

Seminararbeit im wissenschaftspropädeutischen Seminar

Rahmenthema: Bionik

Kursleiter: Frau Holfeld

Verfasser: Kevin Kulawik

Thema: Oberflächenstrukturen aus Flora und Fauna und ihre technischen  
Anwendungsmöglichkeiten

Abgabetermin: 10.11.2015

Note der Seminararbeit (Punktezah): .....

Note der Präsentation (Punktezah): .....

Unterschrift des Kursleiters: .....

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	
1.1 Grundbegriff Bionik und Teilgebiet Oberflächenstruktur .....	3
1.2 Wilhelm Barthlott .....	3
2. Hauptteil	
2.1 superhydrophobe, anti-adhäsive Oberflächen	
Lotus-Effekt .....	4
Nepenthes-Pflanze .....	6
Springschwanz .....	8
2.2 reibungsvermindernde Oberflächen	
Salvinia-Effekt.....	10
Haihaut .....	12
Sandfisch .....	14
2.3 haftende Oberflächen	
Gecko.....	17
Kratzwurm .....	19
3. Fazit.....	20
4. Literaturverzeichnis .....	22
4.1 Bücher	
4.2 Zeitschriften	
4.3 Internetseiten	
5. Quellenverzeichnis.....	25
5.1 Abbildungen	

## 1. Einleitung

Die Evolution führt dazu, dass sich die Pflanzen (Flora) und die Tiere (Fauna) an ihre Umgebung und Lebensbedingungen anpassen und sich dadurch dauerhaft weiterentwickeln. Die daraus entstehenden Eigenschaften der Natur nutzt die Technik. Die Wissenschaft, die die Eigenschaften und Phänomene aus der Biologie in die Technik überträgt, nennt man Bionik. (1)

Somit setzt sich der Grundbegriff Bionik aus (den Gebieten) Biologie und Technik zusammen.

Vor allem in den letzten Jahrzehnten hat sich die Bionik zu einer etablierten Wissenschaft entwickelt, die als innovativ, nachhaltig und ressourcenschonend gilt, da sie die Lösungen für technische Fragen stets in der Natur sucht. (2, Herper, 2013, S. 34)

Ein großes und interessantes Teilgebiet der Bionik ist die Oberflächenstruktur aus Flora und Fauna. Durch ihre Vielzahl an biologischen Vorbildern und den daraus resultierenden vielfältigen technischen Anwendungen ist es ein besonders ausgeprägtes und auch auf Grunde dessen ein wichtiges Gebiet der Bionik. Oberflächen sind Grenzflächen zwischen einem Organismus und seiner Umgebung, welche individuelle Eigenschaften und Funktionen besitzen, die beispielsweise durch eine spezifische Formgebung hervorgerufen werden. Funktionen wie Adhäsion, Selbstreinigung, Reibung, Antifouling und Haftung werden in dieser Arbeit dargelegt, da sie häufig bei Oberflächen von Tieren und Pflanzen auftreten und auch bionische Umsetzungen in technische Anwendungen vorliegen. (3)

Einer der erfolgreichsten Bioniker ist der im Jahre 1946 geborene Botaniker Wilhelm Barthlott. Er ist bekannt für seine Arbeiten in der Systematik, Biodiversitätsforschung und Grenzflächenforschung, in der er seine größten Erfolge nachweisen kann (4). Ihm wurden zahlreiche Preise verliehen, die seine innovativen Errungenschaften auszeichnen, welche zum Schutz und zur Erhaltung der Umwelt beitragen. Mit Hilfe der Raster-Elektronenmikroskopie erforschte er pflanzliche Oberflächen, die unter anderem zur Entdeckung und Anwendung des Lotus-Effekts führten. Dieser hat eine weltweite Bekanntheit errungen, da es viele Verwendungsmöglichkeiten in der Technik gibt. Momentan erforscht W. Barthlott den Salvinia-Effekt, bei dem Luft haltende Oberflächen zu einer Reibungsverminderung führen. (5)

## 2.Hauptteil

### 2.1 superhydrophobe und anti-adhäsive Oberflächen

Aufgrund einer enormen Artenvielfalt von Pflanzen und Tieren gibt es auch eine große Vielfalt an unterschiedlichen Oberflächenstrukturen. Von hohem technischem Interesse ist das Nachahmen solcher Strukturen, welche zum Beispiel durch eine Superhydrophobie (extreme Wasserabweisung) und Antiadhäsion (keine Haftung zwischen Flüssigkeit und Oberfläche) zur Selbstreinigung führen.

#### Lotus-Effekt

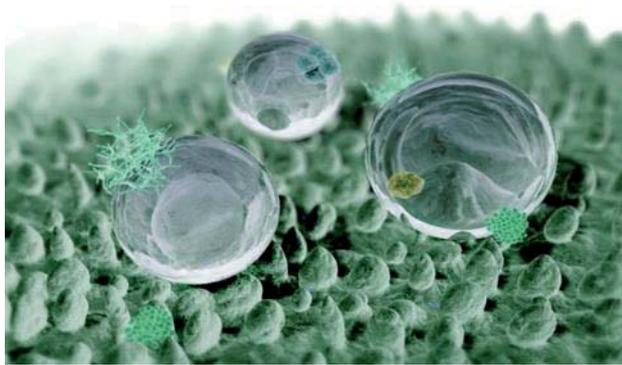
Eine solche superhydrophobe und anti-adhäsive Oberfläche kennzeichnet der Lotus-Effekt. Er beschreibt die geringe Benetzbarkeit von Grenzflächen, das heißt eine Flüssigkeit hat einen geringen Kontakt mit der Oberfläche eines Festkörpers. Dies führt dazu, dass die Flüssigkeit, in diesem Fall Wasser (Abb. 1), abperlt und gleichzeitig Schmutzpartikel aufnimmt. (6)



**Abb. 1:** *Der Lotus-Effekt*

Dieser Effekt ist schon seit 2000 Jahren in Asien bekannt. Dort wächst die Lotusblume (*Nelumbo nucifera*), welche den Lotus-Effekt nutzt, um sich vor einer Besiedlung von Mikroorganismen, Keimen und dem Bewuchs von Algen in Sümpfen und Tümpeln zu schützen. Ebenfalls weisen auch andere Pflanzen diesen Effekt auf, wie die Kapuzinerkresse, an der Wilhelm Barthlott in den 1970er Jahren den Lotus-Effekt elektronenmikroskopisch entdeckte. Aufgrund der hohen Oberflächenspannung versuchen Wassertropfen ihre Oberfläche zu minimieren. Dies führt zur typischen Kugelform. Durch die geringe Benetzbarkeit der Pflanze und die hohe Oberflächenspannung der Wassertropfen kommt es zu einer minimalen Auflagefläche des Wassers (0,6%). Dies hat ein Abperlen des Wassers zufolge. Außerdem kommt es zu einer

Selbstreinigung durch eine hydrophobe Doppelstruktur der Oberfläche, welche als superhydrophob bezeichnet wird. Der erste Teil dieser Doppelstruktur ist eine charakteristisch geformte Epidermis, eine Schicht aus Zellen, die sich an der Oberseite und Unterseite eines Blatts befindet. Diese bildet Erhebungen, sogenannte Papillen (vergleiche Abb. 2), welche 10-20  $\mu\text{m}$  hoch sind und einen jeweiligen Abstand von 10-15  $\mu\text{m}$  haben. Der zweite Teil sind aufgelagerte hydrophobe Wachse (Kutikula), die die Zwischenräume der Papillen wasserfrei halten. Dies hat zur Folge, dass die Kontaktfläche zwischen der Blattoberfläche und den auf ihr liegenden Wassertropfen und Schmutzpartikeln minimal ist. So werden alle Schmutzpartikel, auch hydrophobe (wasserabweisende) vom Wasser weggespült, weil die Bindung zur Blattoberfläche geringer ist, als zum Wasser. (6)



**Abb. 2:** Wassertropfen spülen Schmutzpartikel auf der Blattoberfläche weg

Kein Schutz besteht jedoch vor stark benetzbaren Lösungsmitteln, wie zum Beispiel Tinte. Diese Tatsache schränkt die vielen Einsatzmöglichkeiten in der Technik allerdings nur gering ein.

