



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Bei Reisen in südliche Gefilde kann einen mitunter ein unheimliches Rufen aus dem Schlaf reißen. Wer an Gespenster glaubt, der sei beruhigt: Bei Licht betrachtet entpuppt sich das tropische Nachtgespenst nämlich als Gecko, der an der Zimmerdecke klebt. Vielleicht jagt er gerade Insekten, die sich dort ebenfalls problemlos bewegen. Warum es Geckos, Insekten und Spinnen so gut gelingt, kopfüber an der Decke zu spazieren, dieses Geheimnis weckt schon länger die Neugier der Forscher. Vor allem fasziniert sie, dass

auch Biologen mit: Stanislav Gorb beschäftigt sich schon lange mit den Haftkünstlern unter den Insekten, Spinnen und Geckos. Mehrere Jahre war er am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen tätig. Er und seine Mitarbeiter können in faszinierenden Bildern zeigen, wie es unter den Füßen der Haftzeher – so heißt die Familie der *Gekkoniidae* vom Lateinischen ins Deutsche übersetzt – genau aussieht. Sehr gut eignet sich der Tokee (*Gekko gekko*), denn diese orange-rot gepunktete Echse aus Südostasien gehört zu

Mit unbeschränkter Haftung – wie Gecko & Co die Materialforschung inspirieren

die Tiere die beeindruckende Haftkraft ihrer Füße auch blitzschnell wieder aufheben können, um davon zu flitzen.

Welche Möglichkeiten kommen in Frage, um das zu bewerkstelligen? Winzige Saugnapf scheiden aus, denn sie würden auf dem rauen und staubigen Putz niemals randdicht aufsetzen und haften bleiben. Echte chemische Kleber bräuchten dagegen Zeit zum Aushärten, und danach bekäme das arme Tier kein Bein mehr hoch. Gegen feine Häkchen spricht, dass die Haftartisten sogar auf glattem Glas Halt finden. Also müssen sie andere Tricks einsetzen. Welche, das erforschen Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart. Sie wollen nicht nur das Geheimnis von Gecko, Fliege und Spinne knacken, sondern mit diesem Wissen auch neue, künstliche Haftmaterialien entwickeln. Sie sollen, wie der Geckofuß, ohne Kleber haften und ohne Kleberückstände wieder ablösbar sein. Dieses technische Nachahmen der Natur nennt man **Biomimetik** oder **Bionik**. Erste, schon recht gut funktionierende Prototypen einer solchen Haftfolie existieren bereits und sollen mit einem industriellen Partner weiterentwickelt und auf den Markt gebracht werden.

Das Forschungsgebiet ist hochgradig interdisziplinär – neben Physikern, Materialwissenschaftlern und Ingenieuren arbeiten natürlich

den größten Geckos (**Abb. A**). Ein kapitaless Männchen kann fast vierzig Zentimeter lang und dreihundert Gramm schwer werden. Und selbst ein solches Schwergewicht hangelt sich noch problemlos an der Unterseite einer waagerechten Glasscheibe entlang. In der Natur ist das eine hafttechnische Meisterleistung.

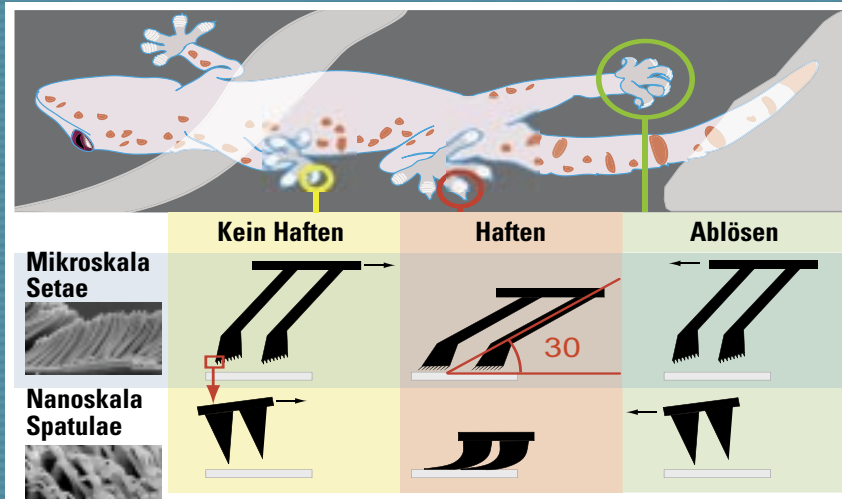
Das normale Auge erkennt unter den stark verbreiterten Zehen des Tokee flauchige Lamellenstrukturen. Im Lichtmikroskop entpuppen sie sich als Felder aus dichten, feinen Haaren. Jedes Haar, der wissenschaftliche Fachbegriff ist „Seta“,



