



## Nagelprobe für den Fakir –

oder wann Wassertropfen ihren Halt verlieren

Warum der Lotos in Asien als Symbol für Reinheit gilt, demonstriert Periklis Papadopoulos, indem er ein Blatt nimmt und Wasser darauf tropfen lässt. Der junge Postdoktorand gehört zum Team um Doris Vollmer und Hans-Jürgen Butt vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz, das den Selbstreinigungseffekt von Oberflächen erforscht. Der Tropfen verharrt kurz in der kleinen Vertiefung in der Blattmitte. Dann gleitet er wie ein kugeliges Miniluftkissenboot vom Blatt herunter, ohne eine nasse Spur zu hinterlassen. Schließlich landet er auf der Hose des griechischen Physikers. Der Jeansstoff bekommt einen nassen Fleck. Das Lotosblatt dagegen sieht so perfekt trocken aus, als sei es nie mit Wasser benetzt worden.

Mit dem „**Lotoseffekt**“ hält die Wasserpflanze nicht nur ihre schwimmenden Blätter trocken. Weil das abperlende Wasser den Dreck mit sich fortspült, bleibt die Pflanze sauber und kann Sonnenlicht viel effizienter einfangen. Diese Fähigkeit zur Selbstreinigung fasziniert Wissenschaftler, seit der deutsche Botaniker Wilhelm Barthlott in den 1970er Jahren erstmals Lotosblätter mit einem Elektronenmikroskop untersucht hat. Dabei zeigte sich, dass die Natur die geheimnisvoll schimmernden Blattoberflächen besonders raffiniert gestaltet hat. Es gibt sogar technische Anwendungen des Lotoseffekts, doch so richtig durchsetzen konnten sie sich noch nicht.

### OBERFLÄCHEN OHNE SCHMIERFILM

Vollmers Team hat nun dem lästigen Schmierfilm auf empfindlichen Oberflächen mit ganz neuen Ideen den Kampf angesagt. Zuverlässig selbstreinigende Autoscheiben, Fassadenglas und Solarzellen wären ein gewaltiger Fortschritt. Genau wie Lotosblätter würden Solarzellen so nicht mehr unter Lichtverlust durch Verschmutzung leiden. Um den allgegenwärtigen Schmier auf Glas zu bekämpfen, reicht es allerdings nicht aus, eine extrem Wasser abstoßende, sogenannte „**superhydrophobe**“ Oberfläche wie die des Lotosblatts zu erzeugen. Da der Schmier auch fettige Anteile enthält, muss die Oberfläche zusätzlich „**fettscheu**“ sein. Die Wissenschaftler nennen diesen auf Fettiges und Öliges erweiterten Lotoseffekt „**superamphiphob**“. Oberflächen, die ölige Substanzen spurlos abtropfen lassen können, sind jedoch eine wissenschaftliche Herausforderung – bis vor wenigen Jahren bezweifelten viele Forscher, dass sie überhaupt machbar sind. Erst seit kurzem gelingen Materialien mit diesen Eigenschaften, auch Dank der Mainzer Forschung.

Grundsätzlich sind zwei Eigenschaften entscheidend, damit Flüssigkeiten von Materialien abperlen: Da ist zum einen die chemische Beschaffenheit der Oberfläche. Wassertropfen zum Beispiel bleiben an Glas erst einmal hängen, während sie von einer Teflonpfanne ziemlich leicht abtropfen. Auf Glas bildet ein

Wassertropfen eine ziemlich große Kontaktfläche, auf Teflon dagegen nimmt er eine eher kugelige Gestalt an – seine Kontaktfläche ist dann vergleichsweise klein. Die unterschiedliche Form macht deutlich, dass das Wasser lieber mit Glas als mit Teflon Kontakt aufnimmt. Und das hat einen guten Grund: Wasser ist nämlich „polar“, das heißt, seine Moleküle haben einen elektrischen Plus- und einen Minuspol, was man wissenschaftlich als **Dipol** bezeichnet. Eine polare Flüssigkeit wie Wasser bevorzugt den Kontakt zu einer ebenfalls polaren Oberfläche, weil seine Dipole dort Gegenpole finden. Diese gegenseitige elektrische Anziehung sorgt für die **Kontaktkraft**.