Das bekannteste Produkt ist die Fassadenfarbe „Lotusan“, die mit Hilfe von Silikontechnologie hergestellt wird. Ihre Strukturen sind nicht ganz so fein wie beim Lotusblatt aber dennoch wirkungsvoll. Häuser bleiben bei ihrer Anwendung länger sauber und müssen somit seltener nachgestrichen werden. Momentan sind etwa 600.000 Gebäude auf der ganzen Welt mit „Lotusan“ bestrichen (zum Vergleich - es gibt circa 20 Millionen Gebäude in Deutschland). Eine solche Farbe kann aber beispielsweise auch „auf Bahnwaggons (...) aufgebracht, dem Sprayer-Unwesen ein Ende bereiten: Der Farbspray haftet nicht, und der nächste Regenguß (!) wäscht alles ab“. (7, Nachtigall, 1997, S. 45)

Ebenfalls haben zwei schweizer Firmen, unter dem Markennamen „NanoSphere“, schmutzabweisende Textilien entwickelt. Untersuchungen ergaben, dass diese Textilien Kaffee und Rotwein sogar nach mehrfachen Waschgängen problemlos abfließen lassen.

(6)

Produkte, wie selbstreinigende Brillengläser, Bratpfannen, Dachziegel, Markisen und diverse Sprays für Textilien und Keramik haben nichts mit der ursprünglichen Marke Lotus-Effekt® zu tun. Sie besitzen beziehungsweise stellen keine patentierten selbstreinigenden mikro- bis nanostrukturierten Oberflächen her. (8)

Man versuchte ebenfalls mit Hilfe des Lotus-Effekts selbstreinigende Autolacke und Fensterscheiben herzustellen. Das Problem dabei war allerdings, dass die Oberflächen, aufgrund erhöhter Rauheit, automatisch matt beziehungsweise undurchsichtig wurden und somit für Fensterscheiben nicht geeignet waren.

Ein weiterer Versuch war es Flugzeuge mit Lotuseffekt-Oberflächen auszustatten. Man erhoffte sich, dass sich auf diese Weise keine Eiskristalle durch Wassertropfen auf den Tragflächen bilden. Somit müsste man das Flugzeug anschließend nicht mehr enteisen und man würde Zeit und Energie sparen. Dieses Experiment scheiterte allerdings ebenfalls. „Bei Reisegeschwindigkeiten von bis zu 1000 Stundenkilometer werden Staubteilchen, Hagelkörnchen und Regentropfen zu winzigen Geschossen“ (9), die die Struktur der Lotuseffekt-Beschichtung zerstören.

#### Nepenthes-Pflanze

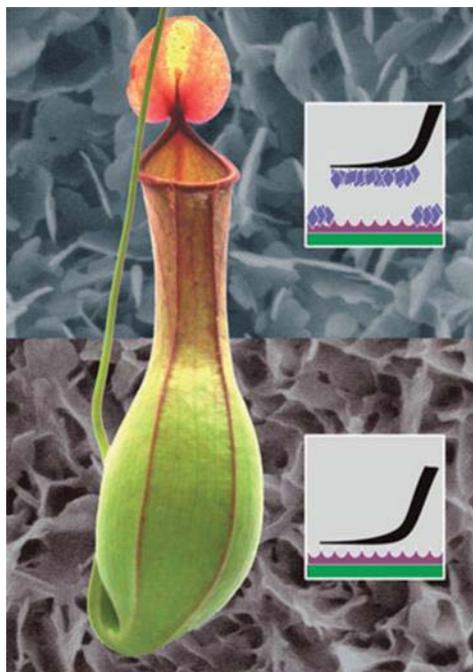
Eine mögliche Lösung für diese Probleme weist die, in den Tropen verbreitete, fleischfressende Kannenpflanze Nepenthes auf.

Sie besitzt einen komplexen Aufbau mit Deckel, Kannenrand, einer Gleit- und einer Verdauungszone, mit einem Vorrat an Verdauungsflüssigkeit. Die Gleitzone hat eine Hauptrolle beim gelungenen Fallenstellen. Dieser Bereich ist von einer Schicht kristalliner Wachse bedeckt, auf der die Insekten den Halt verlieren und in die Verdauungsflüssigkeit hinab rutschen.

Forscher vom Max-Planck-Institut für Metallforschung und der Universität Hohenheim haben die Wachsschicht der Gleitzone untersucht und herausgefunden, dass sie aus zwei übereinanderliegenden Schichten besteht. „Die obere (weichere) Wachsschicht besteht aus einzelnen unregelmäßigen 30-50 Nanometer dicken Plättchen, die sich (...) senkrecht zur unteren Schicht und zur Oberfläche der Kannenwand anordnen“ (10).

Die untere Schicht „besteht aus miteinander verbundenen Membranplättchen, die in spitzem Winkel aus der Oberfläche herausragen und keine klare Ausrichtung zeigen“ (10).

In einem Laborexperiment mit Käfern zeigte sich, dass die Wachsschichten die Haftkraft der Insekten auf unterschiedlicher Weise reduzieren (wie in Abb. 3 erkennbar). Die Kristalle der oberen Wachsschicht verschmutzen die Haftorgane der Insekten, während die untere Wachsschicht die Haftfläche reduziert, über die die Insektenfüße mit der Pflanzenoberfläche in Berührung kommen. (10)



**Abb. 3:** Die Kannenpflanze *Nepenthes* und Schema der Wirkungsweisen der unterschiedlichen Schichten. Im Hintergrund: rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Schichten

Forscher entwickelten bereits eine Oberfläche, nach dem Vorbild der Nepenthes-Pflanze, namens „SLIPS“ (Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces). Als porösen Grundstoff nutzten die Forscher Nanofasern aus Teflon, welche sie mit einer Fluor-Kohlenwasserstofflösung imprägnierten. Diese Oberfläche zeigte, dass im Gegensatz zum Lotus-Effekt auch Blut und Öl nicht haften bleiben (omniphob), selbst bei einem geringen Neigungswinkel. Ein weiterer Unterschied ist, dass sich das neue System bei kleinen Beschädigungen selbst heilen kann. Auch bei Frost und bei Überdruck funktioniert „SLIPS“ ohne Einschränkungen. (11)

Diese neuartige Oberflächenstruktur hat ebenso wie der Lotus-Effekt viele Anwendungsmöglichkeiten. „Selbstreinigende Beschichtung für die Innenseiten von Benzin- oder Wasserleitungen, in medizinischen Kathetern oder Transfusionssystemen, aber auch als Schutzschicht gegen das Vereisen von Oberflächen“ (11). Somit könnte man versuchen Flugzeuge mit dieser Oberfläche auszustatten. Vielleicht hält diese Struktur den hohen Geschwindigkeiten besser stand als die Lotuseffekt-Oberfläche. Ebenfalls könnte man das Problem mit den nicht durchsichtbaren Fensterscheiben lösen, da man Oberflächen nach dem Nepenthes-Prinzip auch transparent herstellen kann.

