



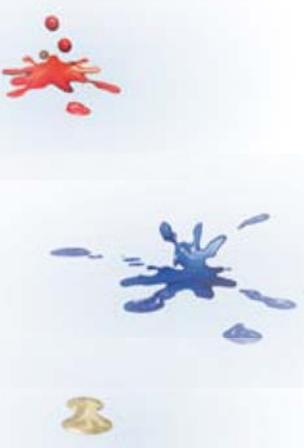
SELBSTREINIGENDE MATERIALIEN

Von der Fähigkeit der Lotuspflanze, Schmutz abzuweisen, haben Forscher gelernt, die Benetzbarkeit von Oberflächen in weiten Grenzen zu variieren. Anwendungen reichen von Stoffen, auf denen Flecken keine Chance haben, über Spiegel, die nicht beschlagen, bis zu Badeanzügen, die nicht nass werden.

Von Peter Forbes

Wilhelm Barthlott von der Universität Bonn, Entdecker und Entwickler des Lotuseffekts, hat eine Vision: Manhattan reinigt sich selbst; ein kleiner Regen genügt, um Fenster und Wände der Wolkenkratzer blitzsauber zu waschen. Anderswo sieht er Zelte und Markisen aus neuartigen Textilien, die ohne menschliches Eingreifen stets picobello bleiben. Tatsächlich gibt es schon Hemden, Blusen, Röcke und Hosen, die Ketchup, Senf, Rotwein und Kaffee abweisen.

Noch einen Schritt weiter gehen japanische Forscher: Sie entwickeln selbstdesodorierende und -desinfizierende Oberflächen, vor allem für Bäder und Krankenhäuser. Michael Rubner und Robert Cohen vom Massachusetts Institute of Technology im Cambridge können dagegen dafür sorgen, dass Spiegel im Bad nicht mehr beschlagen. Vor allem aber hoffen sie mit von ihnen erdachten Materialien den Strom von Flüssigkeiten zu steuern, die sich auf »Labors im Chip-Format« durch mikroskopisch schmale Kanäle bewegen. Kurzum: Bei den Oberflächenbeschichtungen bahnt sich eine Revolution an.



Vorbild selbstreinigender Materialien ist die anmutige Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera*), botanisch Lotos genannt, die große Bedeutung für Religionen und Kultur von Indien, Birma, China und Japan hat. Sie wird dort wegen ihrer außergewöhnlichen Reinheit verehrt. Die mehrjährige Pflanze wächst in schlammigem Wasser, aber wenn sie teils meterhoch über dem Nass ihre Blätter entfaltet, scheinen diese nie schmutzig zu werden. Wassertropfen glitzern darauf in unirdischer Weise, und der Regen wäscht Schmutz vom Lotus viel schneller ab als von jeder anderen Pflanze.

Genau das weckte in den 1970er Jahren die Neugier von Barthlott. Damals faszinierte den Forscher die neu aufgekommene Rasterelektronenmikroskopie, die plastische Bilder bis in den Nanometerbereich lieferte. Bei dieser Vergrößerung können Schmutzteilchen das Bild völlig verderben; deshalb mussten die Proben gründlich gereinigt werden. Wie Barthlott bemerkte, war das bei manchen Pflanzen – darunter dem Lotus – jedoch nicht nötig.

Der Bonner Wissenschaftler fragte sich nach dem Grund und fand heraus, dass der Effekt auf zwei Besonderheiten der Blattoberfläche beruht: einer Wachsschicht und winzigen, nur wenige Mikrometer dicken Noppen. Schon das Wachs allein sollte bewirken, dass die Blätter hydrophob sind, also Wasser abstoßen. Feuchtigkeitstropfen sind dadurch schmal und hoch, damit sie möglichst wenig Kontakt mit der Oberfläche haben (siehe Kasten unten auf S. 90). Auf einer hydrophilen Substanz breiten sie sich dagegen flach aus, um die Berührungsfläche zu maximieren. In diesem Fall beträgt der Winkel, unter dem der Tropfen auf das Material trifft, weniger als 30 Grad, wogegen er auf einer hydrophoben Fläche bei 90 Grad und mehr liegt.

Die zahllosen Wülste verstärken, wie Barthlott erkannte, den Effekt noch wesentlich. Dadurch wird das Lotusblatt superhydrophob mit einem Kontaktwinkel von über 150 Grad. Wasser bildet dann fast kugelförmige Tropfen, die wie Bälle abrollen. Es sitzt dabei oben auf den Beulen – wie ein Mensch auf einem Nagelbett. Die Luft, die zwischen dem Wasser und dem Blatt um die Buckel herum eingeschlossen ist, erhöht den Kontaktwinkel; diesen Effekt haben A. B. D. Cassie und S. Baxter schon in den 1940er Jahren entdeckt und in eine mathematische Gleichung gefasst.

Barthlott bemerkte, dass auch der Schmutz nur die Spitzen der Beulen auf dem Lotusblatt berührt. Regentropfen können ihn deshalb sehr leicht benetzen und dazu bringen, mit ihnen vom Blatt herunterzurollen. Dass mikroskopische Beulen der Reinlichkeit dienen, ist

ausgesprochen paradox. Normalerweise setzt sich Schmutz an Unebenheiten fest, weshalb sich glatte Flächen besser sauber halten lassen.

Als Botaniker erkannte Barthlott das enorme kommerzielle Anwendungspotenzial seiner Beobachtung nicht gleich. Erst in den 1980er Jahren wurde ihm klar, dass sich ein vielseitig nutzbarer künstlicher Lotuseffekt erzeugen ließe, wenn es gelänge, Gegenstände mit einer genoppten, wachartigen Schicht zu überziehen. Später meldete er die Idee, Flächen mit mikroskopischen Erhebungen zu versehen, um sie selbstreinigend zu machen, zum Patent an und ließ den Begriff »Lotus-Effekt« als Markenzeichen eintragen.

