Reibung und Verschleiß am Sandfisch der Sahara

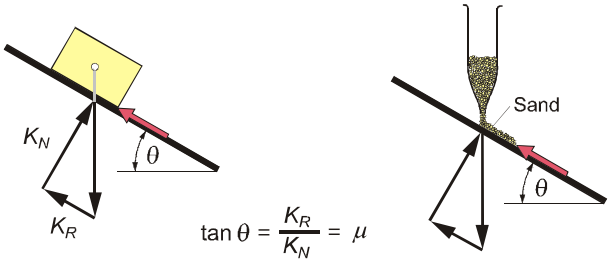
Ingo Rechenberg und Abdullah Regabi El Khyari

Bericht zum begleitenden Forschungsvorhaben im Rahmen des Festo-Stipendiums
für Herrn Abdullah Regabi El Khyari

Februar 2004

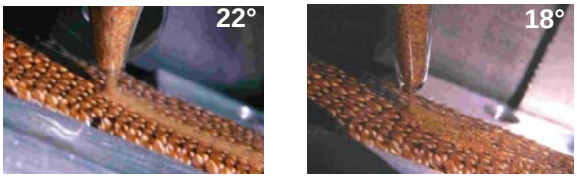
Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse

Sahara-Exkursion 2000: Es werden von den beiden Autoren in der Wüste Erg Chebbi in Südmarokko die ersten Reibungsmessungen an Sandfischen durchgeführt. Es ist die Sanduhr, die zu der Idee der dynamischen Reibungsmessung führt:



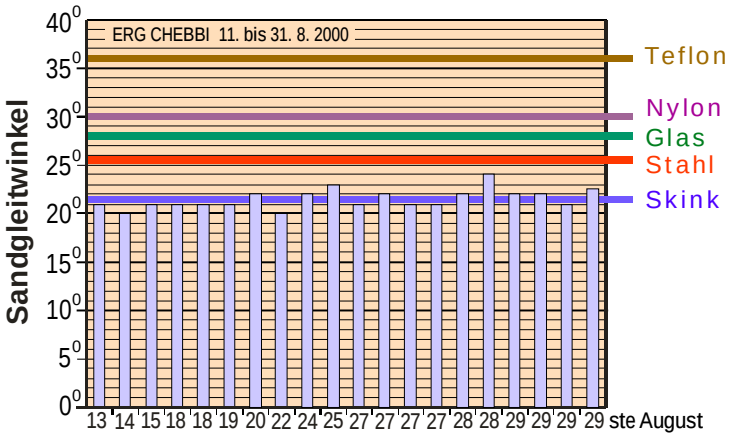
Gleitreibungsmessung für eine Partikelströmung

Aus einer Kanüle (1 mm Ø) rieselt ein feiner Sandstrahl auf die geneigte Testoberfläche. Für große Winkel θ rieselt der Sand die Testoberfläche hinab. Der Winkel θ wird langsam verkleinert bis der Sandfluss stoppt. Der Tangens des Stopp-Winkels ist der Gleitreibungskoeffizient μ. Nachfolgend das Bild eines solchen Versuchs an einem Sandfisch:



Sandstrahlgleitversuch am Sandfisch
links: Strahl gleitet rechts: Strahl stoppt

Um gleiche Bedingungen zu gewährleisten werden vor Ort nicht nur die Sandfischoberfläche, sondern auch die Vergleichsoberflächen Nylon, Teflon, Glas und Stahl vermessen.



Reibung am Sandfisch im Vergleich zu technischen Materialien

Die Pilotversuche bestätigen die Kernthese: Die Evolution hat an der Sandfischoberfläche Entwicklungsarbeit geleistet. Polierter Stahl besitzt 20% mehr Reibung als die Sandfischhaut.