### Springschwanz

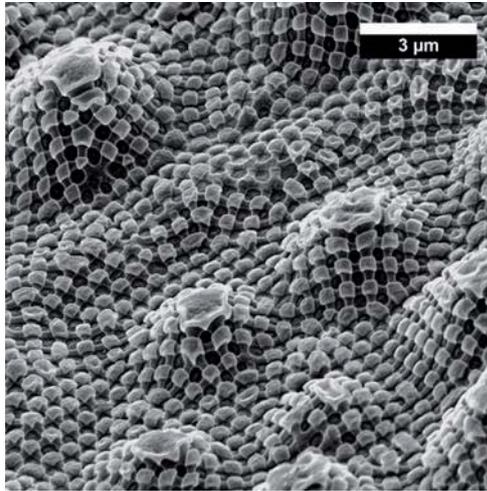
Eine weitere extrem wasserabweisende Oberfläche weist der Panzer des Springschwanzes (Collembola) auf. Der nur drei bis acht Millimeter große Sechsfüßer lässt sich meistens in Humusschichten feuchter Böden aber auch an Baumrinden und küstennahen Uferbereichen finden. (12)



**Abb. 4:** *Der Springschwanz Collembola*

Im Gegensatz zu anderen Insekten in diesen Lebensräumen atmet der Springschwanz aber durch seine Haut. Auch bei Regen und in feuchten Erdbereichen ist die Atmung durch eine Lufthülle auf der Körperaußenhülle möglich. Diese Lufthülle bildet sich durch eine besondere Struktur seiner Haut. Eine Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop (Abb. 5) zeigte, dass es sich um eine Wabenstruktur mit gleichmäßig angeordneten Erhebungen handelt. Öffnungen der Waben ermöglichen dem Springschwanz den Gasaustausch für die Atmung. Im Querschnitt zeigt sich, dass

die Wabenstruktur pilzförmige Überhänge bildet. Dadurch können Flüssigkeiten die Haut nicht benetzen und die Haut bleibt trocken. (13)



**Abb. 5:** *rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Springschwanzhaut*

Ein Vorteil gegenüber dem Lotusblatt ist, dass die Oberfläche des Springschwanzes omniphob ist. Das bedeutet, dass sie sowohl Wasser als auch organische Flüssigkeiten abperlen lässt. Außerdem ist die Haut viel robuster gegen Abnutzung als pflanzliche Oberflächen. (13)

Materialforscher des Leibniz-Instituts für Polymerforschung in Dresden ist es gelungen synthetische Polymermembranen beziehungsweise Kunststofffolien herzustellen, die die charakteristischen Merkmale und Benetzungseigenschaften der Hautstruktur von Springschwänzen nachahmen. Diese Folien sind mechanisch sehr stabil, wasser- und ölabweisend und sehr zuverlässig. (14)

Nutzen könnte man solche Folien beziehungsweise Beschichtungen für chirurgische Werkzeuge oder medizinische Utensilien wie Katheter. Diese kommen häufig in Kontakt mit grenzflächenaktiven Stoffen und werden von gefährlichen Mikroorganismen besiedelt.

In Zukunft wollen die Forscher aus Dresden feine Laserstrahlen verwenden, um größere Oberflächen mit der Struktur der Springschwanzhaut auszustatten. Wenn sie dies schaffen, könnte man auch umfangreichere Einsätze planen. (15)

## 2.2 reibungsvermindernde Oberflächen

Industrie und Forschung sind ebenfalls daran interessiert Schäden und Verluste, welche

durch Verschleiß und Reibung entstehen herabzusetzen. „Durch Reibung, Verschleiß und Korrosion gehen in Industrieländern 4,5% des Bruttosozialprodukts verloren. Allein für die Bundesrepublik Deutschland bedeutet dies Verluste von etwa 35 Milliarden Euro pro Jahr“ (2, Herper, 2013, S. 29). Reduktion von Reibung ist beispielsweise ein wichtiges Thema bei sämtlichen Transport- und Verkehrssystemen. In der Schifffahrt geht ein enormer Teil der Antriebsenergie (bis zu 70%) durch die Reibung des Wassers am Schiffsrumpf verloren.

Diesen Energieverlust kann man reduzieren, indem Schiffsrumpf und Wasser durch eine Luftschicht getrennt werden. (16)

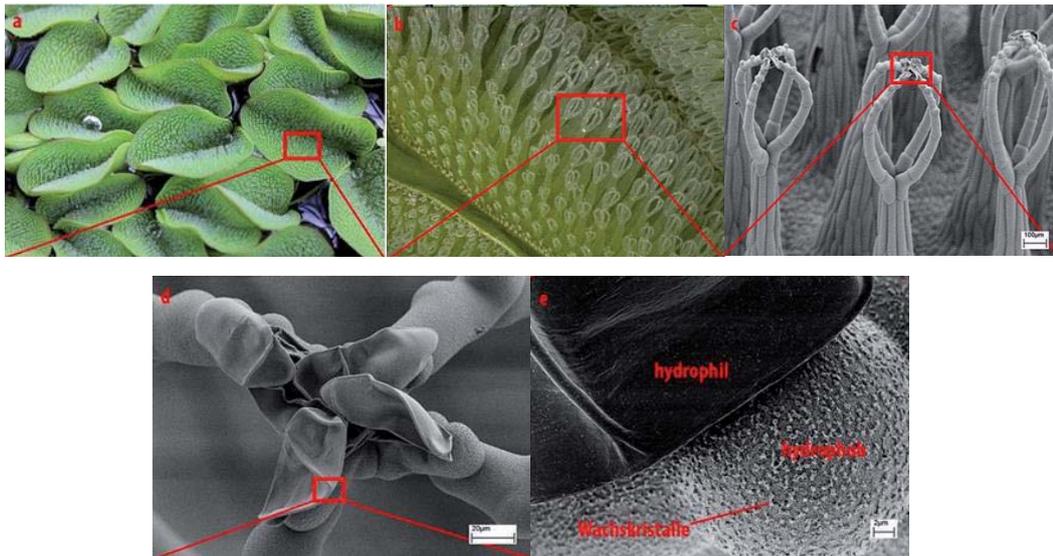
### Salvinia-Effekt

Der Salvinia-Effekt kennzeichnet eine derartige Oberfläche, die stetig eine Luftschicht unter Wasser halten kann.