Ein Objekt so zu beschichten, dass es superhydrophob wird, war allerdings nicht leicht. Trotzdem gelang es Barthlott in den frühen 1990er Jahren, in Eigenproduktion einen Löffel zu kreieren, von dessen genoppter Silikonoberfläche Honig ohne Rückstände abtropfte. Dieses Produkt überzeugte schließlich einige große Chemiefirmen von der technischen Umsetzbarkeit der Idee. Mit ihren leistungsstarken Forschungsabteilungen fanden sie bald weitere Möglichkeiten, den Lotuseffekt zu nutzen.

Die bislang führende Anwendung ist der Fassadenanstrich Lotusan. 1999 von der Sto AG auf den Markt gebracht, wurde er ein großer Erfolg. Der Lotuseffekt ist heute in Deutschland ein allgemein bekannter Begriff. Im Oktober 2007 zählte die Zeitschrift »Wirtschaftswoche« seine kommerzielle Nutzung zu den 50 bedeutendsten »Innovationen, um die uns die Welt beneidet«.

Keine Angst mehr vor Tomatensoße

Hausfassaden verschmutzen nur langsam. Bei Kleidung ist das anders. Sie selbstreinigend zu machen, erscheint deshalb besonders attraktiv. Nach einer Versuchsphase schießen entsprechende Produkte inzwischen wie Pilze aus dem Boden.

Es begann mit Nano-Care. Dabei handelt es sich um eine Appretur für Gewebe, die der Erfinder und Unternehmer David Soane entwickelt hat und jetzt mit seiner Firma Nano-Text produziert. Halten Sie einen Pfirsich mit seiner flaumigen Oberfläche unter den Wasserhahn, und Sie erkennen den hydrophoben Effekt. Der Flaum von Nano-Care besteht aus winzigen Härchen, die an die Baumwollfäden angebracht sind. Sie messen weniger als ein Tausendstel der Höhe der Wülste bei Lotuspflanzen. Im Vergleich zu ihnen erscheinen die Fäden deshalb wie dicke Baumstämme.

Der Rivale von Nano-Text ist die Schweizer Firma Schoeller Textil AG, die ihre Technolo-

In Kürze

► Winzige Noppen auf einem Lotusblatt verwandeln seine wachartige Oberfläche in ein extrem wasserabstoßendes, **superhydrophobes Material**. Regentropfen können leicht darüber hinwegrollen und vorhandenen Schmutz mitnehmen.

► Wissenschaftler haben synthetische selbstreinigende Materialien entwickelt, die teils auf diesem Lotuseffekt basieren, teils aber auch die entgegengesetzte Eigenschaft – **Superhydrophilie** – nutzen. Manche katalysieren, wenn die Sonne darauf scheint, zudem den Abbau organischer Stoffe und töten so Bakterien ab.

► Zukünftige Produkte könnten all diese Eigenschaften kombinieren oder zwischen Superhydrophobie und -philie umschaltbar sein. Damit ließe sich etwa der Flüssigkeitsstrom durch **mikrofluide Komponenten** steuern.

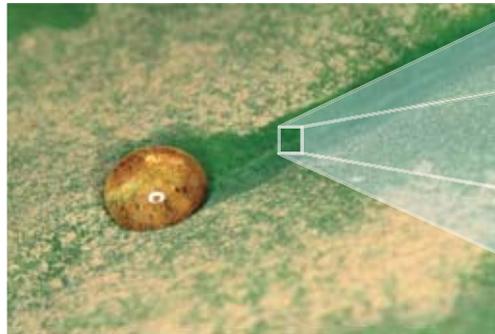


DER LOTUSEFFEKT

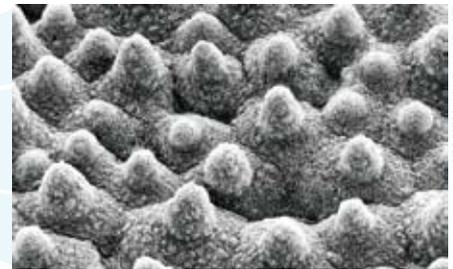
Die bemerkenswerte Eigenschaft des Lotusblattes, stets sauber zu bleiben, hat die Entwicklung selbstreinigender Materialien angeregt.



GETTY IMAGES / MACVET



Ein Wassertropfen rollt über ein Blatt, ohne hängen zu bleiben, und nimmt Schmutz mit.



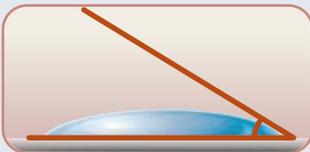
BEIDE FOTOS: WILHELM BARTHLOTT, NEES INSTITUT DER UNIVERSITÄT BONN

Wenige Mikrometer große Höcker auf der Blattoberfläche erzeugen den Wasser abstoßenden Effekt. Ein imprägnierender Überzug aus winzigen Wachskriställchen steigert ihn noch.

DIE PHYSIK DER LOTUSPFLANZE

Der selbstreinigende Effekt des Lotusblattes kommt daher, dass es eine extrem hydrophobe (Wasser abstoßende) Oberfläche hat. Ob ein Material hydrophob oder hydrophil (Wasser anziehend) ist, erkennt man an dem Winkel, den der Rand eines Wassertropfens mit ihm bildet.