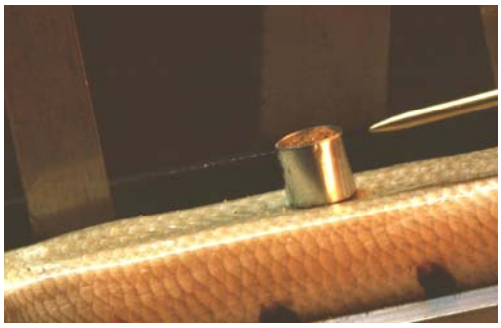
Sahara-Exkursion 2002: Die Messungen des Jahres 2000 werden sorgsam überprüft. Die Versuchstiere werden von Nomaden geliefert. Dabei bleibt es nicht aus, dass die gestressten Tiere auch kleine Hautverletzungen aufweisen. So überrascht es nicht, dass an einem selbst gefangenen Sandfisch, der sofort untersucht wird, ein Rekord-Sandgleitwinkel von nur 19° gemessen wird. Das heißt, dass polierter Stahl 34% mehr Reibung besitzt als eine Sandfischhaut.

Wegen der Sandstürme ist der Erkenntnisgewinn auf der 2002er Exkursion beschränkt. Der ständige Sandsturm macht aber auf ein unerwartetes Phänomen aufmerksam. Ein unachtsam beiseite geschaffter toter Sandfisch wird nach einem Sandsturm wieder gefunden. Sein Schuppenkleid glänzt wie zuvor. Weshalb – das hätte man sich längst fragen sollen – sind Sandfische immer blank?

Die Ergebnisse der Sahara-Versuche 2003

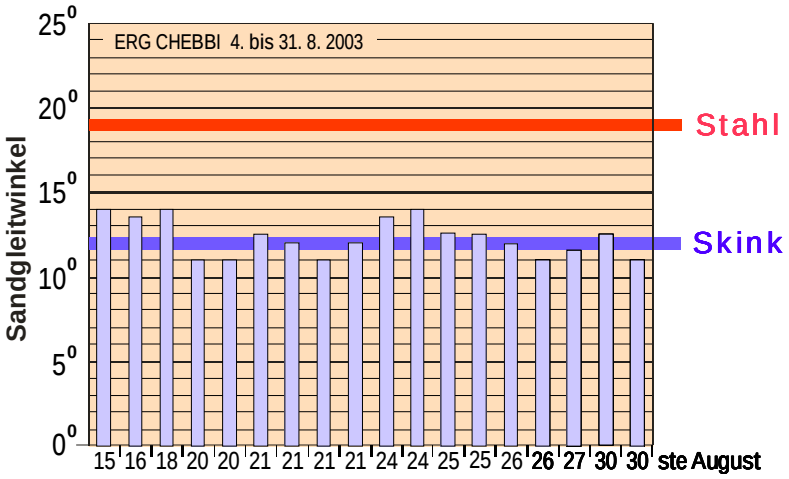
Reibungsmessungen: In der tribologischen Literatur wird häufig darauf hingewiesen, wie schwierig es ist, Reibungskoeffizienten mit vernünftiger Genauigkeit zu tabellieren. So gibt es den berüchtigten BEILBY-Effekt: Durch kurzzeitiges Polieren einer Reiboberfläche kann ein Zustand mit stark verminderter Reibung erzeugt werden. Diese BEILBY-Schicht verschwindet schnell im Betriebszustand, wenn z. B. der Sandstrom den polierten Stahl abwärts gleitet.

Auch den Sandfischmessungen der Jahre 2000 und 2002 wurde nicht vollständig vertraut. Messungen nach ständig derselben Methode hätten das Vertrauen kaum erhöht. Hinzu kommt, dass die dynamischen Reibungswerte nur für einen Partikelstrahl gelten. Feines Messinggranulat (Messingsand) wird als Strahl auf einer Stahlplatte einen anderen Gleitwinkel aufweisen als ein kleiner Messingblock. Um die Messwerte wirklich überzeugend zu verifizieren wäre eine Messmethode notwendig, bei der ein „Sandblock“ auf einer geneigten Testoberfläche abwärts gleitet. Diese Methode ist machbar. Ein Aluminiumzylinder (5 mm Durchmesser, 5 mm hoch) wird gestrichen voll mit Sand gefüllt.