### KRÄFTEMESSEN AUF DER MIKROSKALA

Glas besteht im Wesentlichen aus Siliziumdioxid und ist wesentlich polarer als etwa Teflon. Auf Teflon fühlen sich umgekehrt Öltröpfchen wohler, denn Öl ist unpolar. Das erkennt man daran, dass Öl in einer Teflonpfanne sehr flache Tropfen mit großer Kontaktfläche ausbildet. Für den Kontakt zwischen einer unpolaren Flüssigkeit und einer unpolaren Oberfläche wie Teflon sorgt eine andere Kraft, die nach dem niederländischen Physik-Nobelpreisträger Diderik van der Waals benannt ist. Diese Kraft entsteht durch winzige Verschiebungen von Ladungen in Elektronenhüllen von Molekülen, die selbst keine elektrischen Pole haben. So können die Moleküle sich trotzdem gegenseitig elektrisch anziehen. Die **Van-der-Waals-Kraft** ist zwar schwach, kommt aber praktisch überall vor. Sie lässt sogar Geckos an der Decke haften (siehe [TECHMAX 8](#)).

Der Lotoseffekt beruht aber noch auf einer zweiten, entscheidenden Eigenschaft: der Oberflächenstruktur. Spontan würde man denken, dass extrem glatte Oberflächen besonders gut schmutzabweisend sind. Doch das Gegenteil ist der Fall! Lotosblätter sind auf der mikroskopischen Skala enorm rau. Elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen einen Mikrowald aus buschartigen Erhebungen ([Abb. A](#)), die etwa zehn Mikrometer (Millionstel Meter) in Höhe und Breite messen. Auf solchen Mikrostrukturen sitzt ein Wassertropfen wie ein Fakir



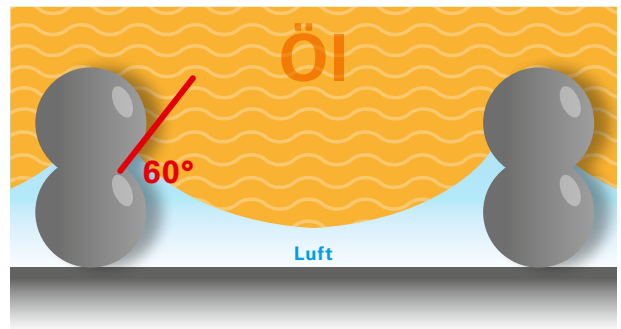
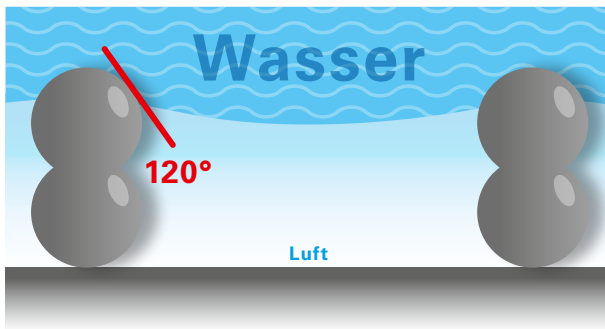
auf seinem Nagelbrett. Er hat nur mit den Spitzen der Strukturen Kontakt, dazwischen hängt er auf einer Luftschicht. Zusammengekommen ergeben die Spitzen eine Kontaktfläche, die viel kleiner ist als die flache Unterseite des Tropfens. Entsprechend gering ist die Kraft, die den Tropfen an der Oberfläche festhält. Er löst sich ganz leicht und perlt auf einem Luftkissen ab.