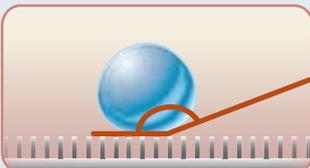
KONTAKTWINKEL



hydrophile Oberfläche: weniger als 30 Grad



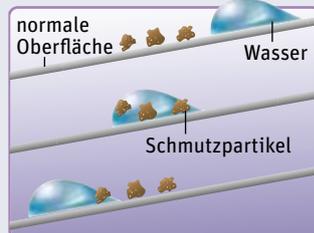
hydrophobe Oberfläche: mehr als 90 Grad



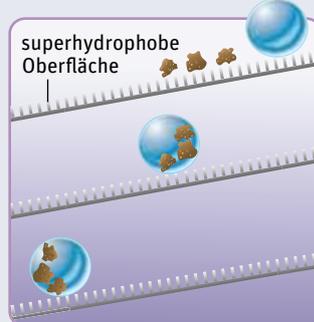
superhydrophobe Oberfläche: mehr als 150 Grad

Für den großen Benetzungswinkel sorgen Höcker, die Luft zwischen dem Wasser und der Oberfläche einschließen und so den Kontakt mit ihr minimieren.

WIE SICH DER LOTUS REINIGT



Von einer normalen Oberfläche (nicht stark hydrophil oder hydrophob) läuft ein Wassertropfen kriechend ab und lässt die meisten Schmutzteilchen an Ort und Stelle.



Von einer superhydrophoben Oberfläche rollt ein Tropfen herunter. Dabei nimmt er die Schmutzteilchen auf und führt sie mit sich fort; denn diese haben eine größere Affinität zum Wasser als zur Oberfläche.

ANN SANDERSON

gie NanoSphere nennt. Dabei sitzen winzige Siliziumdioxid- oder Polymerteilchen auf den Kleidungsfasern und verleihen ihnen eine lotusartige Rauigkeit.

Da mit vielen ungeprüften Behauptungen für Produkte der Nanotechnologie geworben wurde, haben Normungsinstitute jetzt strikte Tests für selbstreinigende Kleidung auf Basis dieser innovativen Verfahren eingeführt. Das Forschungsinstitut Hohenstein, das für Handel und Industrie weltweit Prüfung und Zertifizierung anbietet, bescheinigte NanoSphere-Textilien als ersten derartigen Geweben im Oktober 2005, eine ganze Reihe von Tests bestanden zu haben. Demnach stoßen sie Wasser wirksam ab und behalten nach normalen Waschvorgängen und den üblichen Abnutzungserscheinungen ihre besonderen Eigenschaften bei. Ich selbst war bei eigenen Tests an Proben von NanoSphere beeindruckt, wie sie ölige Tomatensoßen, Kaffee und Rotwein einfach ablaufen lassen und so einigen der schlimmsten Flecken vorbeugen.

Schmutz abweisende Kleidung ist sicher ein bedeutender Markt. Aber noch viel mehr Umsatz versprechen sich Experten von Marken, Planen und Segeln mit Lotuseffekt. Diese großen, im Außenbereich eingesetzten Gewebe verschmutzen schnell und lassen sich nur mühsam reinigen.

Superbenetzbarkeit

Die Erforschung des Lotuseffekts entwickelte sich mit der Zeit zu einem ganz neuen Wissensgebiet, das weit über die ursprüngliche Zielsetzung hinausreicht. Darin geht es ganz allgemein um Fragen der Benetzbarkeit, Selbstreinigung und Desinfektion. So stellte

sich heraus, dass nicht nur viele Wege zur Superhydrophobie führen, sondern auch ihr Gegenteil – Superhydrophilie – frappeurde Perspektiven eröffnet. Eine Schlüsselrolle spielte dabei das Mineral Titandioxid.

Berühmt geworden war es schon vor über vier Jahrzehnten durch eine Eigenschaft, die nichts mit Benetzbarkeit zu tun hat. Im Jahr 1967 entdeckte Akira Fujishima als Doktorand an der Universität Tokio, dass Titandioxid bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen kann. An einer solchen Fotolyse besteht großes Interesse; denn sie verspricht billigen Wasserstoff als Ersatz für die relativ teuren fossilen Energieträger, deren Vorräte begrenzt sind und bei deren Verbrennung zudem das klimaschädliche Treibhausgas Kohlendioxid frei wird. Fujishima und andere verfolgten die Idee deshalb mit großem Eifer, schafften es jedoch bisher nicht, einen kommerziell interessanten Wirkungsgrad zu erreichen.

Immerhin ergaben die Untersuchungen, dass Titandioxidfilme sehr geringer Dicke – im Mikro- bis Nanometerbereich – effizienter sind als größere Teilchen. Nachdem sich Fujishima mit seinem Universitätskollegen Kazuhito Hashimoto und Toshiya Watanabe von der Firma TOTO, einem Hersteller sanitärer Einrichtungen, zusammengetan hatte, entdeckten die drei 1990, dass wenige Nanometer dicke Titandioxidschichten bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht fotokatalytisch wirken: Sie zerlegen organische Verbindungen – auch solche in den Zellwänden von Bakterien – in Kohlendioxid und Wasser.

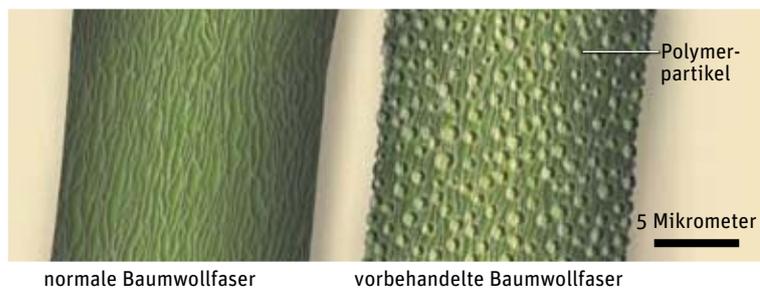
Diese Eigenschaft hängt damit zusammen, dass Titandioxid ein Halbleiter ist. Bei solchen Stoffen trennt eine verbotene Zone das so genannte Valenzband mit gefüllten Energieniveaus vom leeren Leitungsband. Lichtquanten können Elektronen über diese Bandlücke heben. Im Fall von Titandioxid erfordert das ein Photon aus dem Ultraviolettbereich mit einer Wellenlänge von etwa 388 Nanometern.