Er wurde vom Bioniker Wilhelm Barthlott entdeckt, und seit 2002 an Tieren und Pflanzen untersucht. Neben dem Rückenschwimmer Notonecta (eine Wasserwanze) weist der Schwimmpflanz Salvinia diesen Effekt auf. (17)

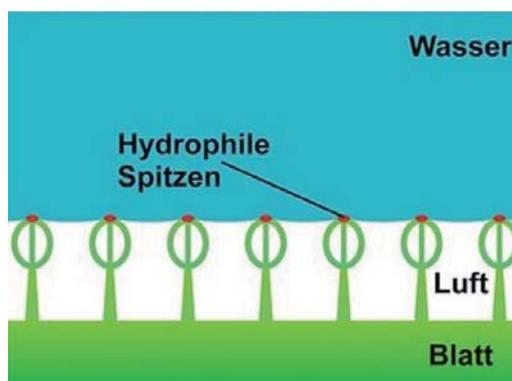
Sie kommt in stehenden oder langsam fließenden Gewässern in den tropischen Gebieten Mittel- und Südamerikas vor und kann bis zu 20 Zentimeter groß werden. Wegen ihrer Anpassung kann sie ganze Wasseroberflächen überwuchern. Zudem ist sie die Gefäßpflanze mit der schnellsten Wachstumsgeschwindigkeit, da sich ihre Biomasse innerhalb von vier Tagen verdoppelt. (18)

Verantwortlich für den Salvinia-Effekt sind mikroskopisch kleine, elastische, superhydrophobe Haare mit einer hydrophilen Spitze an der Blattoberfläche. Von den untersuchten Salvinia Arten hat die Salvinia molesta auch genannt „Giant Salvinia“ die komplexeste Haarstruktur, wie in Abbildung 6 dargestellt. Auf einem gemeinsamen Sockel stehen je vier Haare, die an ihren Spitzen miteinander verbunden sind. Da sie wie ein kleiner Schneebesen aussehen, werden sie auch Schneebesen-Haare genannt. Die gesamte Blattoberfläche und die Haare sind außerdem mit Wachskristallen überzogen, welche für die Hydrophobie verantwortlich sind. Die vier Zellen der Spitzen der Schneebesenhaare sind allerdings wachsfrei und somit hydrophil. (17)



**Abb. 6:** a: Schwimmfarne *Salvinia molesta*, b/c: Schneebesenhaare, d: hydrophile Spitzen, e: hydrophiler und hydrophober Teil der Haarspitzen

Durch diese superhydrophobe Oberfläche mit hydrophilen Stellen an den Haarspitzen wird eine langzeit- und druckstabile Luftschicht erreicht. *Salvinia molesta* ist dadurch, im Gegensatz zu anderen hydrophoben Oberflächen, in der Lage, die Luftschicht unter Wasser für mehrere Wochen zu halten, ohne dass Wasser zwischen die einzelnen Haare gelangt. Durch die hydrophilen Spitzen wird das Wasser also in regelmäßigen Abständen an der Pflanze „festgetackert“ und die darunterliegende Luftschicht (Abb. 7) kann nicht entweichen. (17)



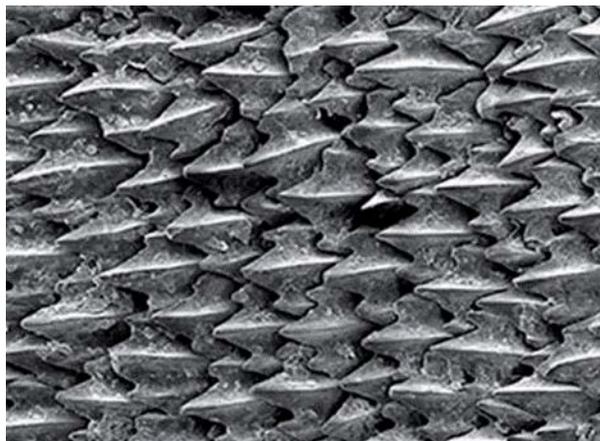
**Abb. 7:** Luftschicht zwischen Wasser und Blatt

Durch den Einsatz einer Luftschicht zwischen Wasser und Schiffsrumpf könnte man laut Schätzungen der Forscher eine Reibungsreduktion von 10% erreichen. „Man könnte so wahrscheinlich ein Prozent des weltweiten Gesamtverbrauchs an Treibstoff einsparen“

(19), prognostiziert Professor Barthlott. Dies hat sowohl für die Ressourcenschonung als auch für den Umweltschutz eine große Bedeutung. Abgesehen davon würde man ebenfalls die Kosten senken. Ein anderes positives Resultat der Luftschicht ist, dass es zu einem Antifouling-Effekt kommt. Unerwünschte Feststoffe wie zum Beispiel Muscheln können dadurch nicht den Schiffsrumpf besiedeln und anwachsen. Im Gegensatz zu den bisherigen giftigen Mitteln, die gegen die Anlagerung eingesetzt wurden, ist die Luftschicht, die durch den Salvinia-Effekt entsteht somit auch noch umweltfreundlich. (19)

### Haihaut

Einen weiteren Ansatz für die Widerstandsverminderung in der Technik bieten schnell schwimmende Haie. Sie besitzen eine besondere Strukturierung der Schuppenoberfläche, sogenannte Riblets (engl. kleine Rippen).



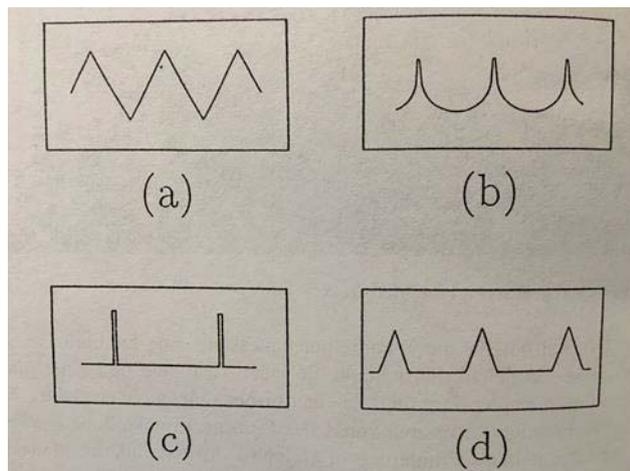
**Abb. 8:** Schuppenoberfläche (Riblets) der Haie

Die feinen Rillen in den Schuppen sind so ausgerichtet, dass sie in Schwimmrichtung durchgezogene Linien beziehungsweise Rinnen längs der Körperachse bis hin zur Schwanzflosse erzeugen. Aufgrund dieser besonderen Struktur fließen die Wasserteilchen geordnet am Körper des Hais entlang, es entstehen keine turbulenten Strömungen und der Reibungswiderstand wird relativ gering gehalten. Je feiner und ausgeprägter diese Rillen sind, desto schneller schwimmt der Hai und umso mehr Energie spart er. (20)

Da die Schuppen des Hais auch noch beweglich sind, entsteht zusätzlich noch ein Antifouling-Effekt. Die Schuppen können sich folglich so überlagern, dass sich keine

Parasiten an ihnen festsetzen. Dies führt ebenfalls zur Minimierung des Strömungswiderstands. (21)

Da diese Energieersparnis auch in der Technik erwünscht ist, wurden zahlreiche Untersuchungen, zur Optimierung reibungsvermindernder Oberflächen, durchgeführt. In Berlin stellten Dietrich W. Bechert und sein Forschungsteam künstliche Haihaut mit unterschiedlichen Rippenformen (Abb. 9) her und machten damit Versuche in einem Strömungskanal. (22)



**Abb. 9:** untersuchte Rippenformen

Dieser Kanal vergleicht die Schubkräfte einer Testplatte und einer glatten Referenzplatte direkt miteinander. Er wurde mit viereinhalb Tonnen Babyöl gefüllt, welches eine höhere Viskosität als Wasser hat. Diese größere Viskosität hat den Vorteil, dass die zu untersuchenden Oberflächenrippen (Rippenabstand 5 mm) auch größer sein können, als die beim Hai (Rippenabstand 0,5 mm). Somit hatte man weitaus einfachere Fertigungsmöglichkeiten für Testoberflächen, welche aus 800 beweglichen Schuppen bestanden.

Die Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass die Rippenform (a) eine Reibungsverminderung von 5,4%, (b) 8%, (c) 10,2% und (d) 8,5% ergab.