A



SAUBER ANHAFTEN – BLITZSCHNELL LÖSEN



Geckos finden nahezu auf jeder Fläche Halt. Binnen fünfzehn Mikrosekunden (millionstel Sekunden) können sie diesen aber auch ohne messbaren Kraftaufwand wieder lösen. Dazu aktivieren und deaktivieren sie ihren Haftapparat in einer ausgefeilten Choreographie. Solange der Gecko seine Setae nicht einsetzt, krümmen sie sich zur Zehe hin, damit die Spatulae nicht miteinander verkleben – das zu verhindern, ist übrigens auch ein zentrales Problem beim Design von künstlichen Klebefolien. Setzt die Echse ihren Fuß auf, dann drückt sie ihn leicht gegen

die Bewegungsrichtung. Dabei klappen die Setae um, bis ihr Winkel zur Fläche kleiner als dreißig Grad ist (Bild in der Mitte oben). In dieser Position richten sich die Spitzen der Setae parallel zum Untergrund aus und alle Spatulae schmiegen sich jetzt kraftschlüssig an ihn an (Bild in der Mitte unten). Die Ablösetechnik des Geckos sieht lustig aus: Er rollt dabei die Zehen „verkehrt“ herum nach oben, als zöge er Klebebänder ab. Dabei werden die Setae wieder aus dem 30°-Winkel herausgedreht, und die Spatulae lösen sich ohne Kraftaufwand vom Untergrund.

liegt im Gewicht des Tieres: Eine Ziege ist gut hundertmal schwerer als ein Gecko. Folglich müssten die Ziegen-Spatulae viel feiner als die der Echsen sein, und das heißt, dünner als ein einzelnes Keratin-Molekül! „Irgendwann sind die Härchen so dünn, dass sie einfach von den Füßen abreißen“, sagt Gorb.

Je tiefer man in die Welt der mikroskopischen – oder gar nanoskopischen – Kontakte eindringt, desto stärker regieren physikalische Gesetze, die die Kontakttheorie beschreibt. Grundsätzlich entsteht ein Kontakt immer dann, wenn zwei Flächen sich gut aneinander anschmiegen. Felsen, Baumrinden, Blätter oder neuerdings künstliche Oberflächen wie Glasscheiben kümmern sich nicht um Geckos oder Fliegen. Deshalb müssen sich deren Hafthaare umgekehrt gut an diese verschiedenartigen Untergründe anpassen. Sie müssen also extrem flexibel sein und trotzdem auch fest, sonst drohen sie abzureißen. Infolgedessen verhalten sich Setae beim Anschmiegen wie winzige Federn: Sie biegen sich, aber ihr Widerstand gegen diese Verformung wächst. Diesem mechanischen Widerstand wirkt bei einem Kontakt eine anziehende Kraft entgegen, deren Ursache molekulare Oberflächenkräfte sind, wie wir gleich sehen werden.