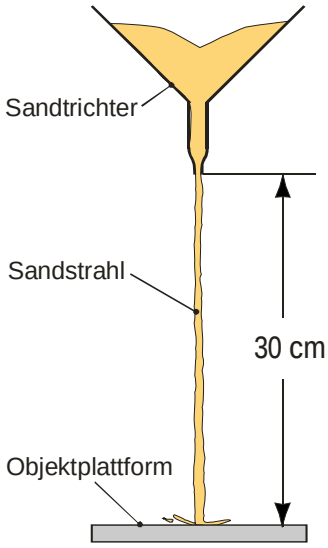
Anstoßen eines mit Sand gefüllten Gleitzylinders auf dem Sandfischrücken

Es wird durch Anstoßen des Sandzylinders mit einer Nadel nach dem Neigungswinkel gesucht, bei dem dieser die Testfläche abwärts gleitet. Die Reibkraft ist bei coulombscher Reibung proportional zur Normalkraft. Ist also das Sandgewicht deutlich größer als das Gewicht der zylindrischen Aluminiumhülle, lässt sich die Reibung der Umrandung vernachlässigen. Wir arbeiten mit Aluminiumhüllen von 0,1 mm Wandstärke. – Die vor Ort durchgeführten Sandzylindermessungen ergeben erwartungsgemäß andere Reibungswinkel als die Sandstrahlmessungen.



Alternative Reibungsmessung mit einem sandgefüllten Gleitzylinder

Bei den einzelnen Säulen handelt es sich um je eine Rücken- und eine Bauchmessung an jeweils verschiedenen Versuchstieren. Der Vergleich mit einem Sandzylinder, der auf einer Stahlplatte gleitet, zeigt: Polierter Stahl besitzt einen um 58% höheren Sandgleitwinkel als die Sandfischoberfläche. Die Kernthese kann somit als endgültig bestätigt angesehen werden: Die Evolution hat den Reibungswiderstand an der Sandfischoberfläche minimiert.

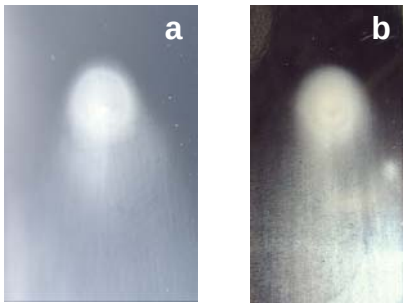


Verschleißmessungen: Reibung und Verschleiß sind Begriffe, die in der Tribologie gewöhnlich zusammen abgehandelt werden. Reibungsarme Oberflächen sind meistens auch verschleißfest. Das Phänomen, dass nach einem nächtlichen Sandsturm 2002 die Sandfischhaut glänzte wie zuvor, sollte in der 2003er Exkursion genauer untersucht werden. Auf einen Sandsturm zu warten ist unbefriedigend. Deshalb wurde im Berliner Bionik-Labor eine Sandfließapparatur konstruiert, die für 6 Stunden einen kontinuierlichen Sand-Fließstrahl aufrechterhält. Die Apparatur besteht aus einem großen Trichter, der mit Wüstensand gefüllt wird. Eine auswechselbare Sanddüse erzeugt einen Fließstrahl des gewünschten Durchmessers. Unter dem Trichter kann in einstellbarer Höhe die Materialprobe positioniert werden.

Die simple Apparatur hat sich außerordentlich bewährt. Bei den vor Ort durchgeführten Abriebversuchen wurde mit einem 30 cm langen Sandstrahl gearbeitet, der 10 Stunden auf die Versuchsprobe aufprallte. Der Sandfischrücken zeigt nach dieser extremen Beanspruchung nicht die geringste Abriebspur. Die optische Begutachtung an Stelle eines objektiven Messwerts missfällt. Es bleibt offen, wie der Abrieb im Feldversuch ohne komplizierte Radionukleotid-Markierung bewerkstelligt werden könnte.

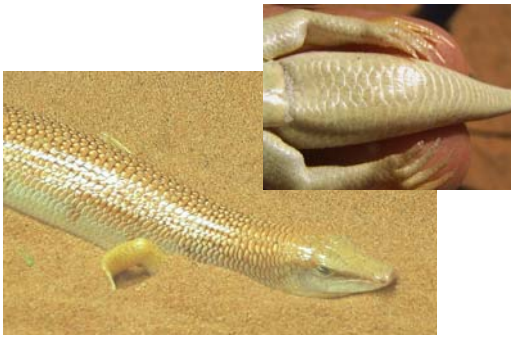
Abriebversuch am Sandfischrücken –
Die Nadelspitze weist auf den Aufprallpunkt

Ganz im Gegensatz dazu ist bei einer Stahloberfläche und einer Glasoberfläche unter gleichen Versuchsbedingungen (10 Stunden, 30 cm Sandstrahllänge) ein deutlicher Abriebfleck zu erkennen.