1996 wurde anschließend eine Riblet-Folie der Firma „3M“, mit der Rippenform (d), auf einen Airbus 320 geklebt. Rippenform (d) hat zwar nicht die größte Reibungsverminderung, ist aber für praktische Einsätze am besten geeignet, weil sie transparent hergestellt werden kann. Ein Testflug ergab eine Treibstoffersparnis von 1,5%. Bei langen Flugstrecken also ein nicht zu vernachlässigendes Einsparpotenzial. Trotzdem

fliegen aktuell Flugzeuge ohne Riblet-Folien, da es einige Probleme gibt. Für große Temperaturunterschiede ist die Folie nicht resistent genug. Außerdem vergilbt sie durch die UV-Strahlung in großer Höhe und wird zerbrechlich. Inzwischen wird an einer Lackiertechnik gearbeitet, welche feine Mikrostrukturierungen direkt auf die Oberflächen auftragen soll. Vermutlich ist dies eine bessere Alternative zur Folie. (22, von Gleich, 1998, S. 238 ff.)

Die Riblet-Folie von „3M“ wäre allerdings auch an anderen Stellen einsetzbar, beispielsweise an Autos, Schiffen und Booten. 2010 gewann sogar ein Trimaran (ein Boot mit drei parallel angeordneten, sehr dünnen Auflageflächen), das mit dieser Folie beklebt war den 33. America's Cup. Dieser ist die bekannteste und älteste internationale Segelregatta.

Ein weiteres Produkt mit dem „Haihaut-Effekt“ ist ein Schwimmanzug der Marke „speedo“. Dieser verringert den Widerstand laut Hersteller um 4%. Er wurde zudem bei den olympischen Spielen 2004 von Michael Phelps getragen, welcher 8 Goldmedaillen gewann. (20)

### Sandfisch

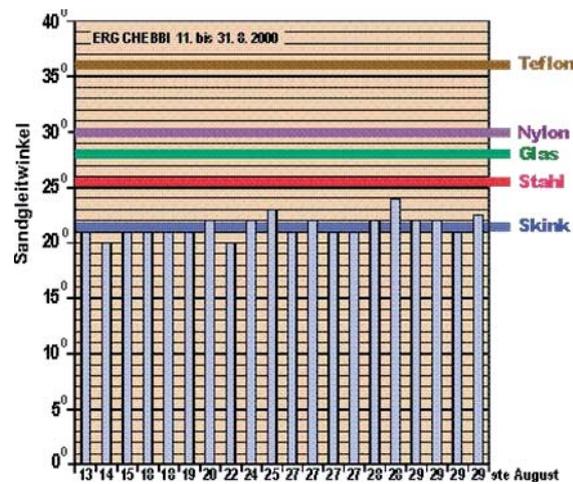
Auch einige Landtiere, wie der Sandfisch (auch genannt Sandskink) haben ihren Reibungswiderstand ideal minimiert. Die bis zu 20 cm langen Echsen leben in den Wüsten Saudi-Arabiens und Nordafrikas und sind an diesen Lebensraum optimal angepasst. Sie können sich angesichts einer besonderen Schuppenoberfläche blitzschnell im Sand eingraben und unter der Oberfläche längere Strecken zurücklegen. (23)



**Abb. 10:** *Der Sandfisch*

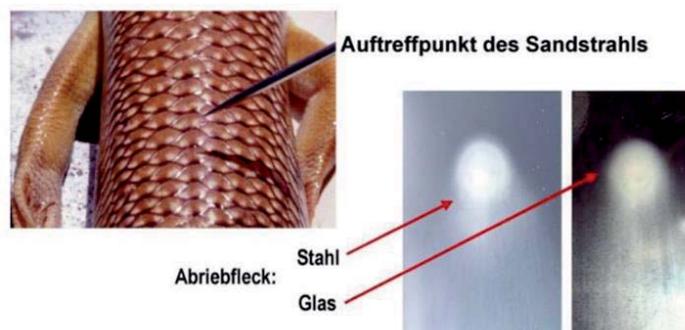
Im Jahr 2000 wurden erste Reibungsmessungen an Sandfischen (*Scincus albifasciatus*) in der Wüste Erg Chebbi (Marokko) vom Forscher Ingo Rechenberg und seinem Team

durchgeführt. Sie konstruierten einen Gleitreibungsmesser, mit dem sie einen Sandstrahl auf Oberflächen (zum Beispiel Rücken eines Sandfisches) fließen lassen konnten. Die Oberflächen konnten sie in verschiedenen Neigungswinkel aufstellen. Mit diesem Versuch fanden sie heraus, dass Sand bis zu einem Winkel von  $21^\circ$  auf der Sandfischhaut fließt. Der Gleitreibungswinkel (der Winkel, bei dem der Sand aufhört zu rutschen) liegt also bei  $20^\circ$ . In derselben Versuchsreihe wurden auch die Gleitreibungswinkel von Stahl, Glas, Nylon und Teflon gemessen (Abb. 11), welche alle über  $25^\circ$  lagen. (24)



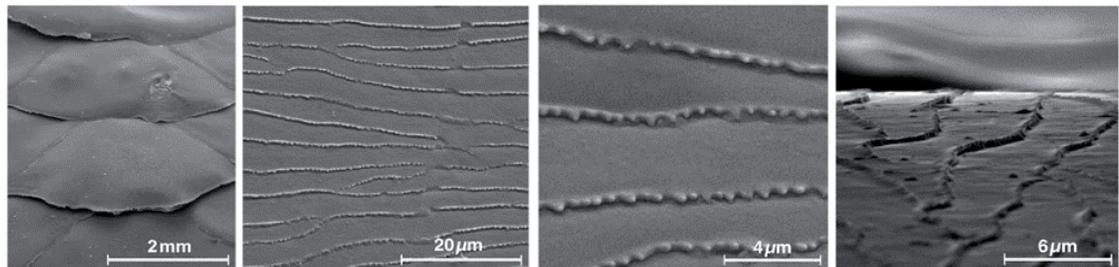
**Abb. 11:** minimaler Sandgleitwinkel verschiedener Oberflächen

Ebenfalls zeigte die Sandfischhaut nicht geringste Abreibungsspuren, nachdem ein 30 cm langer Sandstrahl 10 Stunden auf sie aufprallte. Im Gegensatz dazu ist bei einer Glas- oder Stahloberfläche bei den gleichen Bedingungen ein deutlicher Abriebfleck zu sehen. (24)



**Abb. 12:** Auftreffpunkte des Sandstrahls

Elektronenmikroskopische Aufnahmen einer Sandfischschuppe (Abb. 13) zeigen eine Schwellenstruktur, die überraschenderweise quer zur Sandströmungsrichtung verläuft. Die Mikroschwellen sind etwa 1  $\mu\text{m}$  breit, 1  $\mu\text{m}$  hoch und 8  $\mu\text{m}$  voneinander entfernt. Da ein Sandkorn im Durchschnitt 0,3 mm groß ist, ergibt sich rechnerisch, dass ein Sandkorn auf circa 38 Mikroschwellen gleichzeitig aufliegt. An den Enden der Schwellen sieht man außerdem sogenannte Nanospikes. (25)



**Abb. 13:** Oberflächenstruktur des Sandfisches in unterschiedlichen Vergrößerungen

Eine kleine Glasscherbe, welche man am Wüstenboden fand, führte zur Funktion der Schwellenstruktur. Die Glasscherbe war mit einer dünnen Ton-Mineralschicht überzogen, dadurch hatte das Glas eine matte Oberfläche. Aufnahmen mit dem Elektronenmikroskop zeigten, dass die Sandkörner der Wüste mit Tonmineralen bedeckt sind. Wenn die Sandkörner mit der Glasscherbe in Kontakt kommen lösen sich Tonminerale und überziehen das Glasstück. Damit dies nicht mit dem Sandfisch passiert und die Tonminerale nicht an der Haut reiben, hat er diese spezifische Schwellenstruktur. Die Querschwellen funktionieren also wie Bürsten, welche die Tonminerale von den Sandkörnern abstreifen. So gleiten die Sandkörner über die Sandfischhaut ohne eine kratzende Reibung. Damit die Tonminerale nicht durch die elektrostatische Aufladung, welche durch die schnelle Bewegung im Sand entsteht, am Sandfisch festkleben, besitzt er Nanospikes, welche als eine Art Blitzableiter funktionieren.