EINE VIELZAHL VON KONTAKTEN

Das entscheidende Wechselspiel zwischen diesen beiden Kräften findet am Rand des Kontakts statt. „Nicht die Größe der Kontaktfläche ist entscheidend für das Haften“, erklärt der Max-Planck-Wissenschaftler, „sondern allein ihr Umfang.“ Diese merkwürdige Eigenschaft winziger Kontakte erklärt sofort, warum die tierischen Haftartisten so feine Haare haben. Wer seine Kontaktfläche in viele kleine **Kontaktflächen** aufsplittet, bekommt in der Summe einen größeren Gesamtumfang. Anhand eines Blattes Papier kann man sich das schnell klar machen: Wenn man es in mehrere Stücke zerschneidet und dann die Kantenlängen misst und addiert, dann erhält man den Gesamtumfang aller Schnipsel, der den Umfang des ursprünglichen Blattes deutlich übersteigt. Auf der Basis dieses einfachen geometrischen Zusammenhangs – und mit noch ein paar komplexeren Zutaten – ergibt die Kontakttheorie folgendes verblüffend einfache Gesetz: „Zerteile die Kontaktfläche in n kleinere Kontakte, wobei n eine natürliche Zahl ist, und steigere so die Kontaktkraft um den Faktor \sqrt{n} .“ Würde man also einen Kontakt in 10.000 kleinere Kontakte aufteilen, dann

→ ist ein zehntel Millimeter lang und nur ein fünfteil Mikrometer dick und damit zehnmal feiner als ein menschliches Haar. Das stärkere Elektronenmikroskop (siehe Aufnahmen im Kasten) zeigt nun, dass jede Seta sich an ihrer Spitze in Hunderte winziger, spatelförmiger Blättchen aufspaltet, die Spatulae (lat.: Schaufelchen). Jede dieser Spatulae ist nur noch rund zweihundert Nanometer breit (ein Nanometer ist ein milliardstel Meter), ihre „Dicke“ sprengt jedoch erst recht unser Vorstellungsvermögen: Sie beträgt nur noch zwischen zehn und fünfzehn Nanometer. In diesen engen Raum passen gerade noch fünf oder sechs Keratin-Moleküle nebeneinander. Diese Proteine sind nicht nur die Bausteine der Gecko-Hafthaare, sondern geben auch unseren Nägeln und Haaren die Festigkeit. Keratin ist eigentlich ziemlich zäh, doch die unglaublich feine Verästelung macht die fiedrigen Setae und Spatulae extrem anschmiegsam. So können sie sich an mikroskopisch, ja sogar nanoskopisch feine Rauheiten des Untergrunds anpassen. Und das ist eines der Geheimnisse hinter der Haftkraft des Geckos.