Abriebflecke auf technischer Oberfläche –
a) Stahlplatte b) Glasplatte

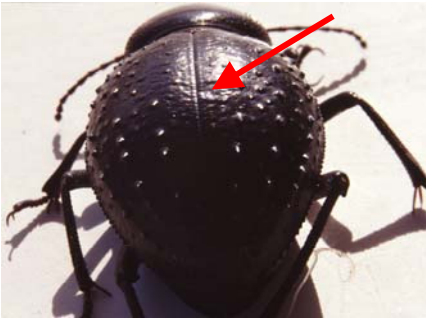
Der Versuch erklärt auch, weshalb ein Sandfisch immer glatt und glänzend aussieht, obgleich er nach unseren Beobachtungen täglich – auf der Suche nach Nahrung – eine Strecke von 500 bis 1000 Meter zurücklegt. So zeigt auch die Schwanzunterseite, die stets im Wüstensand schleift und so die typische Sandfischspur erzeugt, keinerlei Abriebspuren.



Sandfisch in seiner Umwelt –
Die Schwanzunterseite zeigt keinen Abrieb

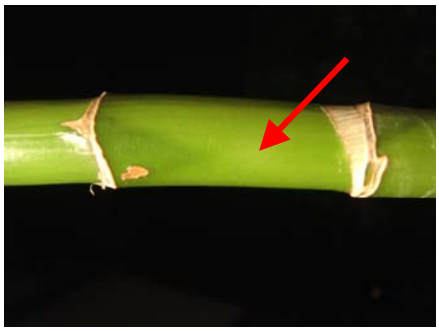
Abriebversuche am Wüstenkäfer und am Glücksbambus

Die einfache Abrieb-Versuchsapparatur ermuntert, weitere Versuche an abriebfesten biologischen Objekten durchzuführen. Dabei sind wir in zwei Fällen fündig geworden. Ein Wüsten-Schwarzkäfer wurde dem „Norm-Abriebtest“ (10 h Dauer, 30 cm Strahlhöhe) unterworfen. Auch hier sind keine Abriebspuren zu sehen. Das verwundert nicht; denn der Wüstenkäfer ist ähnlichen Abriebbelastungen unterworfen wie der Sandfisch.



Schwarzkäfer im Sandstrahl-Abriebtest
Der Pfeil weist auf den Strahlauftreffpunkt

Eine Zufallsentdeckung ist die Abriebfestigkeit einer bambusähnlichen Palme Dracaena Sanderiana. Auch hier hinterlässt ein 10-stündiges Sandstrahlbombardement keine sichtbaren Spuren.



Glücksbambus im Sandstrahl-Abriebtest
Der Pfeil weist auf den Strahlauftreffpunkt

Der Versuch am Glücksbambus weist in eine Erklärungsrichtung: Aus der Literatur folgt, dass im Bambus bis zu 4% Siliziumkristalle eingelagert sind. Und auch bei Eidechsenschuppen haben wir eine Literaturstelle gefunden, die von im Keratin eingelagerten Siliziumkristallen spricht. Die Entdeckung des Bionikers kommt etwas spät: Vor Jahren wäre die Wirkungsweise der Sandfischhaut völlig rätselhaft geblieben. Heute ist von Materialwissenschaftlern und Ingenieuren der Weg zum Verständnis neuartiger harter Oberflächen aufbereitet worden. Die Schlagworte sind Biomineralisation, Nanosand und Nanokomposite. Es geht also nicht mehr darum, ob die Biologie sich der Nanokomposit-Technik bedient, sondern wie die Evolution das Nanokompositmaterial geometrisch optimal strukturiert hat.

Theorie zur Wirkungsweise der Sandfischhaut

Ist eine biologische Leistung erkannt geworden, die den Ingenieur beeindruckt, beginnt eine Denk- und Experimentierphase, von der bisher wenig Aufhebens gemacht wird. Laien denken, dass nun das Nachmachen eine einfache Sache sei. Doch ohne profundes Hintergrundwissen über Reibung und Verschleiß erginge es dem Ingenieur so wie Signore LEONARDO DA VINCI, dem ein PC auf den Arbeitstisch gestellt wird. Nicht das Besehen des Ergebnisses, sondern das Verstehen des Phänomens führt zum Erfolg. Der momentane Erkenntnisstand des Vorgangs „Reibung und Verschleiß der Sandfischhaut" könnte zum Paradebeispiel werden, um den Prozess des Transfers einer Lösung der Evolution in die Technik in situ zu studieren.

