ein paar Zentimeter über sein Ende schnitzen sie das Wort Regen in das Brett, knapp darunter das Wort Sonne. Kündigt eine steigende Luftfeuchtigkeit Regen an, saugen sich die Zellwände der Holzzellen mit Wasser voll. Die Zellen an der Unterseite des Ästchens dehnen sich dann, während sich jene an seiner Oberseite weiter zusammenziehen. Der Zweig biegt sich mehrere Zentimeter nach oben.

STRAMPELN IM RHYTHMUS VON TAG UND NACHT

Und das, obwohl sich jede einzelne der Milliarden Holzzellen nur um wenige tausendstel Millimeter verlängert oder verkürzt. Die Golmer Forscher haben diese winzige Änderung mit einer hochauflösenden Videokamera verfolgt. Jetzt wollen die Wissenschaftler die Zellen noch genauer erforschen. „Wir wollen wissen, wie sich die Zellulosefasern verändern, wenn wir die Holzzellen dehnen“, sagt Burgert. „Die Bausteine, aus denen die Natur ihre Gewebe zusammensetzt, sind einzelne Moleküle. Uns interessiert der Zusammenhang zwischen mechanischen Eigenschaften wie Elastizität oder Biegefestigkeit und dem molekularen Aufbau des Gewebes.“

Um das herauszufinden, haben die Wissenschaftler eine Art Streckbank gebaut, in die sie einzelne Zellen spannen können. Während sie die Holzzellen darin dehnen, bestrahlen die Forscher sie zudem mit Laserlicht. Das gestreute Licht verrät ih-

nen, wie sich die Molekülketten unter der Belastung verändern. Mit einem Ultraschallmessgerät messen sie zudem die Steifigkeit von Pflanzenteilen. Und die Orientierung der Zellulosefasern bestimmen sie mithilfe der Röntgenbeugung.

Mit Röntgenstrahlen hat Rivka Elbaum auch einen weiteren Kraftakt der Natur erforscht, dessen Quell die Luftfeuchtigkeit ist, die tagsüber ab- und nachts wieder zunimmt: Die Humboldt-Stipendiatin hat am Golmer Institut aufgeklärt, wie sich Körner des wilden Weizens in die Erde bohren. Die zwei antennenartigen Fortsätze der Weizenkörner, Grannen genannt, strampeln dabei ähnlich wie die Hinterbeine eines Frosches, wenn auch viel langsamer – nämlich im Rhythmus der feuchten Nacht und des trockenen Tages.

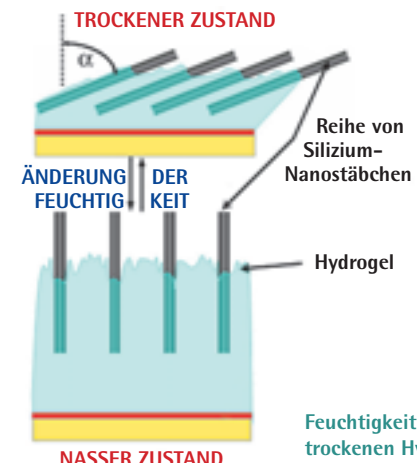
Die Grannen besitzen knapp oberhalb des Korns eine Art Gelenk, das aus ähnlichen Zellen besteht wie die Holzmuskeln. In den Zellen an der Innenseite des Gelenks sind Zellulosefäden parallel zur Granne angeordnet, an der Außenseite hingegen bilden sie ein wildes Knäuel. Wenn die Feuchtigkeit nachts zunimmt, saugt sich die Granne mit Wasser voll. Dadurch schwillt das geordnete Zellulosebündel an, wird aber nicht länger. Das ungeordnete Bündel hingegen dehnt sich in alle Richtungen aus – auch entlang der Grannen. Die Außenseite der Granne streckt sich auf diese Weise, und die Granne richtet sich auf. Beide Fortsätze liegen dann eng aneinander.