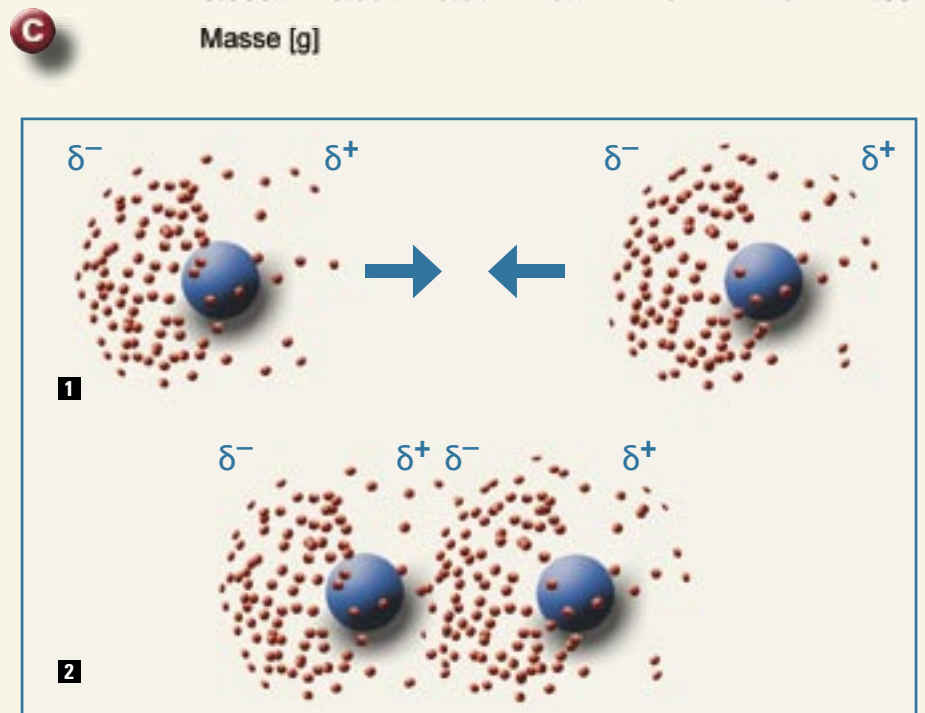
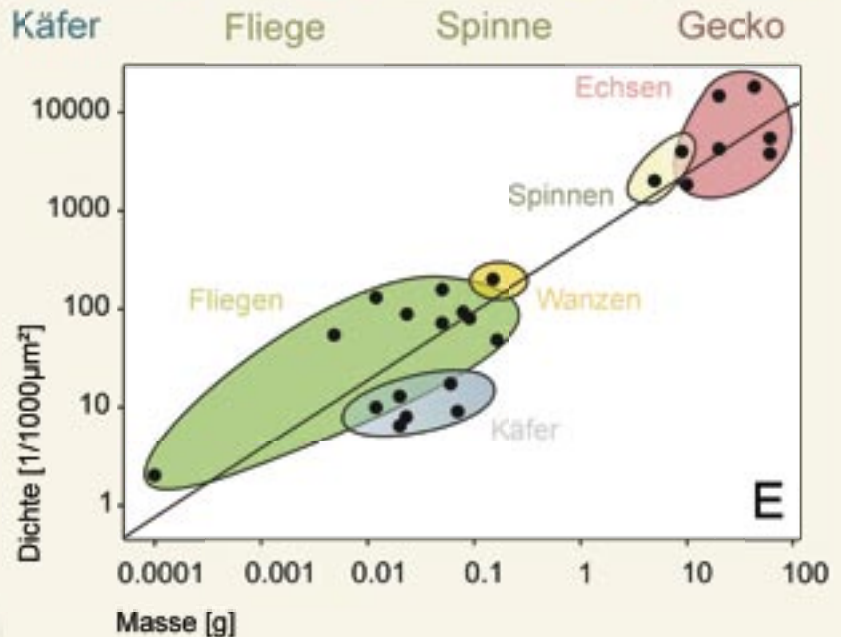
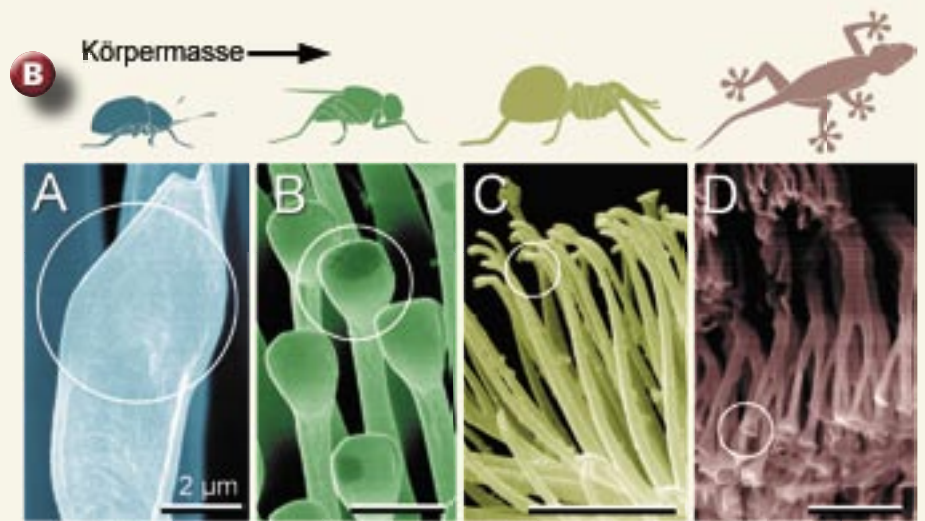
Manche Insekten setzen ebenfalls Hafthaare ein. Doch diese sind meist nicht verzweigt und längst nicht so fein wie die des Geckos. Auf den weichen „Fußlappen“ des Ampferblattkäfers *Gastrophysa viridula* zum Beispiel, der wie der Tokoe zu den Stuttgarter Laborbewohnern zählt, sitzen die Spatelspitzen tausendmal weniger dicht als bei Geckos (Abb. D). Seine pilzförmigen Spatulae sind auch zehn- bis fünfzigmal gröber als die des Geckos. Bei einigen großen Spinnen geht es da schon wesentlich feiner zu. Solche Vergleiche brachten die Max-Planck-Wissenschaftler auf die Idee, dass es eine Art natürliches „Haftgesetz“ geben könnte (Abb. B): „Je größer ein Tier ist, desto feiner verzweigen sich seine Kontaktflächen.“ Stanislaw Gorb konnte zeigen, dass tatsächlich alle Spezialisten für haariges Haften sich diesem Gesetz unterwerfen. Es erklärt auch, warum Geckos die schwersten Tiere sind, die dieses Prinzip ausnutzen. Schließlich hätte eine Bergziege sicher auch gerne „schicke Hafthufe“, um damit senkrechte Felswände hinauf zu fliehen. Doch warum hat die Evolution sie nicht hervorgebracht? Die Antwort