Grundlegende Mechanismen der Festkörperreibung: Der Reibung werden seit LEONARDO DA VINCI scharfsinnige Überlegungen gewidmet. Im CZICHOS/HABIGs Triboligie-Handbuch (2003) werden vier Mechanismen der Festkörperreibung aufgelistet:

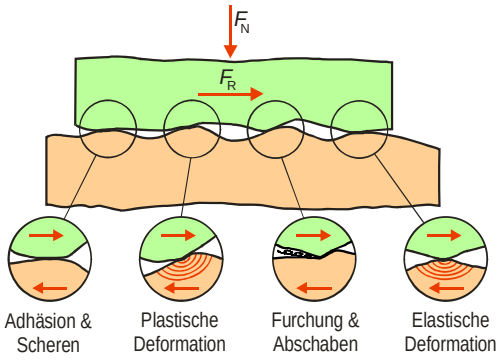


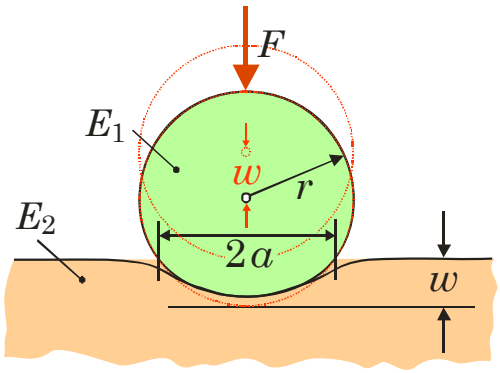
Illustration der grundlegenden Mechanismen der Festkörperreibung

Adhäsion und Scheren heißt, dass Elemente des Grund- und Gegenkörpers eine gemeinsame Kontaktfläche bilden, auf der intermolekulare Anziehungs- und Scherkräfte zur Materialabtragung führen.
Plastische Deformation des Grund- und Gegenkörpers ist ein Energie verzehrender Vorgang, der sich als Reibkraft äußert, der aber allein nicht dauerhaft wirken kann (z. B. Laufzeit eines Motors).
Furchung und Abschaben tritt auf, wenn Grundkörper und Gegenkörper ineinander eindringen und es so zu einer Energie verzehrenden Materialabtragung kommt (Reibung durch Verschleiß).
Elastische Deformation beim Überfahren der Rauhigkeitshügel mit atomarem Zurückschnellen führt zu Gitterschwingungen. Die Schwingungsenergie dissipiert quantenphysikalisch interpretiert in der Form von Phononen (Quasiteilchen der Kristall-Festkörperphysik).

Reibung ohne Verschleiß bedeutet, Energiedissipation nur durch Phononenabstrahlung zu bewirken. Es gilt deshalb, sich über die Nanostruktur der Sandfischhaut Gedanken zu machen.

Modell einer nanostrukturierten Oberfläche

Ein theoretisches Experiment: Eine harte Kugel (E-Modul E_1) drücke mit der Normalkraft F gegen eine weichere ebene Platte (E-Modul E_2). Es bildet sich eine Eindruckdelle der Tiefe w mit dem Durchmesser $2a$. Die Kugel sei Teil des Grundkörpers, d. h. mit seiner Oberfläche kraftschlüssig verbunden. Was geschieht, wenn die Oberflächenkugel bzw. mehrere von ihnen auf Nanogröße verkleinert werden?



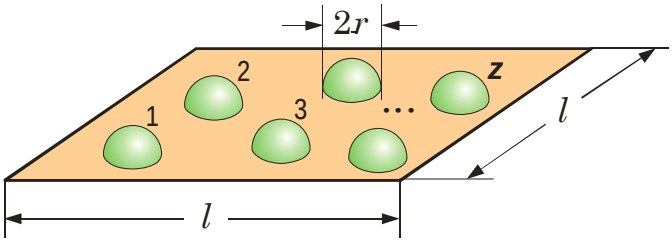
Zur Härteformel von Hertz – Kontakt Kugel auf Ebene

Die Theorie der Härte von HEINRICH HERTZ liefert für die Eindrucktiefe w einer gedrückten Kugel:

$$w = \left(\frac{9 F^2}{4 r \overline{E}^2} \right)^{1/3} \quad \text{mit} \quad \overline{E} = 2 E_1 E_2 / \left[(1-\nu_1^2) E_2 + (1-\nu_2^2) E_1 \right]$$

(ν_1, ν_2 = POISSON-Zahlen der beteiligten Werkstoffe). Die Eindruckdelle besitzt den Radius:

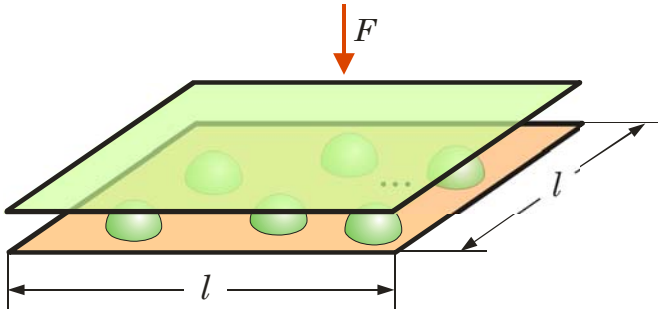
$$a = \left(\frac{3 F r}{2 \overline{E}} \right)^{1/3}$$



Definition der Kugel-Bettungsdichte

In die Grundfläche eines Reibkörpers der Größe $l \times l$ werden z harte Kügelchen mit dem Radius $r_{\text{Kügelchen}}$ eingelassen. Die Bettungsdichte der Kügelchen sei durch das Flächenverhältnis c definiert:

$$c = \frac{z \pi r_{\text{Kügelchen}}^2}{l^2}$$



Belastung des Grundkörpers mit eingebetteten Kügelchen durch eine ebene Gegenplatte

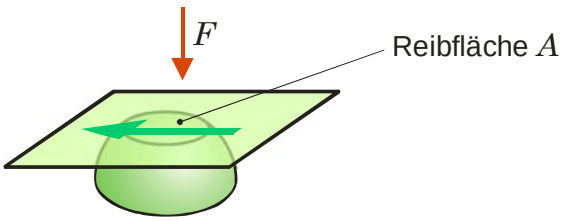
Eine zweite harte Platte (grün) als Gegenkörper der Reibung drückt gleichzeitig von oben auf die eingebetteten Kugeln. Die Anwendung der HERTZschen Formel liefert für die Kugelschar die Eindrucktiefe in den weichen Grundkörper:

$$w_{\text{Grundkörper}} = \left[\frac{3\pi(F/l^2)}{2\overline{E}}\right]^{2/3} \cdot \frac{r_{\text{Kügelchen}}}{c^{2/3}}$$

Wir deuten den reziproken Wert der Eindrückung $w_{\text{Grundkörper}}$ als Härte des mit Kügelchen belegten Grundkörpers:

$$\text{Härte} \propto \frac{c^{2/3}}{r_{\text{Kügelchen}}}$$

Die Härte einer weicheren Grundfläche (z. B. Polymerkörper) wächst somit umgekehrt proportional mit dem Durchmesser der eingebetteten Kügelchen und etwas schwächer als proportional mit der Belegungsdichte der Kügelchen.



Entstehung der Reibfläche *A* an den eingebetteten Kügelchen

Der reibende harte Gegenkörper in Form einer exakt ebenen Platte erzeugt seinerseits eine Eindrückung der oberen Kugelkalotten. Die entstehende spezifische Reibfläche ergibt sich zu:

$$\frac{A_{\text{gesamt}}}{l^2} = \left[\frac{3\pi(F/l^2)}{2E}\right]^{2/3} \cdot c^{1/3}$$

Die beiden Endformeln

$$\text{Oberflächenhärte} \propto \frac{c^{2/3}}{r_{\text{Kügelchen}}} \quad \text{und} \quad \text{Spez. Reibfläche} \propto c^{1/3}$$

(der Proportionalitätsfaktor ist beide Male derselbe!) zeigen, dass eine hohe Kugelbelegungszahl c gar nicht so günstig ist. Sie erhöht