Um den genialen Lotoseffekt genauer zu erforschen, stellten die Mainzer Forscher nach seinem Vorbild künstliche Mikrostrukturen aus mikroskopischen Kunststoffsäulen, Noppen und Kugeln her. Oben drauf setzten sie winzige Tröpfchen und schauten, ob und wie sie sich halten können. Besonders interessant war dabei die Frage, wann der Lotoseffekt zusammenbricht oder – um in unserem Bild zu bleiben – wann die Nagelspitzen den Fakir nicht mehr hochhalten können und der Ärmste auf das Brett durchsackt. Genau das passiert den Wassertropfen, wenn die gesamte Auflagefläche der Mikrosäulen zu klein wird. Um dieses Verhalten der Tröpfchen genau beobachten zu können, machten die Forscher ihre Mikrostrukturen durchsichtig. Mit Hilfe eines konfokalen Laser-Rastermikroskops konnten sie dann von unten aufnehmen, wie der Wassertropfen auf den Säulen sitzt. Die Mainzer versetzten dafür das Wasser mit einem blauen und die Plastiksäulen mit einem gelben Farbstoff. Der Laser regt beide Farbstoffe zum Leuchten an, und das Mikroskop zeichnet dieses Licht auf. Es rastert den Wassertropfen und die Struktur mit einem feinen Laserstrahl Schicht für Schicht von unten ab. Am Computer werden die Schichtbilder dann zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt. Es zeigt in allerfeinsten Details, welche Form der Tropfen auf den Säulen annimmt.

### DAS „FAKIR-DURCHSACK-EXPERIMENT“

Beim „Fakir-Durchsack-Experiment“ setzten die Mainzer ein Tröpfchen auf Mikrosäulen und trockneten es ganz langsam. Mit der Größe schrumpfte auch seine Auflagefläche. Die Aufnahmen zeigen, dass das Wasser sich dabei faszinierend verhält: Der Tropfen versucht, möglichst lange Kontakt zu den äußersten Säulen zu halten, von denen er sich zurückziehen muss. Er „klammert“ sich mit fadenartigen Ausstülpungen an diesen Säulen fest ([Abb. B](#)). Diese „Wasserfäden“ werden beim Schrumpfen des Tropfens immer dünner. Schließlich gewinnt die **Kapillarkraft** und die Wasserfäden reißen ab. Mit weiterem Schrumpfen ist schließlich der Punkt erreicht, an dem die Auflagefläche der restlichen Säulen zu klein wird. Dann sackt der Tropfen auf den Boden zwischen den Säulen durch. „Das ist so, als würde jemand in einer Hängematte liegen und immer schwerer werden“, erklärt Vollmer. Anstelle der Schwerkraft ist aber hier die Kapillarkraft der Gegenspieler zu den Haltekräften. Sie will den Tropfen zu einer schönen Kugel zusammenziehen, weil das Energie spart. Beim Abrunden der Tropfenunterseite drückt sie diese aber bis zum Boden der Struktur durch. Nun stecken die restlichen Säulen im Tropfen wie zu wenige Nägel im armen Fakir.

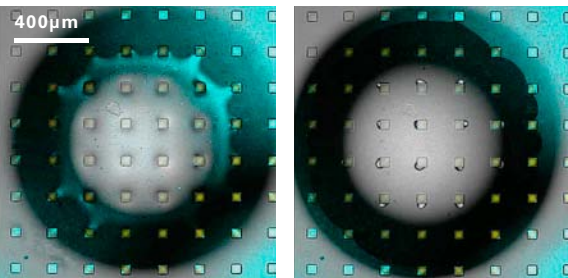
Mit solchen Experimenten haben die Max-Planck-Forscher viel über den Lotoseffekt gelernt. Doch für superamphipobe Strukturen, die auch noch Öl abweisen, mussten sie ganz neue Wege gehen. Eine besondere Herausforderung sind sehr dünnflüssige Öle. Das erste künstliche Material der Welt, das solche Öle abperlen lässt, entwickelte 2007 einer Forschergruppe vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den USA. Die Struktur



**Links:** Wasser zeigt auf superamphiphoben Oberflächen aus mikroskopisch kleinen Kugeln einen sehr großen mikroskopischen Kontaktwinkel, hat also kaum Kontakt. **Rechts:** Auch der geringere Winkel beim Öl reicht gerade noch, um es auf einem Luftkissen sitzen zu lassen. So perlt es leicht ab.