Bei dem Vorgang entstehen zwei mobile Ladungen: das Elektron, das in das Leitungsband gehievt wurde, und das Loch, das im Valenzband zurückbleibt und sich wie ein positives Teilchen verhält (siehe Kasten S. 92). Auf ihrer Wanderung können die beiden frei beweglichen Ladungen mit Wasser und Sauerstoff auf der Oberfläche von Titandioxid in Wechselwirkung treten und dabei Superoxid-anionen (O_2^-) und Hydroxylradikale (OH) erzeugen – hochreaktive chemische Spezies, die in der Lage sind, organische Verbindungen in Kohlendioxid und Wasser umzuwandeln.

Mitte der 1990er Jahre machten die drei japanischen Forscher eine weitere bedeutende

SO BLEIBT MAN STETS SAUBER

Die Industrie hat Textilien entwickelt, die dank ihrer superhydrophoben Oberfläche ähnlich wie das Lotusblatt wässrige Flüssigkeiten und Speisereste abweisen, so dass keine Flecken entstehen (oben). Für diesen Effekt ist eine Vorbehandlung der Baumwollfasern nötig. Beispielsweise können Teilchen von einigen 100 Nanometern Durchmesser darauf angebracht werden (unten rechts). Inzwischen gibt es viele andere Produkte wie Fassadenfarben und Dachziegel, die mit Noppen im Mikro- oder Nanobereich versehen sind und so den Lotuseffekt zeigen.



Entdeckung. Sie stellten aus einer wässrigen Suspension von Titandioxidteilchen einen dünnen Film her, temperten ihn bei 500 Grad Celsius und bestrahlten ihn schließlich mit ultraviolettem Licht. Daraufhin zeigte er die außergewöhnliche Eigenschaft vollständiger Benetzbarkeit: Der Kontaktwinkel für Wasser wie Öl betrug null Grad.

Was war der Grund? Das Ultraviolettlicht entfernte einige der Sauerstoffatome an der Oberfläche des Titandioxids. Dadurch entstand ein Mosaik von nanometergroßen Bereichen, die Hydroxylgruppen anlagerten, was die Superhydrophilie hervorrief. Die Flächen außerhalb dieser Bereiche waren für die hohe Affinität zu Öl verantwortlich. Der Effekt hielt einige Tage an, verschwand jedoch allmählich, wenn das Titandioxid im Dunkeln aufbewahrt wurde.

Obwohl die Superhydrophilie das genaue Gegenteil der Wasser abweisenden Eigenschaft der Lotusblätter ist, stellte sich heraus, dass sie ebenfalls zur Selbstreinigung dienen kann: Indem sich das Wasser über die ganze Fläche ausbreitet, bildet es eine durchgehende Schicht, die beim Fließen Schmutz mitneh-

LIEBE-HASS-BEZIEHUNGEN

Einige Oberflächen, die das Spektrum von Wasser liebend bis Wasser hassend überspannen, und ihre Kontaktwinkel:

- **superhydrophil:** dünne Filme aus Titandioxid, 0 Grad
- **hydrophob:** Teflon, 100 Grad
- **superhydrophob:** Lotusblätter, 160 Grad

men kann. Die Oberfläche beschlägt auch nicht; denn das kondensierte Wasser verteilt sich gleichmäßig auf ihr, statt die Tausende winziger Tropfen zu bilden, aus denen Nebel besteht. Beschichtungen mit Titandioxid wirken dank ihrer Fähigkeit zur Fotokatalyse außerdem desodorierend und desinfizierend, weil das Material in ultraviolethaltigem Sonnenlicht organische Stoffe und Bakterien zerstört. Das Geschäft mit ihnen ist schon angefallen. So produziert TOTO eine Reihe von fotokatalytischen selbstreinigenden Produkten wie Keramikfliesen für Außenwände und lizenziert das Verfahren weltweit.

Da Nanobeschichtungen mit Titandioxid transparent sind, lag die Entwicklung von be-

handeltem Fensterglas nahe. Den Anfang machte 2001 Pilkington, der größte Glashersteller Großbritanniens, mit der Vermarktung des von ihm entwickelten Activ Glass. Üblicherweise werden Glasscheiben bei 1600 Grad Celsius auf einem Bett aus geschmolzenem Zinn hergestellt. Pilkington bedampft sie in der folgenden Abkühlphase mit Titanetetrachlorid, wodurch eine weniger als 20 Nanometer dicke Schicht aus Titandioxid entsteht. Activ Glass dürfte schnell Gewächshausdächer und die Außenspiegel von Fahrzeugen erobern.