Technische Anwendungsmöglichkeiten gibt es laut Rechenberg genug. Als verschleißfreie Oberfläche von Mehrwegflaschen, für die Herstellung von Sandboards, für Fußbodenbeläge oder für die innere Auskleidung von Kanälen für den Feststofftransport. Zudem könnte man Oberflächen von Gebäuden mit einer künstlichen Sandfischhaut ausstatten. Im Idealfall würde so kein Sand mehr an ihnen haften bleiben. Dies wäre beispielsweise in Wüstenstädten wie Doha vorstellbar, da es

dort sehr windig ist und deshalb große Mengen Sand in der Luft bewegt werden. Unglücklicherweise ist es bis jetzt noch nicht gelungen einwandfreie Nachbildungen der Sandfischhaut herzustellen. (25)

### 2.3 haftende Oberflächen

Während der Evolution haben Tiere und Pflanzen unterschiedlichste Vorgehensweisen etabliert, um dauerhaft oder reversibel an verschiedenen Oberflächen zu haften. Die reversiblen Haftsysteme haben handelsüblichen Klebstoffen voraus, dass sie rückstandslos und ohne Beschädigung voneinander getrennt und wiederverwendet werden können. Für die Bionik wäre es ein weiterer positiver Aspekt, wenn diese Haftverbindungen auf diversen Untergründen und auch bei unterschiedlichen Umweltbedingungen immer noch hochleistungsfähig sind. Ein Tier, welches diese Bedingungen vollständig erfüllen kann, ist der Gecko, dessen Haftverbindung auf einer trockenen Adhäsion (Aneinanderhaften zweier Grenzflächen ohne Verkleben) basiert. (26)

#### Gecko

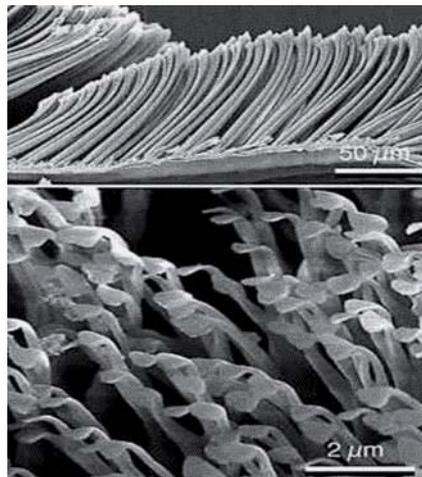
Auf der Suche nach Nahrung, wie auch bei der Flucht vor Fressfeinden findet der Gecko auf beinahe sämtlichen Untergründen halt. Selbst ein ausgewachsener Gecko, der circa 40 cm lang und 300 Gramm schwer ist, kann ohne Schwierigkeiten senkrecht und sogar über Kopf auf einem Gegenstand laufen. Dabei kann er in Millisekunden zwischen haften und ablösen umschalten.

Diese Fähigkeiten werden den Geckos durch eine besondere Oberflächenstruktur an den Füßen geboten. Betrachtet man die Zehen nämlich nur mit dem Auge, erkennt man eine Lamellenstruktur. (27)



**Abb. 14:** sichtbare Lamellenstruktur an den Zehen des Geckos

Bei Verwendung des Lichtmikroskops entpuppen sich diese Lamellen als vollbesetzte Felder von hauchfeinen Haaren. Jeder Fuß eines Geckos besitzt ungefähr 500.000 Haare. Wenn man dann diese Mikrometer großen Haare (Setae) noch genauer mit dem Elektronenmikroskop betrachtet, sieht man, dass sie sich an den Enden zu hunderten, Nanometer großen Blättchen (Spatulae) aufspalten. Die Blättchen sind sehr biegsam und können sich dadurch perfekt an den jeweiligen Untergrund anpassen. (27)



**Abb. 15:** elektronenmikroskopische Aufnahmen von Setae und Spatulae

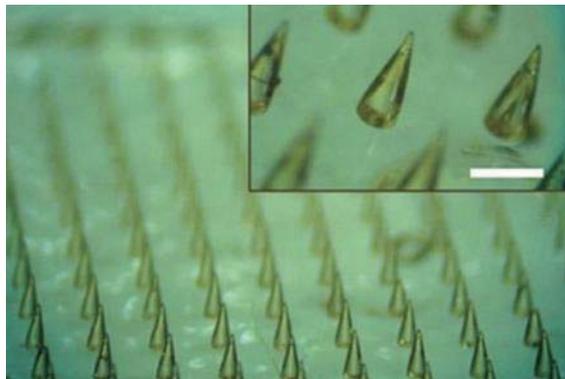
Der entscheidende Punkt aber, weshalb die Geckos selbst an einer Glaswand haften, sind die „Van-der-Waals-Kräfte“, welche zwischen Blättchen und Untergrund wirken (27). „Diese sind zwar weitaus schwächer als chemische Bindungen, besitzen aber den Vorteil, dass jede Einzelverbindung für sich leicht gelöst werden kann und dennoch aus der Summe der Vielzahl von Kontaktpunkten eine hohe Haftwirkung resultiert“ (28). Ein mögliches Anwendungsgebiet, für das Haftsystm der Geckos, ist die Robotertechnik. Ein Maschinenbauingenieur aus Stanford entwickelte bereits einen Prototypen, genannt „Stickybot“, welcher senkrechte Glaswände empor laufen kann. Für die Füße des Roboters wurden Polyurethan-Haftpads benutzt, welche eine analoge Struktur zu den Gecko Füßen aufweisen. Diese Struktur ist jedoch nicht genauso fein wie beim tierischen Vorbild und kann somit nur ein geringes Gewicht tragen. Wenn man es aber in der Zukunft schafft, die Haftkraft solcher Roboter zu vergrößern, wäre ein Einsatz an gefährlichen und schwer erreichbaren Stellen, wie an hohen Gebäudefassaden, möglich. (26)

An der Christian-Albrechts-Universität in Kiel wurde, in Zusammenarbeit mit einer auf Befestigungstechniken spezialisierten Firma, eine Klebefolie (Gecko-Tape®) nach dem Prinzip des Geckos hergestellt. „Es funktioniert auf allen ebenen und glatten Oberflächen wie Glas, lackiertem Metall, Marmor, Keramik und Kunststoff. Die Zahl der Einsatzmöglichkeiten ist riesig“ (29), so der Projektchef. Zusätzlich zum industriellen und häuslichen Einsatz könnte man das Gecko-Tape® möglicherweise auch in der Medizin einsetzen, beispielsweise als Gewebekleber. Da der Bereich der Medizin aber sehr anfällig für innovative Produkte ist, wird bereits an einer noch besseren Neuheit, nach dem Vorbild des Kratzwurms geforscht.