Tagsüber geschieht das Gegenteil: Die Antennen biegen sich auseinander. Das Strampeln im Tag-Nacht-Rhythmus allein reicht aber noch nicht, damit sich das Weizenkorn in die Erde graben kann. Zusätzlich tragen die Grannen winzige nadelartige Glashärchen, die alle vom Weizenkorn wegzeigen. Die Nadeln wirken wie Widerhaken, was auch deutlich zu spüren ist: Vom Korn weggestrichen fühlen sich die Grannen geschmeidig an; zum Korn hin ist der Widerstand der Härchen spürbar. Die Nadeln geben den Grannen Halt in

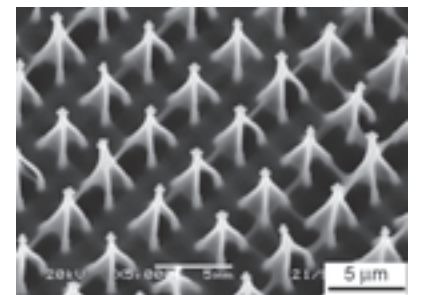
der Erde. Wenn sich die Antennen tagsüber auseinanderbiegen, schieben sich die Widerhaken ein Stück tiefer ins Erdreich. Strecken sich die Grannen dagegen nachts, verhaken sich die Glashärchen in der Erde, sodass sich der Samen ein Stückchen weiter in die Erde bohrt statt aus dem Boden herauszurutschen. Am nächsten Tag biegen sich die Grannen wieder auseinander, um den eingebauten Bohrer des Getreidekorns erneut zu spannen.

„Hinter den muskelähnlichen Holzzellen und den beweglichen Grannen steckt das gleiche Prinzip“, sagt Fratzl. „Die Zellen bestehen aus einer steifen, unflexiblen Komponente, die in ein elastisches Gel eingebettet ist. Beide Komponenten sind fest miteinander verbunden.“ Wenn das Gel trocknet und schrumpft, entsteht Spannung in dem Verbund wie in einem Netzwerk aus Gummifäden, wenn sich diese zusammenziehen. „Diese Spannung speichert Energie und kann deshalb Arbeit verrichten“, sagt der Physiker.

Techniker können aus unterschiedlichen steifen und flexiblen Komponenten aktive Materialien formen. Diese neuen Verbundwerkstoffe würden sich von bisherigen künstlichen Muskeln und Motoren grundsätzlich unterscheiden. „Material und Motor sind ein und dasselbe“, sagt Fratzl. Es sei keine aus Einzelteilen zusam-



Feuchtigkeit gibt künstlichen Muskeln Kraft. Nanostäbchen, die in einem trockenen Hydrogel gekippt liegen (links), richten sich auf, wenn Wasser das Gel quellen lässt. Nach diesem Prinzip packen auch die Greifer rechts zu.



mengesetzte Maschine. Zudem arbeitet das aktive Material selbstständig, es müsse nicht gesteuert werden. „Wie bei den Grannen könnte sich der Antrieb nach dem täglichen Feuchtigkeitszyklus richten“, sagt Fratzl. „Die Arbeit wäre zwar nicht beliebig abrufbar, aber sie würde auch nichts kosten.“ Fratzl kann sich vorstellen, dass aktive Materialien nach dem Vorbild der Holzmuskeln oder der Grannen einmal Solarzellen so drehen, dass sie dem täglichen Lauf der Sonne folgen.

Solche künstlichen Muskeln würden zwar nach einem ähnlichen Prinzip konstruiert sein wie die natürlichen Vorbilder der Pflanzen, könnten aber aus einem ganz anderen Material bestehen. Sie sollten es sogar, meint Fratzl. Denn Pflanzen und Tiere mussten im Laufe der Evolution mit wenigen Rohstoffen auskommen und mit den Umweltbedingungen, die sie vorfanden. „Die Natur kann beispielsweise keine Metalllegierungen herstellen, weil dafür oft tausend Grad Celsius nötig sind“, sagt der Physiker. Dem Ingenieur hingegen stehen viel mehr Rohstoffe zur Verfügung als einer Fichte auf einem kargen Berghang. Von diesem Vorteil machten Forscher des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung und der US-amerikanischen Bell Laboratories nun Gebrauch.

Sie entwickelten ein aktives Material, das von der Natur nur das Prinzip übernimmt: eine steife und eine weiche Komponente, die fest miteinander verbunden sind. Als steifen Teil wählten die Wissenschaftler Sili-

ziumstäbchen, die tausendmal dünner sind als ein menschliches Haar und nur wenige Tausendstel Millimeter lang. Die flexible Komponente erinnert an das Gel in den Pflanzenmuskeln: Es besteht aus einem Knäuel von Kunststofffasern, die Wasser aufnehmen können. Wissenschaftler sprechen von einem Hydrogel.

WIE SCHILFHALME IM WASSER

Wie das natürliche Gel schwillt es stark an, wenn es sich mit Feuchtigkeit vollsaugt. Das nasse Hydrogel verteilen die Forscher auf eine Glasunterlage zu einem wenige Tausendstel Millimeter dünnen Film. In das Gel stecken sie die Siliziumstäbchen, sodass sie wie Schilfhalme im Wasser stehen. Anschließend erhitzen sie die Probe leicht, damit sich die Stäbchen chemisch an das Hydrogel binden und fest verankert sind.

Wenn das Gel trocknet und sich zusammenzieht, kippen die Silizium-Nanostäbchen. Auf diese Weise verringern sie den Abstand untereinander und geben so dem Zug des schrumpfenden Hydrogels nach. Die Forscher beobachten, dass sich, ähnlich wie in einem Weizenfeld nach starkem Regen, Flächen bilden, in denen alle Stäbchen parallel liegen. „Wenn man den Hydrogelfilm mit abnehmender Dicke aufträgt, kippen sogar alle Nanostäbchen in die gleiche Richtung“, sagt Fratzl.

In einer Feuchtigkeitskammer steuern die Forscher den Wassergehalt des Hydrogels und damit den Kippwinkel der Siliziumstäbe. Die Stäb-

Abb.: MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung (3)



Inspiziert von der Natur: Peter Fratzl klärt auf, wie pflanzliche Maschinen funktionieren und warum Biomaterialien so stabil sind, und konstruiert nach diesen Prinzipien neue Materialien.



Foto: NORBERT MICHALKE

Da kann man sich was abgucken: Ingo Burgert untersucht, nach welchem Mechanismus sich Tannenzapfen öffnen.

chen richteten sich immer wieder auf, wenn die ursprüngliche Luftfeuchtigkeit wiederhergestellt wurde. Für eine technische Anwendung ist das sehr wichtig: Nur wenn die Bewegung umkehrbar ist, kann das neue Material einmal Arbeit verrichten – ansonsten gliche es einem verklemmten Zahnrad.

Nachdem sein erstes aktives Material funktionierte, ging das Forschungsteam einen Schritt über das Naturprinzip hinaus. Sie fragten sich, was passiert, wenn sich die Siliziumstäbchen verbiegen. Dazu stellten sie einen Rasen aus den Nanostäbchen her, dessen Halme fest mit einer Siliziumplatte verbunden sind. Zwischen den Stäbchen verteilten sie eine dünne Schicht Hydrogel, aus dem die Nanostäbchen etwa zur Hälfte herausragen.

Beim Trocknen des Gels passiert nun etwas Ähnliches wie bei einem dünnen Wasserfilm auf einer glatten Unterlage: Um seine Oberfläche zu verringern, bildet das Gel Tröpfchen. Die Tropfen schlüpfen zwischen jeweils vier Siliziumstäbchen. Wenn das Gel weiter trocknet, schrumpfen die Gelperlen und biegen die vier Siliziumstäbchen zueinander wie die Finger eines Greifers. Dieser mikroskopische Griff lässt sich ebenso öffnen, wie sich die gekippten, frei im Gel schwebenden Nanostäbchen wieder

aufrichten. „Derart komplexe Bewegungsmuster sind mit bisher entwickelten künstlichen Muskeln, bei denen Kunststoffteile mithilfe elektrischer und magnetischer Felder bewegt werden sollen, nicht möglich“, schrieben die Forscher im Januar 2007 im Wissenschaftsmagazin SCIENCE.

Die Golmer Forscher wollen nun eine ganz andere Funktion der muskelähnlichen Pflanzenzellen nutzen, die für den Bau von Flugzeugen oder Fahrrädern nützlich sein könnte. Zusammen mit dem Institut für Textil- und Faserforschung in Denkendorf bei Stuttgart und der Universität Freiburg entwickeln die Max-Planck-Wissenschaftler einen neuen Faserverbundwerkstoff, der zäher und bruchfester sein soll als bisherige Materialien dieser Art. Faserverbundwerkstoffe haben schon jetzt viel mit dem pflanzlichen Vorbild gemein: Steife Glas-, Kohlenstoff- oder Keramikfasern sind eingebettet in einen weichen Kunststoff. Die Fasern geben dem Material seine Festigkeit, der Kunststoff macht es formbar. Das Ergebnis ist ein leichter und gleichzeitig belastbarer Werkstoff. Die neue Boeing 787 etwa wird aus solch einem Kohlefaser-Verbundwerkstoff gebaut.

STRAPAZIERFÄHIGES DICKICHT

Doch ihr geringes Gewicht bringt auch einen Nachteil: Die Faserverbundwerkstoffe beginnen leicht zu schwingen. Vibrationen erzeugen nicht nur Lärm. „Sie sind Gift für ein Material“, sagt Markus Milwich, Wissenschaftler am Denkendorfer Textilforschungsinstitut. „Vibrationen machen den Werkstoff auf Dauer spröde, bis er irgendwann bricht“, erklärt der Ingenieur.

Obwohl Holzzellen ähnlich aufgebaut sind wie Faserverbundwerkstoffe, trotzen Bäume vielen Stürmen zäh und brechen nicht ohne Weiteres. „Pflanzenzellen verwenden einen Trick, um strapazierfähig zu bleiben“, sagt Ingo Burgert. Die Hemizellulosefäden des weichen Schwammes hängen fest an den stei-

fen Zellulosesträngen. Es gibt kurze und lange Fäden, die unterschiedlich weit in den Schwamm hineinragen. Das Dickicht der Hemizellulosefäden wird also mit zunehmendem Abstand von der Zellulosefaser immer lichter. Dadurch geht die Steifheit der Zellulosefasern allmählich in die Weichheit des sie umgebenden Schwammes über. Der Stamm bricht erst dann, wenn eine Unmenge der mikroskopischen Fäden gerissen sind.

Am Institut für Textil- und Faserforschung haben Ingenieure das Naturprinzip mithilfe von Siliziumoxid-Nanoteilchen nachempfunden. Sie tauchten Glasfasern in eine Nanopartikel-Lösung, bevor sie sie in Kunstharz einbetteten. Die Nanopartikel hefteten sich in einer dünnen Schicht an die Fasern. „Die Hülle aus Nanoteilchen ist weicher als die Glasfaser, aber steifer als das Harz“, sagt Milwich. Wie bei Pflanzen gibt es also einen Übergang zwischen steif und weich.

Die Wissenschaftler haben das neue Material getestet und wurden überrascht: Die Nanopartikel machten den Glasfaserwerkstoff nicht nur biegsamer. Sie bewirkten auch, dass sich die Teststäbe weniger leicht zum Schwingen bringen ließen. „Wir wollen jetzt versuchen, dem natürlichen Vorbild noch näher zu kommen.“ Sie wollen die Glasfasern in mehrere Hüllen von Nanopartikeln packen, deren Steifigkeit nach außen hin abnimmt, damit die Fasern allmählich in das Harz übergehen. Die Forscher hoffen, dass der Werkstoff Vibrationen dann noch besser dämpft.

Wenn das gelingt, könne der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen wesentlich kostengünstiger werden, sagt Milwich. „Im Flugzeugbau werden die Schwingungen mithilfe zusätzlicher Folien gedämpft“, sagt der Ingenieur. „Wenn der Verbundwerkstoff selbst das Schwingen unterdrückt, wäre dieser Aufwand nicht mehr nötig.“

Ingenieure entdecken also das Holz wieder. Nicht nur als Werkstoff, sondern vor allem als Ideenquelle.

CHRISTIAN MEIER