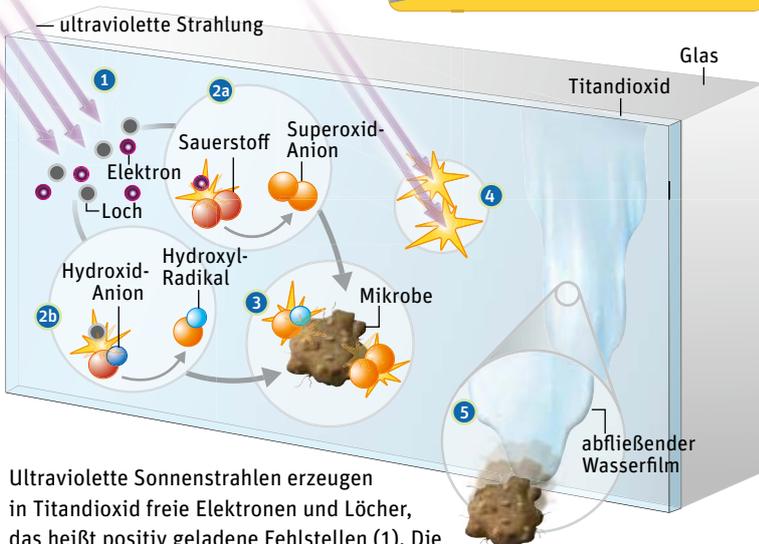
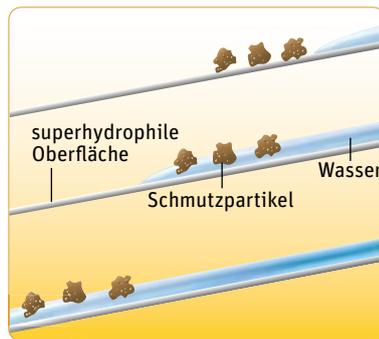
Leider blockiert normales Fensterglas Ultraviolettlicht, weshalb die Nanoschichten aus Titandioxid in Innenräumen weniger gut wirken. Das Material lässt sich jedoch mit Spuren anderer Substanzen versetzen, ähnlich wie Silizium und verwandte Halbleiter für die Elektronik dotiert werden. Das verringert die Bandlücke, so dass auch längerwellige Innenbeleuchtung die Fotokatalyse in Gang setzen kann. Schon 1985 entdeckte Shinri Sato von der Universität Hokkaido (Japan) durch einen glücklichen Zufall den Nutzen der Dotierung von Titandioxid mit Stickstoff, wobei sich auch Silber für den Zweck eignet. Die technische Umsetzung und industrielle Verwertung erfolgte jedoch erst in den letzten Jahren.

Dank seiner antibakteriellen und desodorierenden Eigenschaften dürfte dotiertes Titandioxid Eingang in Küchen und Bäder finden. Auch für selbstreinigende Textilien bietet es sich an – vor allem wegen seines zusätzlichen Vorteils, Gerüche zu beseitigen. Inzwischen wurden bereits Verfahren entwickelt, den Halbleiter auf dem Gewebe anzubringen – unter anderem direkt über chemische Bindungen.

SELBSTREINIGENDES TITANDIOXID

Dünne Beschichtungen aus UV-bestrahltem Titandioxid zeigen die genau entgegengesetzte Eigenschaft des Lotusblattes – Superhydrophilie –, weisen jedoch ebenfalls Schmutz ab und wirken zudem antimikrobiell.

Wasser überzieht einen superhydrophilen Stoff mit einem geschlossenen Film, der als Ganzes fließt und dabei Schmutz mitnimmt. Superhydrophilie verhindert auch das Beschlagen einer Oberfläche, weil sich das Wasser gleichmäßig darauf verteilt und nicht die unzähligen winzigen Tröpfchen bildet, aus denen Nebel besteht.



Ultraviolette Sonnenstrahlen erzeugen in Titandioxid freie Elektronen und Löcher, das heißt positiv geladene Fehlstellen (1). Die Elektronen bilden mit Sauerstoffmolekülen aus der Luft negativ geladene Superoxidanionen (2a) und die Löcher mit Hydroxid-Anionen im Wasser neutrale Hydroxylradikale (2b). Diese hochreaktiven Spezies töten Mikroben und zerstören organische Stoffe auf der Oberfläche (3). Die UV-Strahlung verändert auch die Struktur des Titandioxidfilms, so dass er superhydrophil wird (4) und es Wasser ermöglicht, Schmutz abzuwaschen (5).

Konvergenz der Gegensätze

Die von der Lotusblume inspirierten Materialien und die dünnen Titandioxidschichten sind Beispiele für Extreme, die in unserer Alltagswelt – wo nach den Worten des englischen Dichters Philip Larkin (1922–1985) »nichts wieder wie neu oder ganz sauber gewaschen« wird – selten in reiner Form auftreten. Lange Zeit waren die jeweils eingesetzten Methoden und Materialien völlig verschieden, und Untersuchungen zur Hydrophobie und zur fotokatalytischen Hydrophilie wurden getrennt durchgeführt. Doch neuerdings kommt es zu einer bemerkenswerten Konvergenz: Forscher sind bestrebt, die beiden Effekte zu kombinieren oder mit sehr ähnlichen Materialien hervorzubringen – ja sie arbeiten sogar an der Entwicklung von Strukturen, die sich zwischen Superhydrophobie und -philie hin- und herschalten lassen.

Eine Vorreiterrolle spielten wieder die Titandioxid-Pioniere Fujishima, Watanabe und

Hashimoto. Im Jahr 2000 testeten sie, ob Titandioxid die Haltbarkeit von Flächen mit Lotuseffekt erhöhen könnte. Auf den ersten Blick scheint das widersinnig. Der Halbleiter sollte wegen seiner fotokatalytischen Aktivität die Wachsbeschichtung der Lotusoberflächen angreifen und so die Superhydrophobie aufheben. Doch der Versuch zeigte das Gegenteil: Bei Zugabe einer winzigen Menge Titandioxid hielt der Lotuseffekt erheblich länger an, ohne dass der große Benetzungswinkel, den man für die Wasser abstoßende Wirkung braucht, wesentlich abnahm.

Im Jahr 2003 entdeckten die Arbeitsgruppen von Rubner und Cohen, wie geringfügige Änderungen darüber entscheiden können, ob eine superhydrophobe oder eine superhydrophile Oberfläche entsteht. Damals hatte Rubner, wie er sich erinnert, auf einer Konferenz in China von neuen superhydrophoben Strukturen erfahren, die ihn elektrisierten. Nach seiner Rückkehr ermunterte er Mitarbeiter zu dem Versuch, sie nachzubauen. Sein Team hatte eine Methode entwickelt, um Schicht für Schicht dünne Filme aus so genannten Polyelektrolyten herzustellen. Normale Elektrolyte wie Kochsalz oder Schwefelsäure spalten sich beim Lösen in Wasser in positiv und negativ geladene Ionen auf. Als Polyelektrolyte bezeichnen Chemiker organische Polymere, die positiv oder negativ geladene Gruppen tragen. Rubner und Cohen stapelten im Wechsel Schichten aus Polyallylaminhydrochlorid (mit positiv geladenen Ammoniumgruppen) und Siliziumdioxidteilchen (mit angelagerten negativ geladenen Hydroxidgruppen) übereinander. Schon früher hatten sie mit Überzügen aus solchen Partikeln die raue Oberfläche des Lotusblatts nachgeahmt.