### Kratzwurm

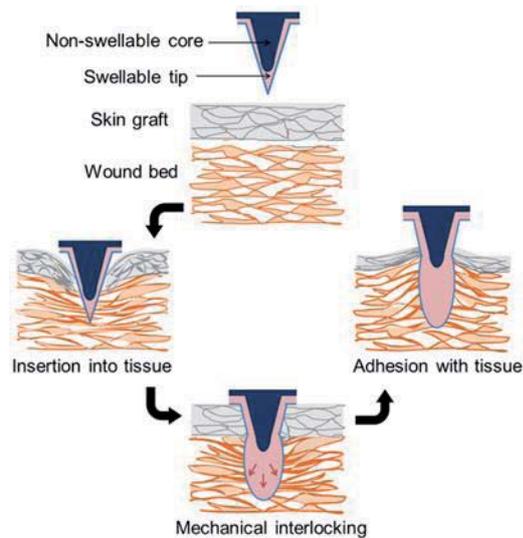
Der Kratzwurm ist ein Parasit, der sich im Fischdarm auffindet. Um nicht durch die Verdauung ausgeschieden zu werden, dringt dieser mit seinem Rüssel in die Darmwand ein. Durch die Aufnahme von Wasser wächst das Volumen des Rüssels, sodass er sich stark genug im Gewebe befestigt. Infolgedessen ist der Kratzwurm nicht mehr ohne weiteres loszuwerden.

Dieses Prinzip machen sich amerikanische Forscher zu Nutzen und entwickeln aktuell ein Pflaster (Abb. 16), welches mit Hunderten von Mikronadeln versehen ist. (31)



**Abb. 16:** Das „Mikronadel-Pflaster“

Diese Nadeln bestehen aus einem stabilen, unveränderbaren Kern und einer Spitze, an der sich Wasser einlagern kann. Im Gegensatz zum Kratzwurm hat das Pflaster nicht nur einen „Anker“. Der Grund dafür ist, dass das Pflaster mehrere Mikronadeln benötigt, um einen noch festeren Halt zu erzeugen, als die bisherigen mit Klebstoff beschichteten Pflaster. (31)



**Abb. 17:** Funktionsweise des Pflasters

Ein wesentliches Anwendungsgebiet dieser Pflaster sehen die Entwickler bei Hauttransplantationen. Dort ist eine zuverlässige Fixierung essenziell. Die transplantierte Haut und das darunterliegende Gewebe werden bisher mit Klammern befestigt. Diese Klammern führen aber oftmals zu Gewebeschäden und zu Infektionen, vor allem beim Entfernen der Klammern. Durch das Einsetzen des Pflasters wären diese Risiken ausgeschlossen, da „sich das Pflaster schonend entfernen [lässt], wenn es seine Funktion erfüllt hat“ (31).

Eine weitere Möglichkeit wäre es, die Nadelspitzen mit entzündungshemmenden Stoffen, wie Antibiotika zu beladen. Diese könnten so unmittelbar an der betroffenen Stelle in Wirkung treten (32). Durch dieses einzigartige Pflaster, nach dem Vorbild des Kratzwurms, könnten Ärzte also in Zukunft auf Nähen, Klammern und klebstoffbeschichtete Pflaster verzichten, um ihre Patienten zu heilen.

### 3.Fazit

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Bionik dem Menschen in verschiedenen Teilbereichen hilft. Mit der Hilfe dieser Wissenschaft entstehen nämlich innovative und fortschrittliche Produkte. Da diese Produkte auch energie- und ressourcenschonend sind, liefert die Bionik ebenfalls einen enormen Beitrag zur Nachhaltigkeit. Ein weiterer Beweis für die Nachhaltigkeit ist die Qualität der bionischen Lösungen. Diese ist relativ hoch, da die biologischen Vorbilder evolutionär erprobt, beziehungsweise durch Vorgänge wie Selektion, Mutation und Rekombination perfekt an ihre Umwelt angepasst worden sind.

Momentan sind geschätzt 75% aller Pflanzenarten und nur 10% bis 20% aller Tierarten auf der Welt entdeckt. Dadurch lassen sich Vermutungen aufstellen, dass es noch viele weitere nützliche Oberflächen gibt, welche man aus Flora und Fauna abstrahieren kann. Damit diese Vermutungen wahr werden, muss aber weiterhin eine genaue Forschung betrieben werden.

Zu einem der bedeutendsten Entwicklungs- und Forschungsstandorten im Bereich Bionik zählt Deutschland. Hier gibt es nämlich Forscher wie Wilhelm Barthlott, Forschungseinrichtungen wie das Leibniz-Institut für Polymerforschung und das Max-Planck Institut für Metallforschung und zahlreiche Hochschulen wie die Christian Albrechts Universität und die technische Universität in Berlin, die sich mit der Bionik auseinandersetzen und einen hohen Umsetzungswillen an erforschten Erkenntnissen haben.

Durch diesen Umsetzungswillen gründete sich beispielsweise 2001 das „Bionik Kompetenz Netz“ (kurz genannt „BIOKON“) in Berlin. Diese Forschungsgemeinschaft will die Bionik als Ideengeber vor allem in Deutschland noch zugänglicher machen, um das riesige Potenzial der Bionik nutzen zu können. (33)

Wenn sich die Bionik so noch mehr ausbreitet und noch bekannter wird, würden die Menschen möglicherweise auch ein höheres Umweltbewusstsein und mehr Respekt vor der Natur haben. Dies würde wiederum ein weiterer Vorteil für den Menschen sein, denn: „Alles, was gegen die Natur ist, hat auf Dauer keinen Bestand“ (Charles Darwin) (34).

## 4. Literaturverzeichnis

### 4.1 Bücher

- (2) Herper, J., Tribologische Untersuchungen von verschleiß- und reibungsarmen nanostrukturierten bionischen PVD-Beschichtungen, TU Dortmund, Vulkan Verlag, 2013
- (7) Nachtigall, W., Vorbild Natur, Berlin, Springer Verlag, 1997
- (22) Von Gleich, A., Bionik - Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?, Stuttgart, BG Teubner Verlag, 1998
- Günther, H.J., TRIZ und Bionik, Düsseldorf, Symposion Publishing Verlag, 2014

### 4.2 Zeitschriften

- (16) Barthlott, W., Leder, A., Luft haltende Schiffsbeschichtungen nach biologischem Vorbild zur Reibungsreduktion, in: BIONA- Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien, 2008, S. 3-31

### 4.3 Internetseiten

- (1) [http://www.planet-wissen.de/natur\\_technik/forschungszweige/bionik/](http://www.planet-wissen.de/natur_technik/forschungszweige/bionik/)  
aufgerufen am 07.06.2015
- (3) <https://de.wikipedia.org/wiki/Bionik>  
aufgerufen am 07.06.2015
- (4) [https://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_Barthlott](https://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Barthlott)  
aufgerufen am 07.06.2015
- (5) <http://www.lotus-salvinia.de/index.php/12-kategorie-deutsch/kontakt-ueber-uns/psite/11-prof-wilhelm-barthlott>  
aufgerufen am 07.06.2015
- (6) <https://de.wikipedia.org/wiki/Lotuseffekt>  
aufgerufen am 08.06.2015
- (8) [http://www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/page/4/?tx\\_nenews\\_uid=1644&cHash=20c131609f60c924f949a77c317e1c03](http://www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/page/4/?tx_nenews_uid=1644&cHash=20c131609f60c924f949a77c317e1c03)  
aufgerufen am 08.06.2015