Ist die Kontaktkraft zwischen einem Tropfen und einer Oberfläche gering, dann bildet er nahezu eine Kugel. Bei großer Kontaktkraft wird er flach gezogen. Deshalb kann man die Eigenschaften solcher Kontakte über einen „Kontaktwinkel“ direkt am Rand des Tropfens beschreiben. Der „makroskopische“ Kontaktwinkel beschreibt den Tropfen als Großes und Ganzes. Je kugelig ein Tropfen ist, desto größer ist dieser Kontaktwinkel zwischen Tropfenrand und Kontaktfläche. Auf der mikroskopischen Skala kommen aber viele winzige Kontakte der Spitzen, Säulen oder Kugeln ins Spiel. Sie verformen den Tropfen an dieser Stelle nur ein wenig. Daher ist der in den Bildern eingezeichnete „mikroskopische“ Kontaktwinkel viel kleiner als der makroskopische Kontaktwinkel. Für das leichte Abreißen des Tropfens ist wesentlich, dass jeder dieser winzigen Kontakte nur eine schwache Kontaktkraft ausübt.

Abb. B



Der Tropfen auf einer superhydrophoben Säulenstruktur ist von unten aufgenommen. Durch Trocknen schrumpft er. Dabei versucht er, über Ausstülpungen Kontakt zu den Mikrosäulen zu halten, von denen er sich zurückziehen muss (links). Wird die Auflagefläche auf den Säulen zu klein, sackt er auf den Glasboden durch (rechts).

Quelle: MPI für Polymerforschung

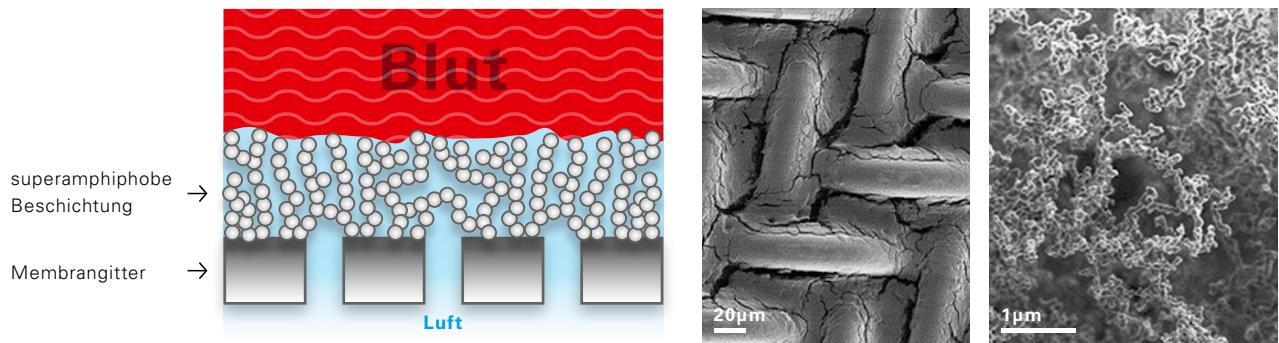
bestand aus winzigen Säulen, deren Form an Mikropilze erinnert. Der entscheidende Trick waren die seitlichen Überhänge der pilzartigen Köpfe. Um diese Rundungen herum konnten selbst Öltröpfchen sich nicht mehr komplett anschmiegen **(siehe Kasten)**. Sie mussten obenauf liegen bleiben und perlt leicht ab. Die Entdeckung der Amerikaner brachte die Mainzer Wissenschaftler auf die Idee, wie man eine superamphiphobe Oberfläche genial einfach herstellen kann. Doris Vollmer führt den ersten Schritt sogar gelegentlich in Schulen vor. Dazu braucht sie nur ein paar Streichhölzer und einen Teelöffel. Unter dem umgedreht gehaltenen Löffel zündet sie die Streichhölzer an. Die Flammen überziehen die Innenfläche des Löffels mit einer Rußschicht – und diese Rußschicht ist superhydrophob! Ein Wassertropfen rollt dann schön kugelig im Löffel herum.