Um die Superhydrophobie zu erzeugen, beschichteten die Forscher den fertigen Stapel dann mit wachsartigem Silikon. Wie sie zu ihrem großen Erstaunen feststellten, war die Schichttorte vor diesem letzten Schritt jedoch superhydrophil. Die Siliziumdioxidlagen hatten ein riesiges Labyrinth von Nanoporen geschaffen – eine Art Schwamm, der jegliches Oberflächenwasser sofort aufsaugte. Deshalb beschlägt das Multischichtsystem auch nicht, selbst wenn man es über einen dampfenden Kochtopf hält. Sind die Poren gesättigt, beginnt das Wasser über die Kante abzulaufen, und sobald wieder trockenere Bedingungen herrschen, verdunstet es langsam aus den Hohlräumen.

Da Glas hauptsächlich aus Siliziumdioxid besteht, lassen sich solche Mehrschichten leicht darauf anbringen. Sie verhindern nicht nur das Beschlagen, sondern sind auch transparent und noch dazu antireflexiv – also ideal für Brillen. Im Gegensatz zu Titandioxid

funktionieren sie im Hellen wie im Dunkeln. Kein Wunder also, dass Rubners Gruppe mit Industriepartnern an ihrer Vermarktung arbeitet. Außer für Brillen eignen sie sich zum Beispiel für Badspiegel sowie Windschutzscheiben, die an einem kalten, nassen Wintermorgen kein Gebläse mehr brauchen.

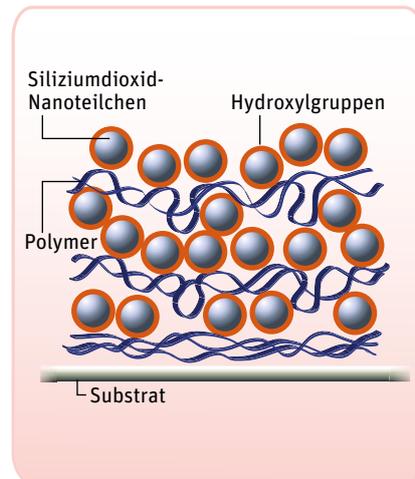
Ein cleverer Käfer

Millionen von Jahren vor der technischen Verwertung von Lotuseffekt und Superbenetzbarkeit nutzte ein kleiner Käfer in der Wüste Namib beides schon für einen ganz anderen Zweck: das Sammeln von Wasser. In der extrem trockenen und heißen Küstenregion in Südwestafrika sind dicke Morgennebel,

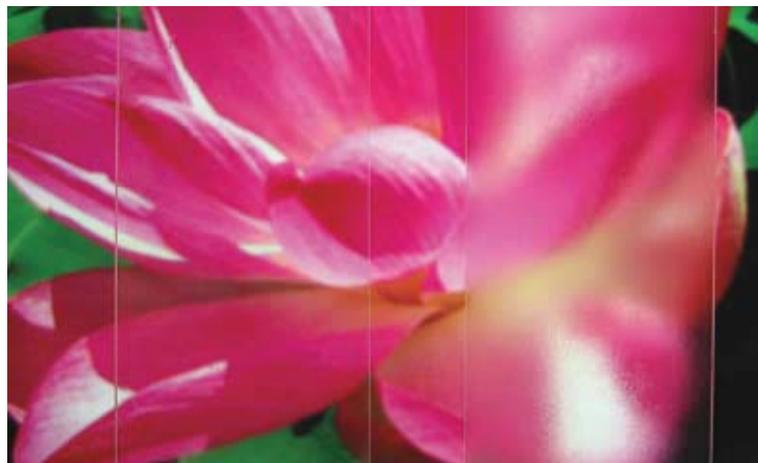
NANOSCHWÄMME

Forscher vom **Massachusetts Institute of Technology** in Cambridge haben Überzüge aus superhydrophilen Multischichtsystemen entwickelt, die nicht beschlagen.

Alternierende Schichten aus einem Polymer und Siliziumdioxid-Nanoteilchen bilden eine extrem feinporige superhydrophile Struktur, mit der sich Glas und andere Materialien überziehen lassen. Die Oberfläche ist wie beim Lotusblatt uneben im Nanometermaßstab. Die Siliziumdioxidpartikel sind wegen anhaftender Hydroxylgruppen zugleich stark hydrophil. Deshalb können die von ihnen gebildeten Nanoporen wie ein Schwamm Wasser aufsaugen und es im Nu von der Oberfläche entfernen.



ANN SANDERSON



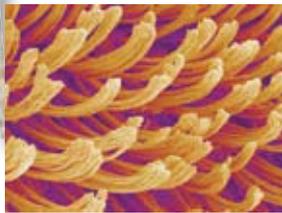
MICHAEL RUBNER, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Eine mit diesem Multischichtfilm überzogenes Glasblättchen bleibt klar, wenn es aus dem Kühlschrank in warme, feuchte Luft gebracht wird (links). Unbehandeltes Glas beschlägt dagegen (rechts).