► Das Elektronenmikroskop enthüllt die spatelförmigen Feinstrukturen (oben), die an den Fußsohlen von Käfern, Fliegen, Spinnen und Geckos für Haftung an Decken oder Wänden sorgen. Je schwerer die tierischen Haftartisten sind, desto feiner müssen ihre Hafthaare sein.

stiege die **Haftkraft** um den Faktor 100. Tatsächlich hält sich die Natur „haargenau“ an dieses Gesetz, wie die Stuttgarter herausfanden. Die naive Vermutung, dass die Tiere durch das Aufteilen in viele feine Haare ihre effektive Kontaktfläche vergrößern, ist also falsch. Sie steigern ihre Haftkraft über den Gesamtumfang der Kontakte!

Bleibt nun noch die Frage, welche molekularen Kräfte für die Anziehungskraft sorgen. Ende der 1960er-Jahre kam der Anatom Uwe Hiller an der Universität Münster auf die richtige Spur. Er setzte seine Geckos auf unterschiedlich präparierte Oberflächen und fand so auch heraus, woran die Echsen scheitern: Eine perfekte Gecko-Rutschbahn müsste mit Teflon beschichtet sein. Hillers Forschung ergab, dass nur bestimmte molekulare Kräfte infrage kommen. Vor fünf Jahren konnte dann der amerikanische Biologe Kellar Autumn zeigen, dass es eine Kraft ist, die ihren Namen von dem niederländischen Physik-Nobelpreisträger Diderik van der Waals hat. Autumn und sein Team am *Lewis & Clark College* in Portland im US-Bundestaat Oregon fanden heraus, dass Gecko-Setae auf Wasser anziehenden Oberflächen ähnlich gut haften wie auf Wasser abstoßenden. Und das geht nur mit der Van-der-Waals-Kraft, die auf nahezu allen Oberflächen funktioniert.