### DER TRICK MIT DEN NANOCHRISTBAUMKUGELN

Warum das so gut funktioniert, zeigt sich wieder unter dem Mikroskop: Die schwammartige Rußschicht besteht aus vielen Lagen von winzigen Kohlenstoffkügelchen, die einen Durchmesser von ungefähr fünfzig Nanometern (Milliardstel Meter) haben. Das brachte die Mainzer auf die Idee, dass diese Kügelchen wie die Überhänge der Mikropilze wirken könnten. Die Öltröpfchen können sie nicht umschließen. Um superamphiphob zu werden, brauchte die Rußstruktur allerdings noch eine trickreiche chemische Behandlung. Dabei beseitigten die Max-Planck-Forscher auch zwei Nachteile von Ruß, die man beim Löffel-Experiment sofort erkennt. Erstens ist die Rußschicht nicht fest und zweitens pechschwarz und nicht durchsichtig. Sie eignet sich also nicht gerade als Schutzschicht für Scheiben oder Solarzellen. Beide Probleme konnte das Team jedoch lösen: Dazu dampfen die Forscher zuerst auf den Ruß eine flüchtige, organische Siliziumverbindung auf. Mit einem Schuss Ammoniak reagiert diese auf der Oberfläche der Rußteilchen chemisch zu Siliziumdioxid, also Glas. So werden die Rußkügelchen von einer dünnen, porösen Glasschicht ummantelt. Die fertig verglaste Struktur erhitzen die Mainzer auf 500 °C. Dabei brennen sie den Ruß, der ja im Wesentlichen Kohlenstoff ist, mit Sauerstoff heraus. Am Schluss bleiben hohle Glaskügelchen übrig – sozusagen farblose, zusammengebackene Nanochristbaumkugeln.

Um die Struktur auch schön superamphiphob zu machen, dampfen die Forscher am Schluss noch eine fluorhaltige Siliziumverbindung auf. Diese wirkt wie Teflon. Noch sieht die superamphiphobe Glasbeschichtung etwas milchig aus. „Die Transparenz verbessern wir gerade“, sagt Perikles Papadopoulos. Aber sogar Hexadecan perlt perfekt ab, was viele Experten bis vor kurzem für unmöglich gehalten hätten. Dieses Öl ist besonders dünnflüssig und zum Beispiel Bestandteil von Heiz- und Schmierölen. Die Mainzer konnten sogar zeigen, dass ein

Abb. C



**Links:** Die neue Mainzer Membrane für Herz-Lungen-Maschinen besteht aus einem Stahldrahtgitter (unten). Ihre superamphipobe Beschichtung (Mitte) ist so porös, dass sie die Luft von unten an das Blut heran lässt. Das Blut selbst kann die Membrane aber nicht benetzen und damit zusetzen. **Rechts:** Die Mikroskopbilder zeigen das Gitter ohne Beschichtung, rechts daneben die superamphipobe Beschichtung.

Quelle: MPI für Polymerforschung; Grafik: Roland Wengenmayr/MPG

Tropfen Hexadecan wie ein kleiner Ball auf der Schicht auf und ab hüpfen kann. Das demonstriert, wie gering die Kontaktkraft ist. Der zarte Glaskugelschwamm ist auch noch recht empfindlich. Doris Vollmers Gruppe arbeitet deshalb daran, ihn abriebfester zu machen.