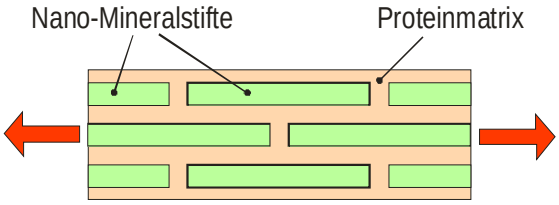
zwar die Härte der fiktiven Polymer-Oberfläche, vergrößert aber zugleich die spezifische Reibfläche. Es ist günstiger, geringe Reibung durch Verkleinerung der Reibfläche über eine Verringerung von $r_{\text{Kügelchen}}$ zu erreichen. Das geht solange, bis der Nanobereich und damit die Grenze der Konsistenz eines Kügelchens erreicht ist.

Der Weg der Nanosierung ist noch aus einem anderen Grund von Vorteil. Harte Materialien sind im Makromaßstab meist spröde: Sie sind mit Mikrorissen durchsetzt. So besitzt Glas nur 1/300 der theoretischen Festigkeit. Im Nanomaßstab spielen atomare Risse dagegen keine Rolle mehr: Sie verschwinden in dem – im Verhältnis zur Oberfläche – geringen Volumen der Nanopartikel.

Es sei eingestanden, dass die vorgestellte Theorie der nanostrukturierten Oberfläche durchaus anfechtbar ist ist. Die Anwendung der HERTZschen Theorie erfordert, dass die Nanokugeln im Grundkörper nicht wirklich eingebettet sind, sondern lediglich auf der Oberfläche kraftschlüssig aufliegen. Ferner bleibt in der Theorie unberücksichtigt, dass Körper und Gegenkörper keine plane, sondern eine unregelmäßige Oberfläche (Rauhigkeitshügel) aufweisen. So kann lediglich erwartet werden, dass die Formeln eine Tendenz richtig wiedergeben.

Nanostrukturierte Oberfläche maximalen Härte

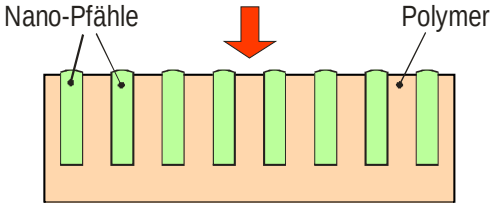
Modellvorstellung für ein Nanokomposit. Das Stuttgarter MAX-PLANCK-Institut für Materialforschung und das Österreichische ERICH-SCHMID-Institut für Materialwissenschaften haben das Modell eines Bio-Nanokomposits maximaler Zugfestigkeit entwickelt.



Hypothetische Struktur eines Nano-Biokomposits

Die Idee ist: Die Nano-Mineralstifte übertragen mit maximaler Festigkeit die Zugspannungen. Maximale Festigkeit der Nano-Mineralstifte resultiert aus der Tatsache, dass die dicht an der atomaren Auflösung liegenden Fasern quasi nur noch aus Oberfläche bestehen. Atomare Risse (Kristallfehlstellen) verschwinden: Die Nanostifte besitzen die Festigkeit von Einkristallen. Die Kräfteübertragung von Nanostift zu Nanostift erfolgt durch Schubspannungen, die über die riesigen Stiftoberflächen übertragen werden.

Für eine maximal druckfeste (harte) Oberfläche wäre demnach das Prinzip wie folgt umzufunktionieren:



Hypothetische Struktur einer maximal harten Nano-Komposit Oberfläche

Die harten Mineralstifte sind jetzt wie Pfähle in eine Polymermatrix eingelassen. Ihre Nachgiebigkeit normal zur Oberfläche wird wieder durch Schubspannungen, die über die im Verhältnis zum Pfahlvolumen riesigen Pfahloberflächen übertragen werden, minimiert. Haben die Stützpfähle Nano-Abmessungen, kommt zusätzlich die Eigenschaft des Verschwindens von rissähnlichen Effekten zum Tragen. Verschleiß und Reibung der hypothetische Nano-Pfahl-Struktur sollten minimal werden.

Es bleibt abzuwarten, ob die Sandfischhaut nach diesem Prinzip funktioniert.