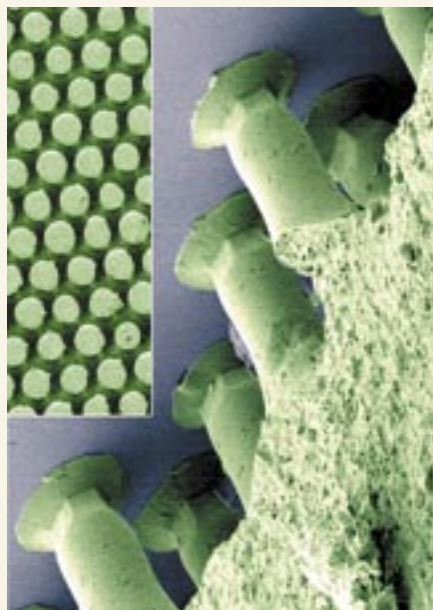
Van-der-Waals-Kräfte beruhen auf winzigen Ladungsverschiebungen in den Elektronenhüllen der Moleküle. Man kann sich das so vorstellen: Die Elektronenverteilung in Molekülen und Atomen ist nicht ständig gleich, sie ist nur ein statistischer Mittelwert. Die Elektronenwolke kann sich mal etwas mehr in die eine Richtung ausbreiten, mal etwas mehr in die andere (**Abb. C**). Die Teilchen wirken dann ähnlich wie Dipole, und diese kleinen Ladungsverschiebungen sorgen dafür, dass sich Moleküle in der Spitze des Hafthaars und Moleküle des Untergrunds gegenseitig anziehen. Van-der-Waals-Kräfte sind zwar sehr schwach, doch über die sehr vielen Spatulae summieren sie sich massiv auf. Im Prinzip können sie einen großen Gecko mehrfach halten. Autumns Team gelang es, die Haftkraft einer einzelnen Tokee-Seta zu messen. Aus diesem Ergebnis rechneten die Amerikaner hoch, dass ein an einer



► Van-der-Waals-Kräfte entstehen dadurch, dass Atome oder Moleküle äußerst kurzlebige Dipole bilden können. Nähern sich Atome und erfolgt in beiden Atomen die Ladungsverschiebung synchron (1), dann wirken diese Anziehungskräfte ab einem bestimmten Abstand: Der positiv polarisierte Teil des einen Atoms zieht dabei den negativ polarisierten Teil des anderen Atoms an (2).



▲ Der Fuß des Ampferblattkäfers (links) lieferte die Vorlage für eine neue, auch an Glas haftende Folie. Die mikroskopische Aufnahme (rechts) zeigt die biomimetische Oberflächenstruktur des am Max-Planck-Institut in Stuttgart entwickelten Haftmaterials.



→ senkrechten, glatten Wand sitzender Tokee mit seinen 6,5 Millionen Setae theoretisch das Gewicht zweier mittelgroßer Menschen tragen könnte (normalerweise setzen Geckos nur wenige Prozent ihrer Haftkraft ein). Demnach könnten Fassadenkletterer die Tiere als lebende Haltegriffe verwenden – wenn diese mitmachen.

Inzwischen gelang den Max-Planck-Forschern in Kooperation mit Kollegen von der Universität des Saarlandes und der Universität Erlangen-Nürnberg ein noch größeres Kunststück: nämlich die Kraftmessung an einer einzelnen, nanoskopischen Spatula. Damit konnten die Forscher errechnen, wie viele Prozent seiner spatelförmigen Haarspitzen ein Gecko in verschiedenen Situationen einsetzt. Für die Messungen verwendeten die Forscher ein **Rasterkraftmikroskop**. Ein solches Gerät kann mit einer ultraspitzen Nadel feinste Kräfte messen. Auf diese Nadel klebten die Forscher eine Seta und schossen ihr mit einem Ionenstrahl – ähnlich einer Laserkanone, nur viel kleiner – alle Spatula weg, bis auf eine. Diese setzten sie mit der Supernadel auf eine Glasoberfläche. Und dann maßen sie die Kraft, mit der sich die Spatula vom Glas abziehen lässt. Das Ergebnis war die unvorstellbar winzige Kraft von rund zehn Nanonewton. Da sich die 6,5 Millionen Setae des Tokee in rund eine Milliarde Spatulae auffasern, ergibt sich daraus theoretisch eine maximale Haftkraft der Echse von insgesamt zehn Newton. Ein Newton entspricht gerundet dem Gewicht eines Geckos, der eine

Masse von hundert Gramm hat. Das heißt, unser Hundert-Gramm-Tokee kann sich mit einer Kraft, die zehnmal größer als sein Eigengewicht ist, unter eine waagerechte Glasplatte heften.