VORBILD NATUR

Zu den biologischen Errungenschaften, die Techniker nachahmen wollen, gehören:

- mikroskopische Härchen, mit denen Geckos Wände hochlaufen können (unten)
- Muschelklebstoff, der unter Wasser aushärtet
- Spinnenseide, die reißfester ist als Stahl



die eine steife Brise vom Meer herantreibt, praktisch die einzige Feuchtigkeitsquelle. Der Käfer aus der Gattung *Stenocara* hält mit geducktem Kopf seinen emporgereckten Hinterleib in den Nebelwind. Die Feuchtigkeit kondensiert auf seinem Rückenpanzer und rinnt in sein Maul. Nach dem Vorbild von *Stenocara* wollen Wissenschaftler nun Verfahren zur Wassergewinnung in Trockengebieten entwickeln.

Wie so oft wurde der vom Käfer genutzte Mechanismus von einem Forscher entdeckt, der eigentlich etwas anderes suchte. Im Jahr 2001 fiel dem Zoologen Andrew R. Parker, damals an der University of Oxford (England), ein Foto in die Hände, auf dem Käfer in der Namib-Wüste eine Heuschrecke fressen. Von den starken Winden in der Region herangetragen, hätte das Insekt im heißen Sand ohnehin nicht lange überlebt. Doch die Käfer, die sich an diesem wahrhaftigen Geschenk des Himmels gütlich taten, fühlten sich in dem Backofen anscheinend pudel-

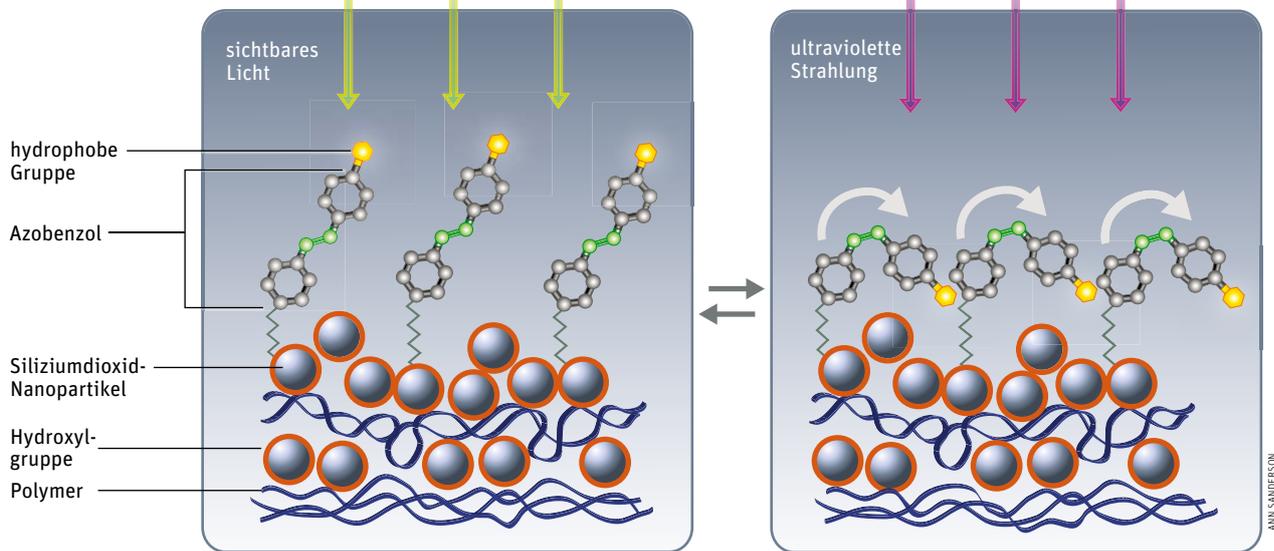
wohl. Parker vermutete, dass sie über eine ausgeklügelte Hitze reflektierende Panzerbeschichtung verfügen müssten.

Tatsächlich reflektieren *Stenocara*-Käfer die Hitze, aber als der Forscher sie untersuchte, entdeckte er noch viel mehr. Der Rücken des Tiers besteht größtenteils aus einer wachsartigen, superhydrophoben Fläche mit vielen mikroskopisch kleinen Beulen. Außerdem aber weist er mit bloßem Auge sichtbare Erhebungen auf, deren Spitzen wachsfrei und hydrophil sind. Deshalb ziehen sie Feuchtigkeit aus dem Nebel an. Schwerkraft und die hydrophobe Umgebung sorgen dann für den Abtransport der sich bildenden Tröpfchen. In Laborversuchen mit Glasplättchen fand Parker heraus, dass diese Anordnung etwa doppelt so effizient ist wie eine glatte, einheitliche Oberfläche, sei sie nun hydrophil oder hydrophob.

Der Forscher hat sich eine künstliche Nachbildung des Käferrückens patentieren lassen, und die Firma Qinetiq, welche im Dienst des britischen Verteidigungsministeriums steht, ist

UMSCHALTBARE OBERFLÄCHEN

Durch Umschalten zwischen **Hydrophobie und Hydrophilie** an definierten Stellen auf einer Oberfläche hoffen Forscher, den Flüssigkeitsstrom durch ein Netzwerk mikroskopischer Kanäle auf so genannten mikrofluiden Chips steuern zu können.



Wissenschaftler von der Universität Pohang in Südkorea hefteten ein vom Azobenzol abgeleitetes Molekül an ein Siliziumdioxid-Polymer-Multischichtsystem. Eine hydrophobe Gruppe am Ende dieses Moleküls und die Unebenheit der Schichten machen die Oberfläche superhydrophob (oben links). Bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht klappt das Azobenzol jedoch um und verbirgt die hydrophobe Gruppe im Innern, wodurch die Oberfläche superhydrophil wird (oben rechts). Sichtbares Licht macht den Vorgang rückgängig.

Auf einer beschichteten Oberfläche (links) benetzt das Wasser quadratische Bereiche, die durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht superhydrophil gemacht wurden. An anderen Stellen bildet es die für den Lotuseffekt typischen, fast kugelförmigen Tropfen.