- (9) [http://www.deutschlandfunk.de/flugzeuge-eisfrei-per-lotuseffekt.676.de.html?dram:article\\_id=298731](http://www.deutschlandfunk.de/flugzeuge-eisfrei-per-lotuseffekt.676.de.html?dram:article_id=298731)  
aufgerufen am 02.09.2015
- (10) <http://www.mpg.de/520822/pressemitteilung20060112>  
aufgerufen am 02.09.2015
- (11) <http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-13920-2011-09-22.html>  
aufgerufen am 02.09.2015
- (12) <https://de.wikipedia.org/wiki/Springschwanz>  
aufgerufen am 04.09.2015
- (13) [http://www.prozesstechnik-online.de/wissen/-/article/31534493/40051615/Hautstruktur-der-Springschwanz-als-Vorbild-fuer-Oberflaechen/art\\_co\\_INSTANCE\\_0000/maximized/](http://www.prozesstechnik-online.de/wissen/-/article/31534493/40051615/Hautstruktur-der-Springschwanz-als-Vorbild-fuer-Oberflaechen/art_co_INSTANCE_0000/maximized/)  
aufgerufen am 04.09.2015
- (14) <http://www.materialsgate.de/de/mnews/62339/Bionik+Trocken+mit+kunstlicher+Springschwanz-Haut.html>  
aufgerufen am 04.09.2015
- (15) <http://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-chemie/bionik-ein-perfekter-naesseschutz-12094531.html>  
aufgerufen am 04.09.2015
- (17) <https://de.wikipedia.org/wiki/Salvinia-Effekt>  
aufgerufen am 04.09.2015
- (18) [http://www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/page/1/?tx\\_nenews\\_uid=1644&cHash=84a5180523cf848a329a2b0213c90d32](http://www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/page/1/?tx_nenews_uid=1644&cHash=84a5180523cf848a329a2b0213c90d32)  
aufgerufen am 04.09.2015
- (19) [http://www.kit.edu/kit/pi\\_2010\\_964.php](http://www.kit.edu/kit/pi_2010_964.php)  
aufgerufen am 04.09.2015
- (20) <http://www.bionikvitrine.de/mediapool/99/996537/data/PDFs/Haihaut/Haihauteffekt.pdf>  
aufgerufen am 06.09.2015

- (21) [http://www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/?tx\\_nenews\\_uid=1644&cHash=5c322cc8db4bf8a91929d22479e4dd5a](http://www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/?tx_nenews_uid=1644&cHash=5c322cc8db4bf8a91929d22479e4dd5a)  
aufgerufen am 31.10.15
- (23) <http://www.stern.de/panorama/wissen/natur/sandfische-schwimmend-durch-den-wuestensand-3811008.html>  
aufgerufen am 11.10.2015
- (24) <http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/s2skink.html>  
aufgerufen am 11.10.2015
- (25) <http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/TriboDueSa.pdf>  
aufgerufen am 11.10.2015
- (26) <http://www.int.fraunhofer.de/content/dam/int/de/documents/EST/EST0114S76.pdf>  
aufgerufen am 23.10.2015
- (27) [http://www.bionikvitrine.de/mediapool/99/996537/data/PDFs/Geckoprinzip/Geckoprinzip\\_mit\\_Hyperlinks.pdf](http://www.bionikvitrine.de/mediapool/99/996537/data/PDFs/Geckoprinzip/Geckoprinzip_mit_Hyperlinks.pdf)  
aufgerufen am 23.10.2015
- (28) [http://www.hessen-nanotech.de/mm/mm001/NanoBionik\\_web.pdf](http://www.hessen-nanotech.de/mm/mm001/NanoBionik_web.pdf)  
aufgerufen am 23.10.2015
- (29) [http://www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/page/5/?tx\\_nenews\\_uid=1644&cHash=5ab365009b0e9753e4ec6d75d884b223](http://www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/page/5/?tx_nenews_uid=1644&cHash=5ab365009b0e9753e4ec6d75d884b223)  
aufgerufen am 23.10.2015
- (30) <http://www.netzathleten.de/gesundheit/ratgeber-gesundheit/item/3540-pflaster-ohne-kleber-us-forscher-experimentieren>  
aufgerufen am 25.10.15
- (31) <http://www.biokon.de/news-uebersicht/neuartiges-pflaster-ohne-klebstoff/>  
aufgerufen am 25.10.2015
- (32) <http://www.spektrum.de/news/fischparasit-inspiriert-zu-nadelpflaster/1191479>  
aufgerufen am 25.10.2015

- (33) <http://www.biokon.de/netzwerk/ueber-uns/>  
aufgerufen am 03.11.2015
- (34) <http://www.oppisworld.de/zeit/biograf/darwin.html>  
aufgerufen am 03.11.2015

## 5. Quellenverzeichnis

### 5.1 Abbildungen

- Abb. 1: [http://www.botgart.uni-bonn.de/o\\_frei/sys/effektgr.jpg](http://www.botgart.uni-bonn.de/o_frei/sys/effektgr.jpg)  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 2: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/Lotus3.jpg>  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 3: <http://www.mpg.de/653737/zoom.jpeg>  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 4:  
<http://media1.faz.net/ppmedia/aktuell/wissen/3891040232/1.2095077/width610x580/ein-springschwanz-etwa-vier.jpg>  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 5:  
<http://media1.faz.net/ppmedia/aktuell/wissen/2908526409/1.2095083/width610x580/das-replikat-der.jpg>  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 6:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b8/Salvinia\\_Zoom\\_In.jpg/320px-Salvinia\\_Zoom\\_In.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b8/Salvinia_Zoom_In.jpg/320px-Salvinia_Zoom_In.jpg)  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 7:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e9/Funktionsprinzip\\_Salvinia\\_Effekt.jpg/800px-Funktionsprinzip\\_Salvinia\\_Effekt.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e9/Funktionsprinzip_Salvinia_Effekt.jpg/800px-Funktionsprinzip_Salvinia_Effekt.jpg)  
aufgerufen am 02.11.2015

- Abb. 8:  
[http://www.ferchau.de/fileadmin/global/bilder/news/20130410\\_FERCHAUaktuell\\_01-2013\\_Intelligente-Werkstoffe\\_Bild-Schuppen.jpg](http://www.ferchau.de/fileadmin/global/bilder/news/20130410_FERCHAUaktuell_01-2013_Intelligente-Werkstoffe_Bild-Schuppen.jpg)  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 9: Von Gleich, A., Bionik - Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur? , Stuttgart, BG Teubner Verlag, 1998, S. 240  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 10: <http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/TriboDueSa.pdf>  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 11: <http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/bilder/ReibDiagramm.gif>  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 12: <http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/TriboDueSa.pdf>  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 13: <http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/TriboDueSa.pdf>  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 14: [http://www.max-wissen.de/110791/standard\\_neu.jpg](http://www.max-wissen.de/110791/standard_neu.jpg)  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 15: [http://www.max-wissen.de/110830/standard\\_neu.jpg](http://www.max-wissen.de/110830/standard_neu.jpg)  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 16:  
<http://mmbitesize-science.files.wordpress.com/2013/05/microneedle-mat.jpg?w=576&h=452>  
aufgerufen am 02.11.2015
- Abb. 17:  
[http://www.spektrum.de/fm/912/thumbnails/Nadelpflaster\\_schema.jpg.1293695.jpg](http://www.spektrum.de/fm/912/thumbnails/Nadelpflaster_schema.jpg.1293695.jpg)  
aufgerufen am 02.11.2015

„Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den .....  
Ort Datum Unterschrift der Schülerin / des Schülers