### NEUE MEMBRANEN FÜR KÜNSTLICHE LUNGEN

Die Mainzer testen aber auch schon erste Anwendungen. Hans-Jürgen Butt forscht zum Beispiel an Membranen, die einen Austausch von Gas mit einer Flüssigkeit erlauben. Solche Membranen sind zum Beispiel Bestandteil von Herz-Lungen-Maschinen. Während einer medizinischen Operation sorgen sie dafür, dass das Blut des Patienten Sauerstoff aus der Luft aufnehmen und Kohlendioxid abgeben kann. Sie sind also die technischen Gegenstücke zu den Lungenbläschen in unseren Lungen. Für den Gasaustausch brauchen die Membranen Poren. Diese müssen so klein sein, dass sie zwar das Gas durchlassen, nicht aber das Blut. Das ist eine oberflächentechnische Herausforderung. Und tatsächlich sind die Poren in den Membranen herkömmlicher Herz-Lungen-Maschinen der Schwachpunkt. Ein Nachteil besteht darin, dass das Blut in die Membranporen eindringt, die Membran also benetzt. So schrumpft die Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Luft, weshalb diese nur noch geringere Gasmengen austauschen können. Deshalb sind künstliche Lungen auch erheblich weniger leistungsfähig als echte Lungen. Hinzu kommt, dass Blut zum Gerinnen neigt und dabei die Poren zusetzt. Diese Verklumpungen sind ebenfalls gefährlich, weil sie sich lösen und Adern verstopfen können.

In der kreativen Arbeitsatmosphäre des Mainzer Teams entstand die Idee, deshalb eine völlig neuartige Membran zu entwickeln. Ihr Grundgerüst ist ein extrem feines Gittergewebe aus rostfrei-

em Stahldraht. Nur etwa 30 Mikrometer dünn sind diese Drähte – ein menschliches Kopfhaar ist grob dreimal so dick. Ähnlich winzig sind die Öffnungen in dem Netz, dessen Drähte die Mainzer mit ihrer superamphipoben Glaskügelchenschicht überziehen. Diese Schicht sorgt für die entscheidende Eigenschaft der neuen Membran: Das Blut kann sie nicht mehr benetzen, sich festsetzen und gerinnen. Es bleibt schön brav auf seiner Seite, und die Luft kommt durch die Membranporen nahezu ungestört heran. Umgekehrt kann das Blut das Kohlendioxid sehr wirksam abgeben.

Im Labor funktionieren die Membranen schon sehr gut (Abb. C). Doch der Weg von der Grundlagenforschung zur medizinischen Anwendung ist noch weit. Die Effizienz der Mainzer Membranen erlaubt es aber, sie viel kleiner als herkömmliche Membranen zu machen. Deshalb eignen sie sich besonders gut für sehr kleine Patienten, die nur wenig Blut haben: Frühgeborene. Doch auch über ganz andere Anwendungsfelder denken die Max-Planck-Forscher nach. Ähnlich aufgebaute Membranen könnten zum Beispiel auch effizient Kohlendioxid aus Kraftwerksabgasen abtrennen und so zum Klimaschutz beitragen.

#### Schlagwörter

superhydrophob/superamphiphob, polar/unpolar, Dipol, Van-der-Waals-Kraft, Kapillarkraft, Kontaktkraft

#### Lese-Tipps

[www.lotus-salvinia.de/](http://www.lotus-salvinia.de/);  
[www.mpg.de/7540945/W004\\_Material-Technik\\_064-071.pdf](http://www.mpg.de/7540945/W004_Material-Technik_064-071.pdf)

**www.maxwissen.de**

► der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von **BIOMAX**, **GEOMAX** und **TECHMAX**. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: **Max-Planck-Gesellschaft**, Wissenschafts- und Unternehmenskommunikation, Hofgartenstraße 8, 80539 München | e-mail: [presse@gv.mpg.de](mailto:presse@gv.mpg.de)