WASSERSAMMLER IN DER WÜSTE

Angeregt von einem Wüstenkäfer entwickeln Wissenschaftler Vorrichtungen, die mit einer Kombination von Lotuseffekt und Superhydrophilie in abgelegenen, trockenen Regionen der Luft Feuchtigkeit entziehen.



Ein Käfer der Gattung *Stenocara* sammelt Wasser aus den vom Meer herangewehten Morgennebeln in der extrem trockenen Namib-Wüste in Südwestafrika, indem er dem Wind bei geducktem Kopf seinen Hinterleib entgegenreckt (links). Der Panzer des Insekts ist dank einer mikroskopisch unebenen, wachsartigen Oberflächenschicht (oben) an den meisten Stellen superhydrophob. Eine Ausnahme bilden die hydrophilen Spitzen von 0,5 Millimeter großen Höckern, die den Rücken in Reihen überziehen. Sie entziehen der Luft Feuchtigkeit. Die entstehenden Tropfen rollen dann über die superhydrophobe Oberfläche in das Maul des Käfers.

LIMS, ANDREW B. PARKER, RECHTS AUS: A. B. PARKER UND C. R. LAWRENCE, NATURE, BD. 414, S. 23-24, (1. NOV. 2001)

dabei, daraus ein technisches Verfahren zur Gewinnung von Wasser aus Nebel in Trockengebieten zu entwickeln. Auch andere versuchen sich an der Nachahmung von *Stenocara*. So stellte das Team von Rubner und Cohen 2006 superhydrophobe Multischichtsysteme mit superhydrophilen Flecken aus Siliziumdioxid her. Das übertrifft den Käfer sogar; denn dessen Höcker sind nur schlicht hydrophil.

Das Jonglieren mit Superhydrophobie und -philie erlaubt auch die Steuerung von Flüssigkeitsströmen im Mikro- und Nanobereich. Daraus ergeben sich Anwendungen weit über das Reinhalten von Materialien hinaus. »Die Tatsache, dass strukturierte Flächen je nach den chemischen Bedingungen superhydrophob oder superhydrophil sein können«, erklärt Rubner, »eröffnet eine Vielzahl unterschiedlichster Möglichkeiten.« Besonders nützlich wären Materialien, deren Benetzbarkeit an definierten Stellen umgekehrt werden kann.

Ein solches Umschalten ließe sich mit vielen Mitteln erreichen: UV-Licht, Elektrizität, Temperatur, Lösungsmittel und Azidität. Im Jahr 2006 bewies eine Gruppe unter Kilwon Cho von der Universität Pohang in Südkorea die Machbarkeit der Idee, indem sie ein Derivat des Moleküls Azobenzol in die superhydrophobe Silikonoberfläche eines Multischichtsystems aus Polyelektrolyt und Siliziumdioxid einbaute. Die neue Fläche ist ebenfalls superhydrophob, wird bei Bestrahlung mit UV-Licht aber superhydrophil, weil das Azobenzol dann seine Konfiguration ändert (siehe Kasten links). Sichtbares Licht macht den Vorgang rückgängig.

Von dieser Art der Kontrolle könnte die Mikrofluidik profitieren. Das gilt etwa für Mikroarrays, wie sie heute beim Wirkstoff-Screening und anderen biologischen Tests zum Einsatz kommen (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 96). Darin könnte man Kanäle schließen oder öffnen, indem man ihre Oberfläche lokal zwischen hydrophob und hydrophil umschaltet.

Auch unter Wasser trocken bleiben

Für Barthlott, der das Potenzial hinter den Wassertropfen auf Lotusblättern erkannte, hat sich der Horizont für Anwendungen des von ihm entdeckten Effekts fast grenzenlos erweitert. Es überrascht nicht, dass er leidenschaftlicher Anwalt der Artenvielfalt ist. Schließlich könnten zahlreiche Pflanzen und Tiere nützliche Eigenschaften haben – darunter Arten, die noch unbekannt und vom Aussterben bedroht sind.

Gegenwärtig forscht Barthlott über Superhydrophobie unter Wasser. Grundlage waren Untersuchungen darüber, auf welche Weise Pflanzen wie der Wassersalat *Pistia* und der Schwimmpflanze *Salvinia* Luft auf ihren Blattoberflächen einfangen. Nach deren Vorbild hat der findige Bonner Wissenschaftler Gewebe hergestellt, die unter Wasser vier Tage lang trocken bleiben. Ein Badeanzug, der nicht nass wird, scheint also in Reichweite. Der große Wurf aber wäre es, wenn sich auf diese Weise der Gleitwiderstand von Schiffsrümpfen verringern ließe. Statt des sonst üblichen Schmutzes häuft das Lotusblatt, wie es scheint, Gold in Form lukrativer Patente an. ◀



Peter Forbes ist Wissenschaftsjournalist und lebt in London. In seinem 2006 erschienenen Buch »The Gecko's Foot« (W. W. Norton) beschreibt er eine Vielzahl biomimetischer, also von der Biologie inspirierter Technologien. Von seinen literarischen Neigungen zeugt die 2000 von ihm herausgegebene Gedichtsammlung »Scanning the Century: The Penguin Book of the Twentieth Century Poetry«.

Bayer, H. C.: The Lotus Effect. In: The Sciences 40, S. 12–15, Januar/Februar 2000.

Cerman, Z., Barthlott, W. und Nieder, J.: Erfindungen der Natur: Bionik – Was wir von Pflanzen und Tieren lernen können. Rowohlt, Reinbek 2005.

Michel, T.: Tropfen-Wand-Interaktion: Hydrodynamik und Benetzungssphänomene. Shaker, Herzogenrath 2007.

Solga, A. et al.: The Dream of Staying Clean: Lotus and Biomimetic Surfaces. In: Bioinspiration & Biomimetics 2, S. 126–134, Dezember 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/999558.