NACH DEM VORBILD DER NATUR

Mit dem Rasterkraftmikroskop konnten die deutschen Forscher auch nachweisen, dass Geckos sich nicht allein auf die Van-der-Waals-Kraft verlassen. Mit wachsender Luftfeuchtigkeit kann die Haftkraft der einzelnen Spatula auf maximal das Doppelte anwachsen. Ursache ist ein sehr dünner Wasserfilm zwischen Spatula und Untergrund, der nur ein bis zwei Wassermoleküle dick ist. Die Wassermoleküle sorgen über molekulare Kräfte für eine bessere Kräftechlüssigkeit zwischen dem Untergrund und der Spatula. Physiker nennen das **Kapillareffekt**. Er lässt sich auch bei einem dünnen Glasröhrchen beobachten, das man in eine Flüssigkeit taucht. Während Geckos diesen Effekt nebenbei mitnehmen, benutzen Insekten ihn sogar hauptsächlich. Sie scheiden dafür ein Sekret aus Drüsen an den Hafthaaren aus. Geckos und Spinnen leben dagegen auf trockenem Fuß.

Die Natur setzt eben nie einseitig nur auf einen Mechanismus. Das ist den Forschern bei der Entwicklung künstlicher Materialien bewusst, die auch einfacher als ihre natürlichen Vorbilder strukturiert sind. Momentan konzentrieren sie sich bei ihren Forschungen nur auf das einfachere Haften an sehr glatten Flächen, das alleine aber schon viele tech-

nische Anwendungen ermöglicht. Die Ideen reichen von schonenden Robotergreifern für die DVD-Produktion bis hin zum Ersatz für laut ratschende Klettverschlüsse. Auf der Suche nach dem optimalen Haftdesign analysierten die Materialforscher verschiedenste haarige, noppige und pilzförmige Kontaktstrukturen. Denn auch die geometrische Form der Hafthaare nimmt Einfluss, dafür bietet die Natur ein reiches Sortiment von Vorbildern an. Mit Hilfe der Kontakttheorie haben die Stuttgarter daraus eine komplexe Landkarte des Haftens entwickelt. Sie zeigt erstmals systematisch, wie die Größe, das Material und das Design der Nanofasern die Haftkraft beeinflusst.

So gelang den Stuttgartern die Entwicklung einer Folie, die auf Glas bereits die halbe Haftkraft des Geckos erreicht. Bei der Herstellung dient – wie beim Kuchenbacken – eine Form als Vorlage, in die gleichsam als Negativbild die gewünschte Oberfläche eingepreßt ist. Dann wird ein Kunststoff hinein gegossen, der nach Erstarren dann als mikrogenoppte Folie abziehbar ist – fertig. Die Formen müssen die Materialwissenschaftler aufwändig mit den Methoden der Halbleiterindustrie herstellen. Die Firma Gottlieb Binder in Holzgerlingen entwickelt eine solche Haftfolie derzeit zu einem kommerziellen Produkt weiter. Die potenzielle Verwendung erstreckt sich von einer Schutzfolie für empfindliche Gläser bis zu wieder benutzbaren Klebunterlagen – Kühlschrankmagnete ade, jetzt kommen die Mikrohärchen, die allerdings auch an Spiegel, Schrank und Scheibe haften. Das Vorbild für die pilzförmigen Mikrogenoppen der Folie hat der Ampferblattkäfer geliefert (**Abb. D**). Das erste kommerzielle biomimetische Klebeband ist also eher ein Insekten-Klebeband.

Schlagwörter: Biomimetik/Bionik, Haftkraft, Kapillareffekt, Kontaktfläche, Rasterkraftmikroskop, Van-der-Waals-Kräfte

Lesetipp: Zdenek Cerman, Wilhelm Barthlott, Jürgen Nieder, Erfindungen der Natur. Bionik – Was wir von Pflanzen und Tieren lernen können, Rowohlt Taschenbuch, 2005

Internetlinks: www.br-online.de/wissen-bildung/thema/bionik/index.xml
www.planet-wissen.de/pw/Artikel/A9E8DA9C8859102AE0340003BA04DA2C.html

DIE „MAX“-REIHE

auch unter www.max-wissen.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: