

# Tribologie im Dünensand

Sandfisch, Sandboa und Sandschleiche als Vorbild  
für die Reibungs- und Verschleißminderung

## Schlussbericht

BMBF-Förderkennzeichen

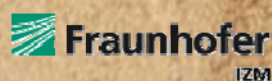
0311967A

Laufzeit: 01.02.06 - 31.03.09



Ingo Rechenberg  
Bionik und Evolutionstechnik  
Technische Universität Berlin

Unter Mitarbeit von:  
Michael Zwanzig FhG-IZM  
Simon Zimmermann TUB  
Abdellah Regabi El Khyari TUB



## Kurzfassung

*Scincus albifasciatus*, ein Sandfisch der Sahara, besticht durch sein äußerst glatt und glänzend erscheinendes Schuppenkleid. Das Erscheinungsbild dieses Untersandschwimmers spiegelt die Tatsache wider, dass Reibung und Abrieb an den blanken Schuppen evolutiv minimiert wurden. Unter dem Elektronenmikroskop lässt sich ein Muster von Schwellen erkennen, die quer zur Strömung des Sandes verlaufen. Experimente zeigen: Die Mikroschwellen dienen als Abstreifkämme für den Wüstenstaub, der die Sandkörner überzieht. Die von schmirgelnden Staubpartikeln befreiten Sandkornflächen gleiten so mit kleiner Reibung und fast ohne Abrieb über die Schwellenstruktur.

Vom Fraunhofer IZM Berlin wurde in eine PVC-Testfläche eine 1cm<sup>2</sup> große dem Sandfisch ähnliche Struktur eingeformt. Rieselst Sand über die Fläche markiert sich der Schwellenbereich deutlich durch die höhere Sandleitgeschwindigkeit. Da das PVC-Material zu weich ist, besitzt die synthetische Schuppe allerdings noch nicht die Standfestigkeit des Originals.

## Inhalt

• Einleitung: der Sandfisch der Sahara .....	3
• Das Granulat-Neigungs-Tribometer .....	4
• Reibungsmessungen in der Wüste (Phase1) .....	5
• Reibungsmessungen in der Wüste (Phase 2) .....	5
• Reibungsmessungen in der Wüste (Phase 3) .....	6
• Abriebversuche in der Wüste .....	8
• Sandfischschuppe unter dem Elektronenmikroskop .....	9
• Parallelevolution von Sandfisch, Sandboa und Sandschleiche .....	10
• Mikroschwellen zur Reibungsminderung .....	11
• Elektrische Eigenschaften der Sandfischschuppe .....	14
• Standfestigkeit der Sandfischschuppe .....	15
• Technischer Sandfischeffekt .....	17
• Halbsynthetische Sandfischhaut .....	18
• Vollsynthetische Oberfläche mit Sandfischeffekt .....	19
• Gleiten auf der planen Fläche, auf Kuppen und auf Schwellen .....	21
• Verwertungsplan des Sandfischeffekts .....	23
• Zukunft des Sandfischeffekts .....	24
• Literatur .....	24

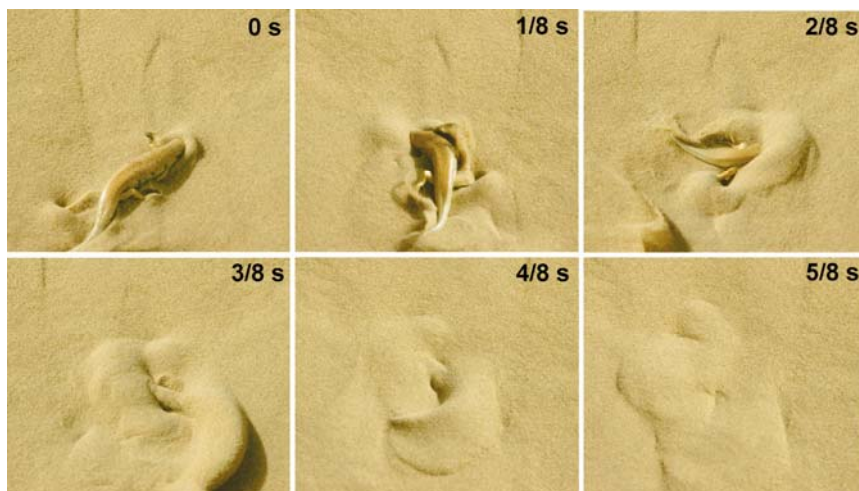


## Einleitung: der Sandfisch der Sahara

Ein spannender Versuchstag in der marokkanischen Wüste Erg Chebbi, der 12. August 2000: Ein soeben gefangener Sandfisch (*Scincus albifasciatus*) wird von einem Experimentator mit einer von einem Winkelmesser angezeigten Neigung (Kopf schräg nach oben) gehalten. Ein zweiter Experimentator hält abwechselnd eine glatte Teflon- bzw. Nylonfläche gleich schräg daneben. Aus einer Glaskanüle fließt ein dünner Sandstrahl mal auf den Sandfischrücken, mal auf das Kunststoffmaterial. Das Ergebnis: Der Sandfischrücken erweist sich als deutlich reibungsärmer. Das Herabgleiten des Sandstrahls stoppt auf Teflon bei  $\approx 32^\circ$ , auf Nylon bei  $\approx 28^\circ$  und auf dem Sandfischrücken bei  $\approx 24^\circ$ .

Der Sahara-Sandfisch besticht durch seinen künstlich erscheinenden Glanz, der eine besondere Glattheit suggeriert. Die Einheimischen nennen ihn der Schlüpfrige (مليسة). Und der Wüstenforscher Uwe George schreibt: „Aufgrund dieser extrem glatten Schuppen fühlt sich der Sandfisch wie lackiert an und lässt sich schwer festhalten“.

Die ersten Experimente des Autors mit Sandfischen galten der spektakulären schlängelnden Untersand-Fortbewegung. So wurde auf der Wüstenexkursion 1997 das blitzartige Eintauchen des Sandfischs in das Dünenmeer fotografisch dokumentiert (*Bild 1*).



*Bild 1.*

*Ein Sandfisch der Sahara taucht ab.*

In den folgenden Jahren 1998 und 1999 stand die Frage im Mittelpunkt, wie weit ein Sandfisch schlängelnd unter dem Dünenand schwimmen kann. Ein 2 Meter langes Aluflexrohr von 127 mm Ø - oben siebartig durchlöchert, damit es sich mit Sand füllt - diente als „Untersand-Rennstrecke“ (*Bild 2*). Die Strecke wurde von den Sandfischen problemlos durchschwommen, sodass darüber nachgedacht wurde, nach dem Vorbild des Sandfischs



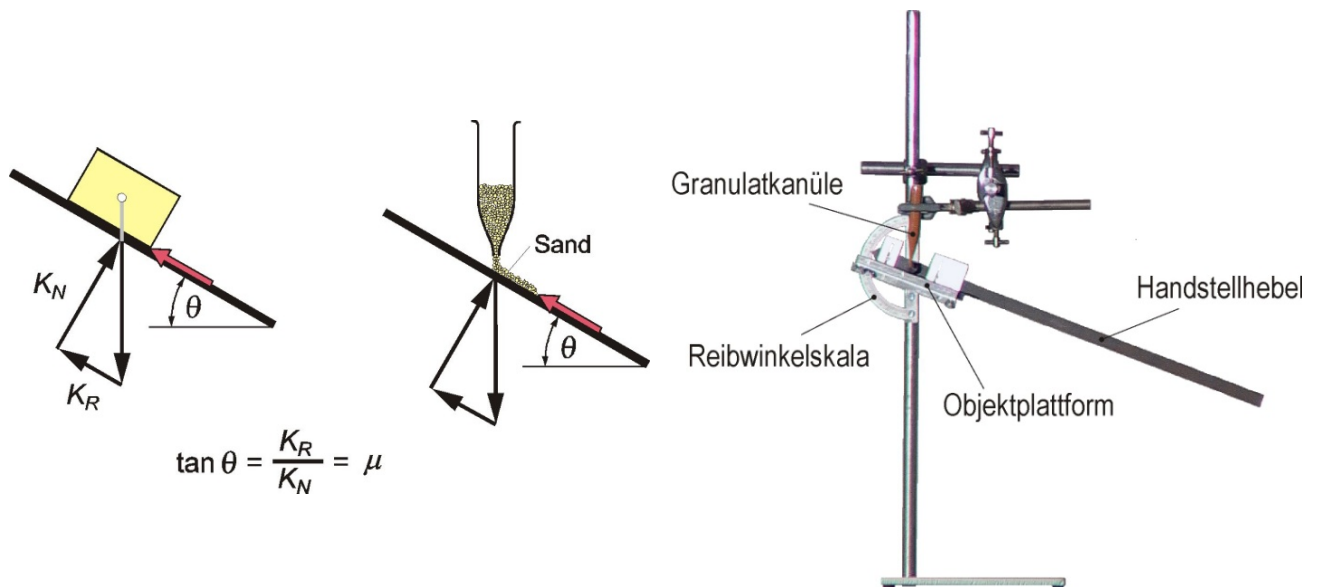
*Bild 2:*

*Die Untersand-Teststrecke.*

einen Roboter zu konzipieren, der durch granuläre Schüttungen „schwimmen“ kann. Die Evolution hat diese Untersand-Schwimmleistung entwickelt, und dazu gehört gewiss auch die Minimierung der Sandreibung. Reibungsmessungen am Sandfisch waren so das nächste Ziel. Es fehlte nur noch die zündende Idee, im Sahara-Feldversuch die Reibung an den Sandfischschuppen zu messen. Unrealistisch war, ein Hightech-Gerät (z. B. ein Atomic-Scale-Tribometer) vor Ort einzusetzen zu wollen.

## Das Granulat-Neigungs-Tribometer

Eigentlich ganz einfach, die Konstruktion eines robusten Sandkorn-Tribometers: Statt eines Versuchsstücks in Form eines Reibquaders auf einer schiefen Ebene (die bekannte Abbildung aus dem Schulphysikbuch) gleitet ein dünner Sandstrahl die geneigte Ebene, z. B. den Sandfischrücken, abwärts (*Bild 3*). Ist der Neigungswinkel groß, wird der umgelenkte Sand weiterrutschen. Mit dem Handstellhebel wird nun, während der Sand herab rieselt, die Neigung der Objektplattform langsam verringert. Stoppt das Rutschen, ist der Gleitreibungswinkel erreicht, und der Tangens des Winkels ist der gesuchte dynamische Reibungskoeffizient. Der Abstand zwischen der Kanülenaustrittsöffnung und der Versuchsfläche liegt bei allen Versuchen zwischen 1,5 und 2 mm. Auf der Objektplattform kann ein getöteter Sandfisch, ein poliertes Stahlstück oder ein eben geschliffenes Teflon- bzw. Nylonstück eingespannt werden.

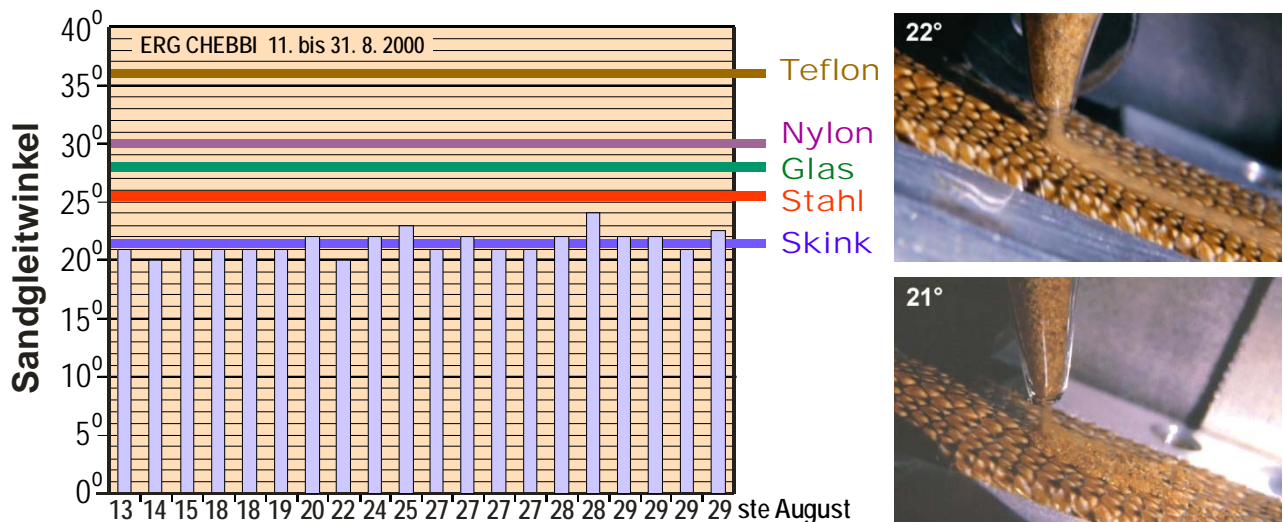


*Bild 3. Messprinzip und Granulat-Tribometer nach dem Vorbild der Sanduhr.*

Es erleichtert die Versuchsdurchführung erheblich, wenn der Sandstrom aus der Granulatkanüle an- und abgeschaltet werden kann. Dazu verhalf ein kleiner Trick: Die Öffnung der Kanüle wird so klein gemacht, dass größere Sandkörner ab und zu an der Ausflussöffnung stecken bleiben. Ein leichtes Klopfen gegen die Kanüle löst diesen Selbstverschluss. Damit kann erreicht werden, dass der Sandstrahl sich nach einiger Zeit von selbst abschaltet und durch einen leichten Schraubenzieherschlag gegen die Kanüle aber jederzeit wieder in Gang gesetzt werden kann. Zwei weitere unscheinbare Experimentier-Utensilien: ein kleiner Malpinsel und eine Wasserwaage. Mit dem Malpinsel wird nach jedem Strahlversuch die Oberfläche von verbleibenden Sandkörnern gereinigt und mit der Wasserwaage der Nullwinkel an der Reibwinkelskala überprüft.

## Reibungsmessungen in der Wüste (Phase 1)

Nach dem Erfolg versprechenden Erkundungsexperiment (siehe Einleitung) wurden im Feldversuch Tag für Tag Sandfische unter dem Granulat-Tribometer vermessen. Die Sandfische wurden hauptsächlich von den ansässigen Nomaden gefangen, die mit 2 Euro pro Exemplar entlohnt wurden. Die Vergleichsmaterialien (Teflon, Nylon, Glas und Stahl) wurden unter gleichen Bedingungen ebenfalls vor Ort getestet (*Bild 4*).



*Bild 4 links. Reibung Sandfisch versus technische Oberflächen.*

*Bild 4 rechts. Gleit- und Stoppwinkel am Sandfischrücken.*

Es sei nicht verschwiegen, dass es bei den Sandfischmessungen auch extreme Ausreißer nach oben gab, die in dem Diagramm nicht aufgenommen wurden, da die Ursache begründet werden konnte. So gab es das Ärgernis, dass die Sandfische kleine Hautverletzungen aufwiesen, wenn sie von den Nomaden gebracht wurden. Ferner waren Messungen kurz nach einem Sandsturm offensichtlich wegen der starken atmosphärischen Elektrizität unbrauchbar, und das, obgleich der Laborwagen, in dem die Versuche stattfanden, als Faradayschen Käfig anzusehen ist. Problematisch verhält sich zuweilen auch Stahl bei der Reibungsmessung. In der tribologischen Literatur wird häufig darauf hingewiesen, wie schwierig es bei manchen Materialien ist, Reibungskoeffizienten mit vernünftiger Genauigkeit zu tabellieren. So gibt es den berühmten BEILBY-Effekt: Durch kurzzeitiges Polieren einer Reiboberfläche kann ein Zustand mit stark verminderter Reibung erzeugt werden. Ein ähnlicher Effekt trat auch bei der Stahlprobe auf, wenn man diese besonders ausgiebig polierte. Dann konnte es geschehen, dass der Sandgleitwinkel wie beim Sandfisch 21° erreichte. Der Effekt verschwindet nach einigen Versuchen oder wenn man die Probe einige Stunden ruhen lässt.

## Reibungsmessungen in der Wüste (Phase 2)

Der Sandfischeffekt hat bei den Bionikern einiges Aufsehen erregt. Deshalb stand bei der 2002 durchgeführten Exkursion in die Wüste Erg Chebbi die Verifikation der ersten Experimente im Vordergrund. Doch die ersten Messungen enttäuschten. Wahrscheinlich durch den ständig herrschenden Wüstensturm bedingt schwankten die Messwerte beträchtlich. Schließlich konnten in den Phasen ruhigen Wetters die Werte der 2000er-Exkursion bestätigt werden. Es ergab sich als Mittelwert für den kritischen Sandgleitwinkel: Sandfisch 21°, eloxiertes Aluminium 25°, Stahl 26° (2000er-Wert 25,5°), Glas 29°, Nylon 30° und

Teflon  $36^\circ$  (Bild 5). Gar nicht so überraschend war, dass ein selbst gefangener Sandfisch, der sofort durch eine Überdosis Chloroform eingeschláfert wurde, den Rekord-Sandgleitwinkel von  $19^\circ$  erreichte. Das heißt, dass polierter Stahl im Mittel 34% mehr Reibung besitzt als diese Sandfischhaut. Die unverzügliche Messung des Reibungswinkels an dem selbst gefangenen Sandfisch bestätigt eine Beobachtung, die an Sandfischen im Berliner Institut gemacht wurde: Länger anhaltender Stress führt zu einer Hochspreizung der Schuppen verbunden mit einer leichten Flüssigkeitsabsonderung. Dies wurde bei der Sofortmessung vermieden.

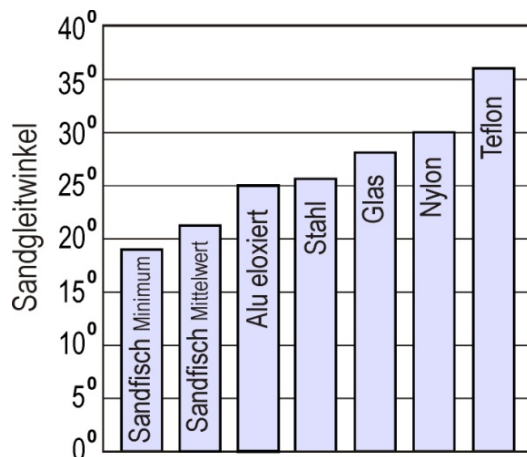


Bild 5.

Verifikation der Reibungsmessungen der Phase 1.

Die Aufnahme von eloxiertem Aluminium in die Liste der Testmaterialien zeigt, dass eine hohe Härte der Oberfläche keinesfalls die Sandstromreibung vermindert, denn die Eloxalschicht von Aluminium besitzt eine mindestens doppelt so hohe Vickershärte als das getestete Federstahlblech.

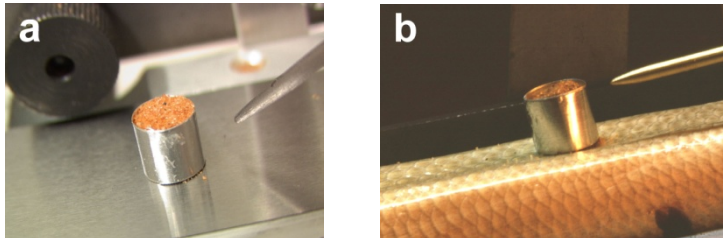
Wegen der vielen Sandstürme ist der Erkenntnisgewinn während der 2. Phase der Reibungsmessungen nicht allzu hoch. Der ständige Sandsturm macht aber auf ein unerwartetes Phänomen aufmerksam. Ein unachtsam beiseitegeschaffter toter Sandskink wird nach einem Sandsturm wieder frei geweht. Sein Schuppenkleid glänzt wie zuvor. Weshalb, so hätte man längst fragen sollen, sind Sandfische so auffallend blank? Eine Bier-Dose, eine Cola-Glasflasche, eine Mineralwasser-Plastikflasche sind bereits nach einer Woche im Wüstensand völlig matt geschliffen.

### Reibungsmessungen in der Wüste (Phase 3)

Die exakte Bestimmung von Reibungskoeffizienten ist erfahrungsgemäß diffizil. Es vor Ort im Feldlabor eines VW-Syncro-Transporters zu machen erst recht. Deshalb wurde auch den Reibungsmessungen der 2. Phase nicht blindlings vertraut. Doch Messungen nach ständig derselben Methode hätten das Vertrauen nicht gestärkt. Es musste eine alternative Idee der Reibungsmessung entwickelt werden, die so einfach und robust ist wie die Sandstrahlmethode. Kritisch muss auch gesehen werden, dass die ermittelten dynamischen Reibungswerte nur für einen dünnen Partikelstrahl gelten. Die Sandkörner gleiten und SPRINGEN die Testoberfläche abwärts. Dies könnte für einen in den Dünensand eintauchenden Sandfisch noch stimmen. Um die Reibung im Untersand-Schwimmen des Sandfischs richtig zu messen, würde man am liebsten einen Sandfisch unter dem Sand entlang ziehen. Deshalb wurde eine neue Messmethode erdacht, bei der nicht mehr ein Sandstrahl, sondern ein „Sandblock“ auf einer geneigten Testoberfläche abwärts gleitet. Dies ist machbar, indem ein aus einer dünnen Alufolie gerollter Aluminiumzylinder (5 mm Durch-



messer, 5 mm hoch) gestrichen voll mit Sand gefüllt wird. Es wird durch Anstoßen des Sandzylinders mit einer Nadel nach dem Neigungswinkel gesucht, bei dem der „Sandblock“ die Testfläche gerade abwärts gleitet (*Bild 6*). Die Reibkraft ist bei coulombscher Reibung proportional zur Normalkraft. Ist das Sandgewicht deutlich größer als das Gewicht der zylindrischen Aluminiumhülle, so lässt sich die Reibung der Umrandung vernachlässigen. Ein Vorteil: Für die Messungen mit dem Sandzylinder konnte die simple Konstruktion des Neigungstribometers weiter verwendet werden.

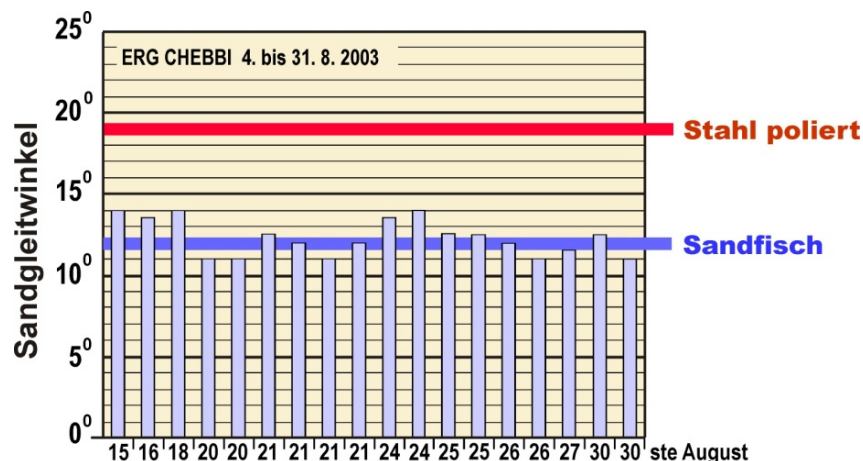


*Bild 6.*

*Anstoßen des Sandzylinders:*

- a) auf Stahloberfläche,*
- b) auf Sandfischbauch.*

Nicht unerwartet ergeben die Sandblockmessungen andere Reibungswinkel als die Sandstrahlmessungen. Bei den einzelnen Säulen in dem *Bild 7* handelt es sich um je eine Rücken- und eine Bauchmessung an jeweils verschiedenen Versuchstieren. Der Vergleichsversuch mit dem Sand gefüllten Zylinder, der auf einer Stahlplatte gleitet, zeigt: Polierter Stahl besitzt einen um 58% höheren Sandgleitwinkel als die Sandfischoberfläche. Die Erwartung kann somit als endgültig bestätigt angesehen werden: Die Evolution hat am Sandfisch einen Trick erfunden, um den Reibungswiderstand beim Eintauchen und Schwimmen unter dem Dünensand herabzusetzen. Die Aussage wird dadurch noch gestärkt, weil Schuppen die Funktion „hart aber dennoch beweglich“ aufweisen müssen (Prinzip Ritterrüstung), und deshalb der Vergleich Reibung am Schuppenkleid kontra Reibung an einer ebenen Stahloberfläche eigentlich „unfair“ ist.



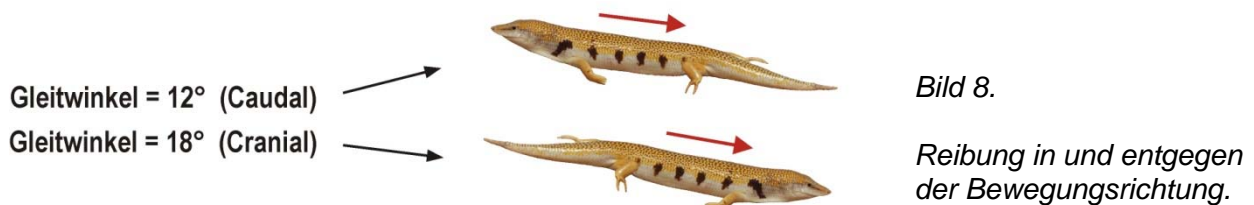
*Bild 7.*

*Reibungsmessungen mit einem sandgefüllten Gleitzylinder.*

Auch die Sandblock-Methode hat ihre messtechnischen Schwächen. Die untere Umrandung des Alu-Zylinders bildet ein Leck für die verpackten Sandkörner. Beim Herabgleiten des Zylinders bleiben mehr oder weniger Sandkörner auf der Testoberfläche liegen. Bei der planen Stahloberfläche ist dieser Missstand kaum zu beobachten. Anders bei der Schuppenhaut. Ist diese nicht ganz eben, verlassen während des Herabgleitens Sandkörner den Umrundungszyylinder. Die Gleitfläche an einem Sandfisch lässt sich eben machen, indem man Rücken oder Bauch des getöteten Tiers, während die Muskeln starr werden (Totenstarre), durch eine ebene Gewichtsplatte belastet. Ganz lässt sich wegen der leicht holprigen Schuppenstruktur das Entweichen einiger Sandkörner aus der Zylinderpackung

allerdings nicht vermeiden. Da die Reibung Sandpartikel gegen Sandpartikel bedeutend größer ist (siehe Böschungswinkel) als die Reibung Sandpartikel gegen die Schuppenhaut, sollte der Effekt die Reibung aber eher herauf- als herabsetzen.

Mit der Methode des Sandzylinders wurde auch der Stopp-Gleitwinkel auf der Sandfischoberfläche bestimmt, wenn sich der Sandblock vom Schwanz zum Kopf des Tieres bewegt (*Bild 8*). Ergebnis: Die Reibung ist um erstaunliche 50% größer, aber immer noch etwas kleiner als der Wert auf Stahl.

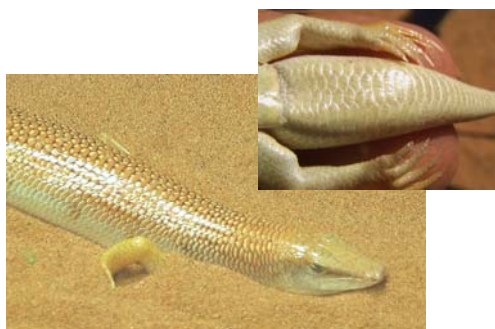


### Abriebversuche in der Wüste

Es war eine hilfreiche Beobachtung während der zweiten Wüstenexkursion: Ein unachtsam entsorgter Sandfisch, der vom Sandsturm freigeweht wurde, sah so glanzlackiert aus wie zuvor. Eine Coladose oder eine Mineralwasserflasche ist gesandstrahlt, das heißt matt geschliffen, wenn sie nur eine Woche im Wüstensand gelegen haben (*Bild 9*).



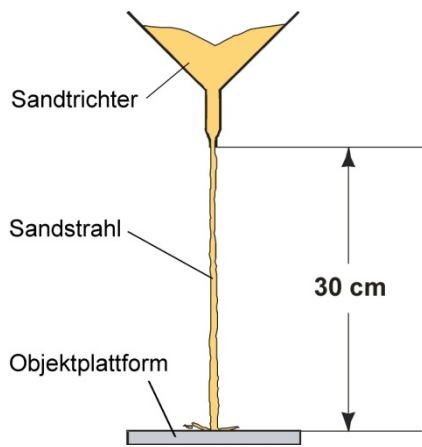
Ein Sandfisch wird bei einem Wüstensturm wohl eher im Dünensand untertauchen, aber einem leichten Sandwind in Bodennähe ist er oft ausgesetzt. Möchte man einen Sandfisch fangen und folgt seiner Spur, so kann diese 500 Meter weit führen. Dennoch zeigt die Schwanzunterseite, die stets im Wüstensand schleift und so die typische Sandfischspur erzeugt, keinerlei Abriebspuren (*Bild 10*). Es muss hinzugefügt werden, dass der Sandfisch das Abriebproblem nicht dadurch löst, indem er sich häufig häutet. Vielleicht auch aus energetischen Gründen: Eine Häutung findet höchstens alle drei Monate statt.



Der Sandfisch, der in seiner sandigen Umwelt (*Bild 10*) wühlt, löst die Frage aus: Was war wichtiger in der Evolution seiner Schuppenhaut: kleine Reibung oder geringer Abrieb? Reibung und Verschleiß sind Begriffe, die in der Tribologie gewöhnlich zusammen abgehandelt werden. Reibungsarme Oberflächen sind meistens auch verschleißfest. Deshalb ist es



zwingend, die Sandfischhaut auch von beiden Seiten zu begutachten. Direkte Verschleißmessungen im Wüstensturm sind umständlich. Zudem, auf einen Sandsturm zu warten ist unbefriedigend. Deshalb wurde im Berliner Bionik-Labor eine simple Sand-Fließapparat konstruiert, die für 6 Stunden einen kontinuierlichen Sand-Fließstrahl aufrechterhält. Die Apparatur besteht aus einem großen Trichter, der mit Wüstensand gefüllt wird (*Bild 11*). Eine auswechselbare Sanddüse erzeugt einen Fließstrahl mit dem gewünschten Durchmesser. Unter dem Trichter kann in einstellbarer Höhe auf der Objektplattform die Materialprobe positioniert werden.



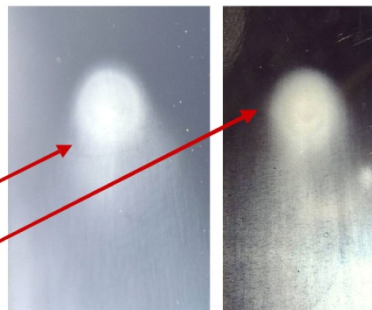
*Bild 11. Sandstrahlapparat.*

Die simple Apparatur hat sich bestens bewährt. Bei den vor Ort durchgeführten Abriebversuchen wurde mit einem 30 cm langen Sandstrahl gearbeitet, der 10 Stunden lang auf die Versuchsprobe aufprallte. Der Rücken des getöteten Sandfischs zeigt nach dieser extremen Beanspruchung nicht die geringste Abriebspur (*Bild 12*). Im Gegenteil dazu ist bei einer Stahloberfläche und einer Glasoberfläche unter gleichen Versuchsbedingungen (10 Stunden, 30 cm Sandstrahlänge) ein deutlicher Abriefleck zu erkennen. Aus der Sicht der Bionik, die den Sandfischeffekt in der Tribologie anwenden möchte, sind kleine Reibung und geringer Abrieb als Ergebnis der Evolution gleichermaßen von Bedeutung.



Abriefleck:

Stahl  
Glas



*Bild 12.*

*Abriebversuch mit Sandstrahlapparat.*

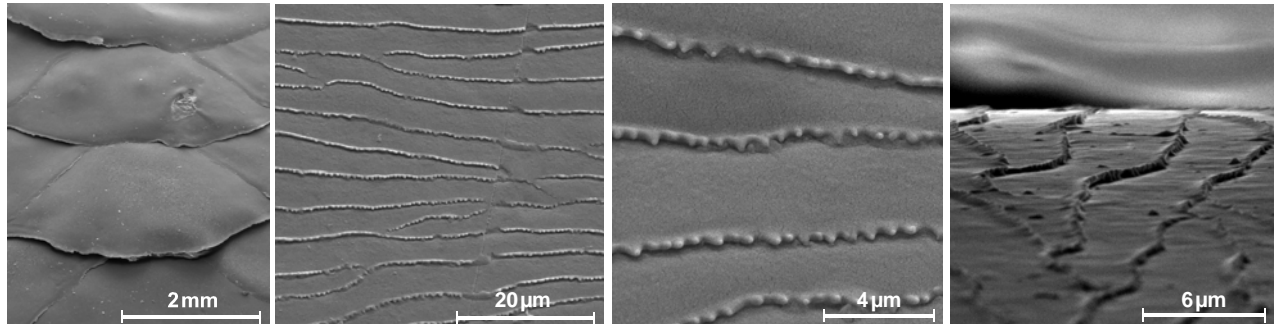
## Sandfischschuppe unter dem Elektronenmikroskop

Die Leistung der Sandfischschuppe wird zu einem Projekt der Bionik. Allzu gern möchte man eine technische Oberfläche schaffen, die in puncto Reibung und Verschleiß mit der Schuppenhaut des Sandfischs mithalten kann. Das Material der Sandfischschuppe birgt kein Geheimnis in sich: Es ist Keratin, aus dem auch unsere Fingernägel bestehen. Für die absonderliche Tribologie der Sandfischschuppe wurden zwei Möglichkeiten diskutiert:

1. Die Schuppen besitzen eine spezielle, vielleicht federnde Beweglichkeit, die Reibung und Verschleiß vermindert.
2. Es ist eine raffinierte Oberflächenstruktur (Schuppen-Ornamentation), deren Wirksamkeit in der Tribologie noch nicht beschrieben ist.

Die These 1 ist wenig glaubwürdig, weil auch das Schuppenhautstück, das ein Sandfisch bei seiner Häutung abwirft, die beschriebenen Eigenschaften besitzt. Es ist ein solches „totes Schuppenstück“, das im Zentrallabor für Elektronenmikroskopie an der TU-Berlin

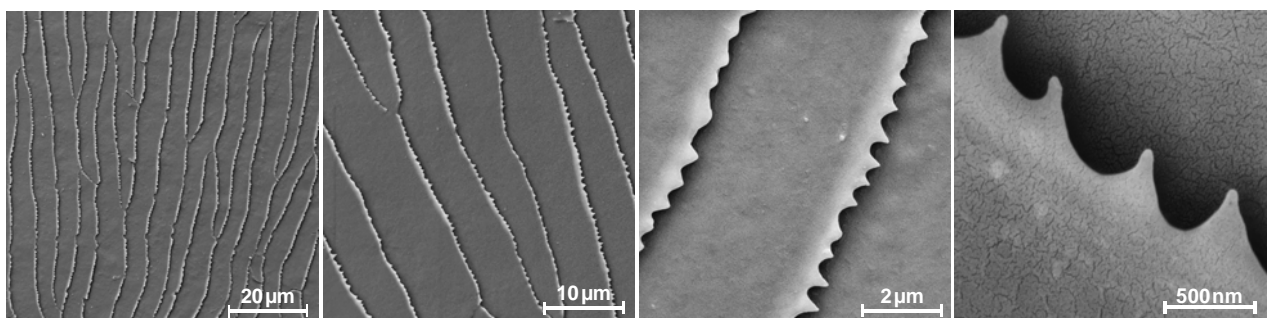
erstmalig untersucht wurde. Keine Glattheit, wie man es von einer reibungsarmen Oberfläche erwartet. Die ersten mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgenommenen Fotos zeigen eine Schwellenstruktur, die - und das war das Überraschende - nicht etwa längs, sondern quer zur Strömungsrichtung des Sandes verlaufen (*Bild 13*).



*Bild 13. Erste REM-Bilder der Oberflächenstruktur der Sandfischschuppe (TUB).*

Man wird an die Rippchen (Riblets) auf der Haifischschuppe erinnert, die den Reibungswiderstand einer turbulenten Grenzschichtströmung vermindern. Nur die Riblets sind längs und nicht quer zur Strömung angeordnet. Dass quer liegende Barrieren die Reibung von Sandkörnern, die über sie hinweg gleiten, vermindern sollen, ist gegen die Intuition.

Noch bessere REM-Aufnahmen wurden anschließend vom Projektpartner IZM (Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration) hergestellt. Die Bilder zeigen mit ausgezeichneter Schärfe sogenannte Nanospikes oben auf den Schwellen, allerdings nur dann, wenn es sich um eine Rückenschuppe handelt. Die Bauchschuppen besitzen messerscharfe Schwellen ohne Spikes (*Bild 14*). Michael Zwanzig vom IZM hat beim Überziehen der Oberfläche mit einer leitenden Goldschicht (Besputtern in der REM-Technik) diese so dünn wie möglich gehalten. Erst dadurch ist die Detailschärfe der Spikes sichtbar geworden. Die Messung ergibt einen Spitzendurchmesser der Spikes von 40 nm, weshalb die Vorsilbe „Nano“ gerechtfertigt ist.



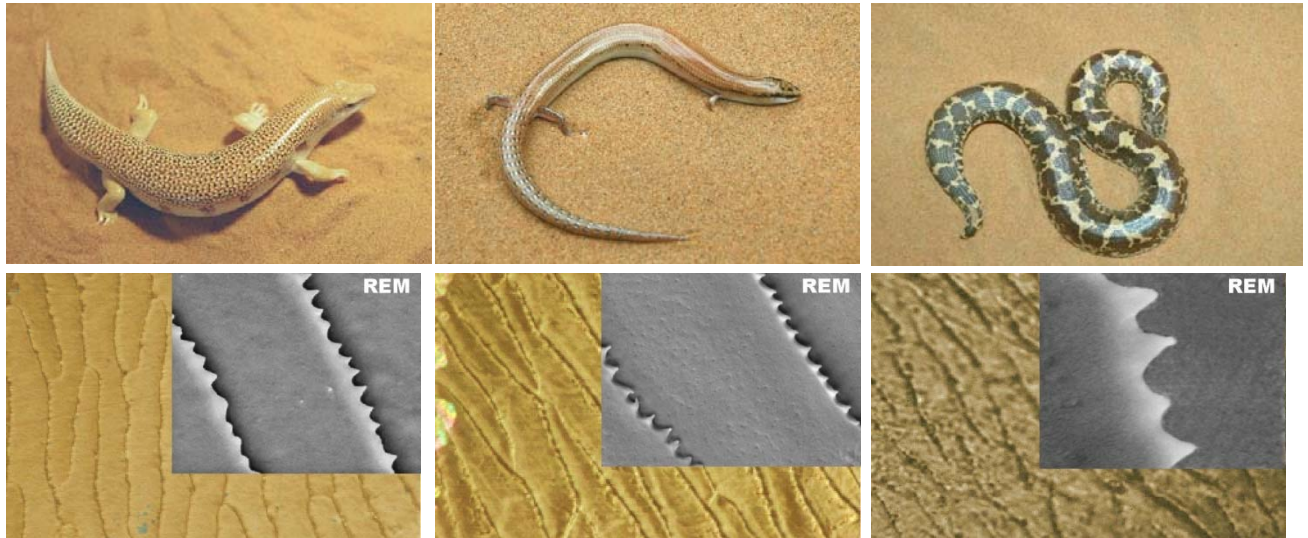
*Bild 14. REM-Bilder der Sandfischschuppe hergestellt von Michael Zwanzig (IZM).*

## Parallelevolution von Sandfisch, Sandschleiche und Sandboa

Allzu oft werden Formen und Strukturen in der Natur leistungstechnisch falsch gedeutet. Auch wenn Bugwulst eines Schiffes und Schnauze eines Delfins einander so ähneln: Die knollige Kopfform eines Delfins ist evolutiv nicht entwickelt worden, um durch Interferenz eine Bugwelle und damit den Wellenwiderstand zu verkleinern, so wie es durch die Bugwulst eines Schiffes geschieht. Ein „Gesetz“ der Bionik lautet: Erregt ein Kunststück der Natur die Aufmerksamkeit des Ingenieurs, so suche nach Organismen, die in einer ähnlichen Umwelt ein ähnliches Problem zu lösen hatten. Zeigt sich, dass die Evolution zu

ähnlichen Lösungen gelangt ist, festigt dies die physikalisch-technische Deutung der ins Auge gefassten biologischen Leistung.

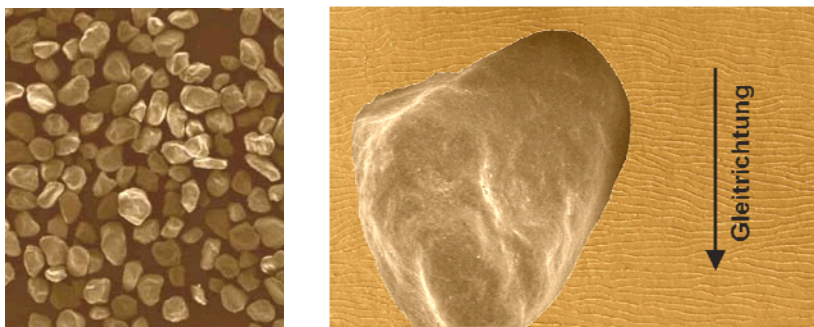
Bisher wurden zwei weitere Reptilien ausfindig gemacht, die einem ähnlichen Umweltstress ausgesetzt sind wie der Sandfisch: Das sind die Sand- oder Keilschleiche (*Sphenops sepoides*) und die kenianische Sandboa (*Eryx colubrinus*). Für beide Schuppentiere ist Schwimmen durch Schlängeln unter dem lockeren Dünensand die natürliche Verhaltensweise. Das *Bild 15* zeigt im Vergleich die unter dem Lichtmikroskop und dem Rasterelektronenmikroskop (REM) sichtbar werdende Fein- und Feinst-Struktur der Schuppenoberfläche von Sandfisch, Sandschleiche und Sandboa.



*Bild 15. Parallelevolution: Sandfisch (links), Sandschleiche (Mitte) und Sandboa (rechts).*

### Mikroschwellen zur Reibungsminderung

Die Anschauung, dass Querschwellen das Gleiten eines Sandkorns eher behindern als begünstigen sollten, ergibt sich durch eine Fehleinschätzung der Größenverhältnisse. Ein Sandkorn aus der Wüste Erg Chebbi ist im Durchschnitt 0,3 mm groß. Die Mikroschwellen sind etwa 1 µm breit, 1 µm hoch und 8 µm voneinander entfernt. Rechnerisch heißt dies, dass ein Sandkorn im Mittel auf 38 Mikroschwellen aufliegt (*Bild 16*). Für ein Sandkorn verhält sich die Oberfläche so eher kontinuierlich als diskontinuierlich. Fragt man nun nach



*Bild 16.*

*Sahara Sandkörner  
und Sandkorn auf  
Schuppenoberfläche.*

der Funktion der Schwellen, so wird spontan von Vielen die Vermutung geäußert, dass durch die Lücken der Schwellenstruktur die Kontaktfläche zwischen Sandkorn und Oberfläche verkleinert wird. Dies würde die atomaren Adhäsionskräfte und damit die Reibung vermindern. Doch die sich erhöhende Kontaktpressung und die elastische Verbreiterung



der Kontaktoberfläche müssen mitgerechnet werden. Die im Anhang dargestellte Theorie der Hertzschen Pressung zeigt, dass nicht Mikro-Schwellen, sondern Mikro-Noppen die Kontaktfläche am wirkungsvollsten verkleinern würden.



Bild 17.

Eine kleine vom Wüstenboden aufgehobene Glasscherbe führte zu einer überraschenden Erkenntnis: Die matte Oberfläche erwies sich gar nicht als Glas. Es war eine dünne Ton-Mineralschicht, die vom Sandwind hinterlassen worden war (Bild 17). Die Schicht ließ sich nicht abwaschen, aber man konnte sie mit einer Rasierklinge abschälen. Die Scherbe mag vielleicht schon ein Jahr in der Wüste gelegen haben. Ein Kontrollversuch mit einer Cola-Glasflasche, die gezielt 20 Tage in den Wüstensand gelegt wurde, führte zum gleichen Ergebnis.

Woher kommt diese Verschmutzung, die sich wie eine Lackschicht auf der Oberfläche festsetzt? Die Antwort findet sich, wenn man ein Sandkorn der Region unter dem Rasterelektronenmikroskop genauer betrachtet. Mit zunehmender Vergrößerung wird ein feines Granulat sichtbar, das die Oberfläche lückenlos bedeckt (Bild 18). Es handelt sich dabei um Tonminerale (mittlere Korngröße 400 nm), die so fest an der Oberfläche haften, dass eine konventionelle Ultraschallreinigung versagt.

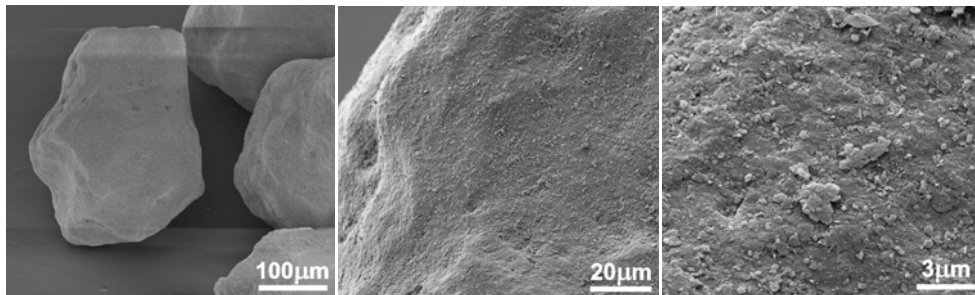


Bild 18.

Tonminerale auf Sandkorn.

Ob Pflanze oder Tier in der Sahara: Ein Überziehen von Blatt oder Haut mit einer lackähnlichen Mineralschicht ist belastend. Und speziell die Reibung betreffend: Ein Stahlblech, über das längere Zeit ein Sandstrahl gleitet, besitzt am Ende einen deutlich höheren Reibungskoeffizienten. So ist davon auszugehen, dass die Evolution Mittel gefunden hat, um den Partikelansatz zu vermeiden.

Die Idee drängt sich auf, dass die Querschwellen die Funktion von Bürsten bilden, die die Tonminerale von den Sandkörnern abstreifen. – Eine gehäutete Schuppe wurde 30 min gesandstrahlt. Und wie es bei der Abstreifhypothese zu erwarten ist: Die Mineralpartikel häufen sich vor den Schwellen (Bild 19a). Und durch starkes Pusten oder einen weichen Pinsel lassen sich die abgestreiften Partikel leicht wieder entfernen (Bild 19b).

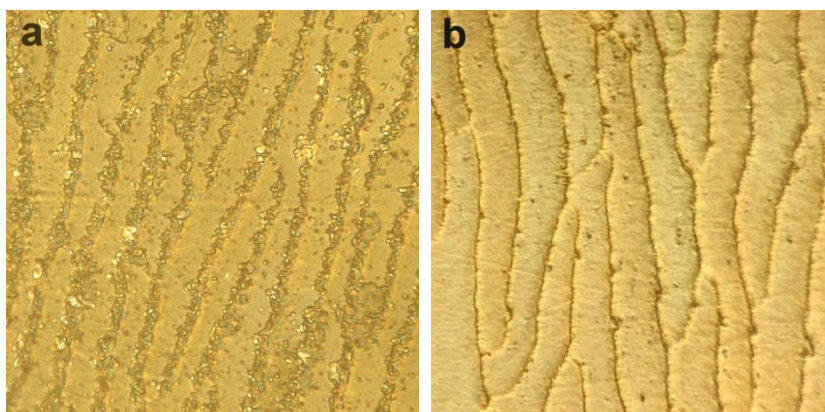
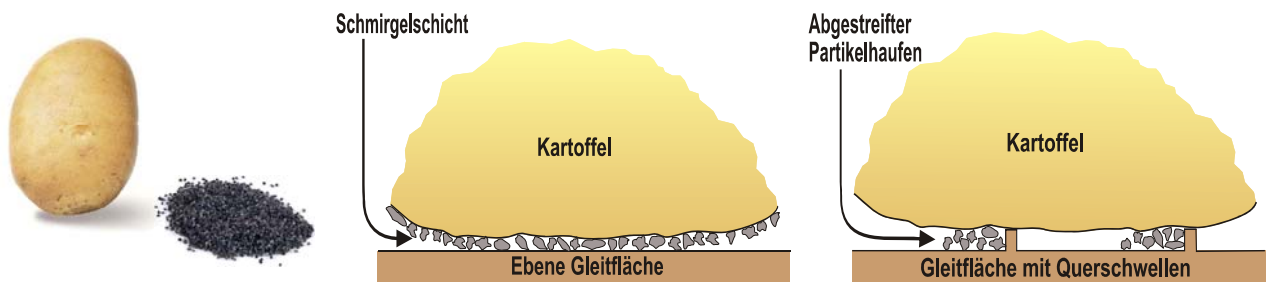


Bild 19.

a) Abgestreifte Tonpartikel nach 30 min Strahlzeit.

b) Partikel mit Staubpinsel entfernt.

Um die Mechanik des Abstreifens der Mineralpartikel von den Sandkörnern im Schul-experiment zu demonstrieren, wurde das „Kartoffel-Mohn-Modell“ entworfen (*Bild 20*). Eine Kartoffel soll ein vergrößertes Sandkorn darstellen. Wälzt man die leicht angefeuchtete Kartoffel in einem Mohnhaufen, werden Mohnkörnchen (sie stellen die Mineralpartikel dar) an der Kartoffel kleben bleiben. Führt man mit der so „bepuderten“ Kartoffel über eine glatte Oberfläche, so lässt sich ein Kratzen fühlen und hören. Besitzt die Oberfläche aber Querswellen, verschwindet die kratzende Reibung. Die abgestreiften Mohnkörnchen häufen sich entlang der Schwellen an, und die Kartoffel rutscht reibungsarm direkt auf den glatten Querschienen.

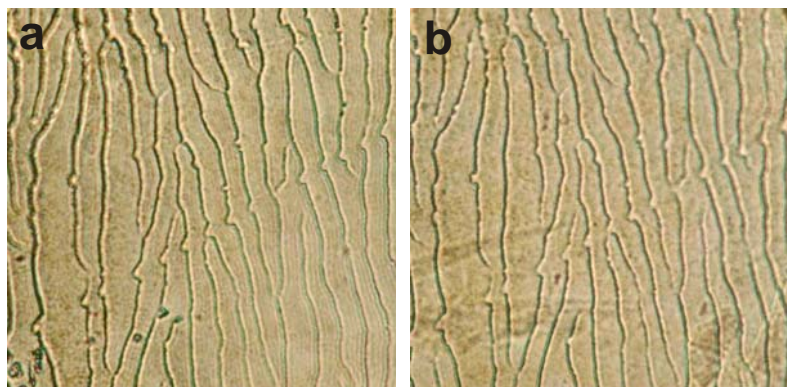


*Bild 20. Das Kartoffel-Mohn-Modell demonstriert das Abstreifen der Reibpartikel.*

### Mikroschwellen zur Abriebminderung

Denkt man weiter, so sollte die Schwellenstruktur auch den Abrieb verringern. Es ist bekannt und wird in der Tribologie verstärkt diskutiert, dass Kleinstpartikel zwischen Reib- und Basiskörper sich in eine Oberfläche eingraben (Problem des Festfressens). Ein permanentes Abstreifen der potenziellen Reibpartikel sollte dies verhindern.

Die Standfestigkeit der Sandfischschuppe gegen Abrieb im Vergleich zu Glas und Stahl wurde bereits in dem Kapitel „Abriebversuche in der Wüste“ demonstriert. Die diagnostizierte visuelle Unversehrtheit der Sandfischschuppe am Strahlauffreffpunkt im *Bild 12* könnte kritisiert werden, da eventuelle Abriebspuren in den Farbnuancen der Schuppe untergehen könnten. Deshalb wurde im Berliner Bionik-Labor der Versuch unter strengeren Bedingungen wiederholt. Eine gehäutete Sandfischschuppe wurde mittels doppelt klebendem Tesafilm auf einem Objektträgerglas fixiert. Mit dem Lichtmikroskop wurde bei 1000-facher Vergrößerung ein charakteristischer Oberflächenausschnitt ausgewählt und fotografiert (*Bild 21a*). Die Probe wurde anschließend in leichter Schräglage zwei Stunden lang mit einem feinen Sandstrahl aus 15 cm Höhe beaufschlagt. Es war nicht ganz einfach aber es gelang, denselben Bildausschnitt unter dem Lichtmikroskop wiederzufinden. Das Foto zeigt nicht die geringste Abriebspur (*Bild 21b*).



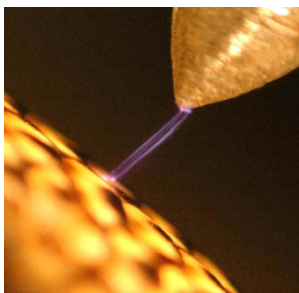
*Bild 21.*

*Sandfischschuppe vor (a) und nach (b) einer zweistündigen Sandstrahlung.*

## Elektrische Eigenschaften der Sandfischschuppe

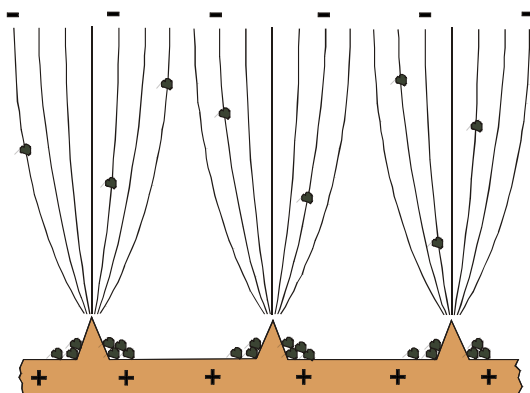
Nach einem nächtlichen Sandsturm in der Wüste konnte ein merkwürdiger Effekt beobachtet werden: Ein am Abend betäubter Sandfisch, der zum Aufwachen in einem Plastik-Eimer gesetzt worden war, und dessen Vitalität am Morgen mit dem Zeigefinger geprüft werden sollte, versetzte dem Autor einen heftigen elektrischen Schlag. Die Rekonstruktion des Geschehens ergab folgende Ursache.

Im Sandsturm werden einige am Sandkorn haftenden Mineralpartikel abgerieben und in die Atmosphäre getragen. Unter der Annahme, dass die Tonminerale elektrostatisch an den Sandkörnern haften, tragen die abgelösten Mikropartikel elektrische Ladung in die Atmosphäre. Der staubige Dunst nach einem Sandsturm ist elektrisch geladen, und zwar negativ, weil bei der Ladungstrennung die kleineren Partikel gewöhnlich die Elektronen übernehmen. Im vorliegenden Fall wurde der Effekt noch verstärkt, weil separat auch Tonminerale aus dem Plastik-Eimer heraus geweht wurden. Der Versuch wurde bei weiteren Sandstürmen wiederholt, wobei eine Metallelektrode und nicht der Finger den Gegenpol bildeten (*Bild 22*). Die Tatsache, dass an einer Schuppe eine elektrische Funkenentladung auftreten kann, ist merkwürdig. Als sich herausstellte, dass an der Sandfischschuppe die Entladung früher einsetzte als an einer daneben liegenden Metalloberfläche, wurde klar, dass das Phänomen eingehender untersucht werden musste.



*Bild 22.*  
*Schuppen-Entladung.*

Es sind die Nanospikes auf den Schwellen der Rückenschuppe, die das elektrische Entladungsphänomen erklären könnten. Die Spikes haben an der Spitze einen Durchmesser von 40 nm, was an einen atomaren Maßstab herankommt. An einer solch scharfen Spitze könnte die Entladung forciert werden. Und einen Grund für diese Blitzableiter-Funktion der Nanospikes gibt es: Ein Sandfisch, der nach einem Sandsturm sein Untersand-Domizil verlässt, ist einem permanenten „Regen“ von herabschwebenden Tonmineralen ausgesetzt. Der herabschwebende Tonstaub folgt den elektrischen Feldlinien, die sich nach den Gesetzen der Elektrostatik an den positiv geladenen Spikes des Sandfischrückens zusammenschnüren. Die Tonpartikel werden an den Nanospitzen durch eine Mikro-Sprühentladung neutralisiert, bevor sie sich auf der Sandfischhaut locker ablagern (*Bild 23*).



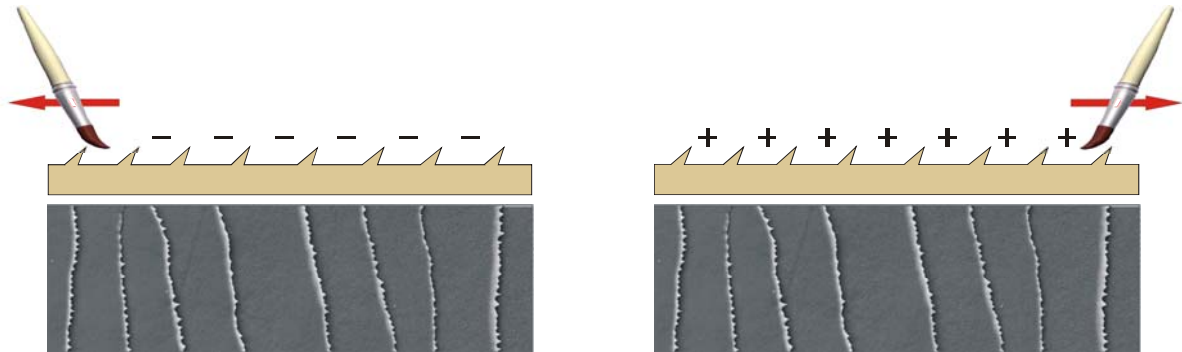
*Bild 23.*

*Entladung der herabschwebenden  
Tonmineralien an den Nanospikes.*

Ohne diesen Entladungstrick würde es (wie im *Bild 17* bei der Glasscherbe) zu einer festen elektrostatischen Haftung der Tonpartikel an der Sandfischhaut kommen. Genau das geschieht bei der elektrostatischen Pulverlackierung, bei der ein elektrisch geladener Farbstaub sich auf der gegenpolig geladenen Werkstückoberfläche fest haftend niederschlägt.



Dass die Nanospikes eine elektrische Funktion haben, die vielleicht weiter reicht als bisher angenommen, wird durch eine zufällig gemachte Entdeckung verstärkt. Es beginnt mit einem bekannten Schulversuch: Ein Glasstab oder ein PVC-Stab lässt sich durch Reiben mit einem Wolltuch elektrostatisch aufladen. Der Glasstab wird durch Reiben positiv, der PVC-Stab negativ, und dabei ist es egal, in welcher Richtung gerieben wird. Etwas völlig Unerwartetes geschieht, wenn man versucht, in gleicher Weise eine Sandfischhaut aufzuladen. Ob Plus- oder Minus-Polarität auftritt hängt von der Reibrichtung ab (*Bild 24*).



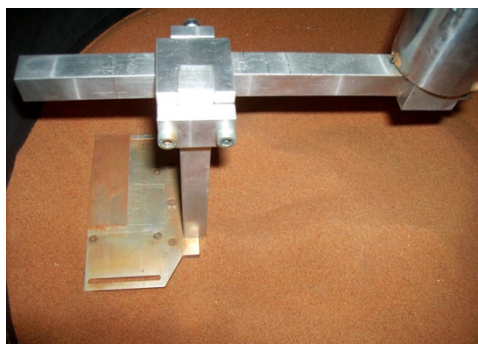
*Bild 24. Gerichtete Triboelektrizität an einer Sandfischschuppe.*

Für das Experiment wurde ein 3 cm langes Häutungsstück eines im Institut gehaltenen Sandfischs mit doppelt klebendem Tesafilm auf ein Objektträgerglas fixiert. Und statt mit einem Woll-Läppchen (was auch funktioniert) wurde mit einem Staubpinsel die Schuppenprobe entlang gewischt. Es scheint so, als würde der Staubpinsel, bedingt durch die Neigung der Schwellen, mal Elektronen in die Spikes hineindrücken (*Bild 24 links*) und mal aus diesen herausziehen (*Bild 24 rechts*).

Nanomechanisch ist es vorstellbar, dass die Elektronenaffinität, die zunächst eine Eigenschaft des Materials ist, sich durch eine geeignete Nanostruktur der Oberfläche in ihrer Stärke modifizieren lässt. Das beobachtete Phänomen stärkt die These, dass die Nanospikes etwas mit der Elektrizität zu tun haben. Ob der gerichteten Triboelektrizität in der Umwelt des Sandfischs eine biologische Funktion zukommt, ist offen. Vielleicht erweist sich der entdeckte triboelektrische Sandfischeffekt aber als eine Spin-off-Innovation.

## Standfestigkeit der Sandfischschuppe

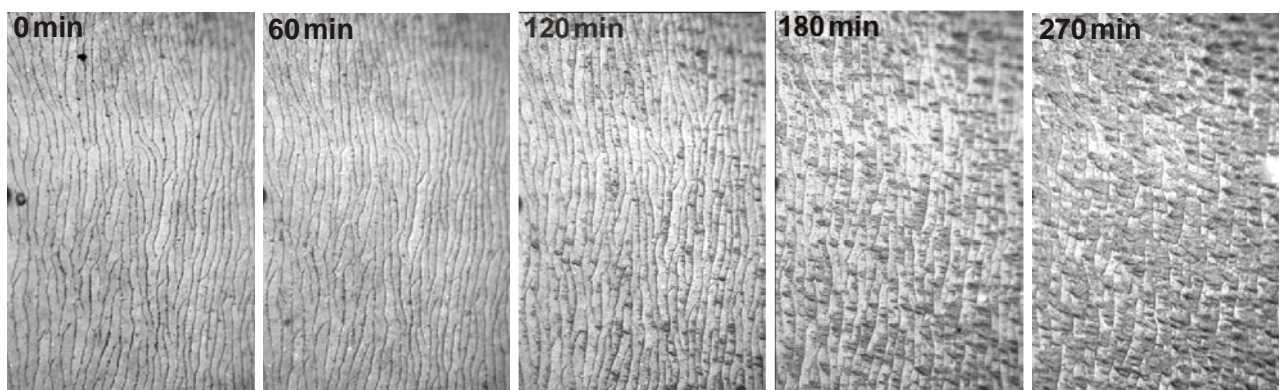
Bisher wurden die Versuche zur Abrieb-Standfestigkeit der Sandfischschuppen mit dem Trichter Sandstrahlapparat durchgeführt. Für die Wiederholungsexperimente sollte das Untersandschwimmen wirklichkeitsgetreuer nachgebildet werden. Es wurde ein Sandrührer konstruiert, mit dem ein auf einem Objektträgerglas fixiertes Schuppenstück rotierend unter dem Sand entlang bewegt werden kann. Die Eintauchtiefe des Probestellers und damit der Sanddruck lässt sich verstellen (*Bild 25*).



*Bild 25.*

*Sandrührer mit rotierendem Kragarm und Probesteller.*

Mit der neuen Apparatur konnte die Leistung eines Sandfischs beim Untersandschwimmen nachgestellt werden: eine Eintauchtiefe von 5 cm und eine Geschwindigkeit von 10 cm/s in dem mit Saharasand gefüllten Sandrührer. Wie das *Bild 26* zeigt, wurde das Experiment auf 4 ½ Stunden ausgedehnt. Es wurde stets dieselbe Region der Schuppe unter dem Lichtmikroskop bei 500-facher Vergrößerung fotografiert. Der Sand strömt von links nach rechts über die Schwellen. Das Bemerkenswerte zuerst: Die Schwellenstruktur der Schuppenoberfläche bleibt bis zum Schluss des Experiments unzerstört. Das deckt sich mit dem in *Bild 19* präsentierten Ergebnis. Aber nach 1 ½ Stunden Untersandbewegung beginnen sich in den 8 µm breiten Gebieten zwischen den Schwellen Tonpartikel festzusetzen. Es bilden sich Cluster, die mehr und mehr anwachsen. Für den Sandfisch ist diese späte Verschmutzung kein Hemmnis. 120 min lang sich mit einer Geschwindigkeit von 10 cm/s fortzubewegen heißt, eine Strecke von 720 m unter dem Sand zurückzulegen. Vorher (spätestens nach 3 Monaten) wird sich der Sandfisch längst gehäutet haben.



*Bild 26. Sandfischschuppe im Langzeitversuch unter dem Lichtmikroskop.*

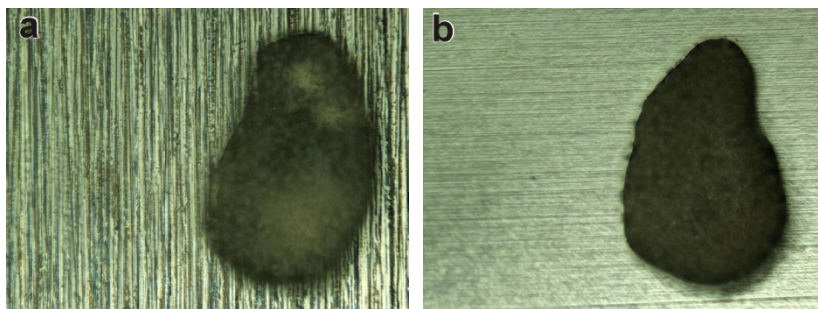
Wie es bei der Abstreifhypothese der Querschwellen zu erwarten ist, lagern sich die Tonminerale an den Schwellenvorderseiten an. Das geschieht gewiss auch in den ersten 1 ½ Stunden. In dieser Phase werden die von einem Sandkorn abgestreiften Tonpartikel offensichtlich von anderen Sandkörnern wieder mitgenommen. Erst wenn nach einer kritischen Zeitspanne sich ein Tonteilchen festsetzt, vielleicht durch eine Oberflächenverletzung, lagern sich lawinenartig weitere Tonteilchen an diesem „Kristallisationskeim“ an.

Die Standfestigkeit der Schwellen könnte durch ihre verstärkte Härte erklärt werden. Dafür gibt es einen vagen Hinweis: Zinnkraut trägt seinen Namen, weil es früher zum Putzen von Zinn verwendet wurde. In der Sahara gibt es die Koloquinte, deren Blätter ein Kupfergefäß polieren. Beide Male sind es Partikel von Kieselsäure, die wegen ihrer Härte das Abschleifen bewirken. Und der Autor hat es auf der Saharaexkursion 2009 vorsichtig probiert: Auch mit einem Sandfischrücken lässt sich ein Kupferkessel langsam blank machen.

Eine weitere Spekulation betrifft die Eigenschaft der Oberfläche zwischen den Mikroschwellen des Sandfischs. Es gilt, ein elektrostatisches Anhaften negativ geladener Tonpartikel zu vermindern, z. B. durch eine negativ vorgeladene Oberfläche. Nach Werner Baumgartner [1] lassen sich an der Sandfischhaut Zuckermoleküle nachweisen, denen in der Literatur eine negative Ladung zugeschrieben wird. Hier passt die kontroverse Beobachtung, dass Triboversuche mit Tesafilm zwar eine hohe Reibung ergeben, dass aber die Antihafwirkung gegenüber Tonstaub so gut ist wie bei der Sandfischschuppe. Die Oberfläche von Tesafilm ist nach Angaben in der Literatur stark negativ geladen. Die dadurch gegebene elektrostatische Abstoßung verhindert das massive Anhaften von Tonpartikeln.

## Technischer Sandfischeffekt

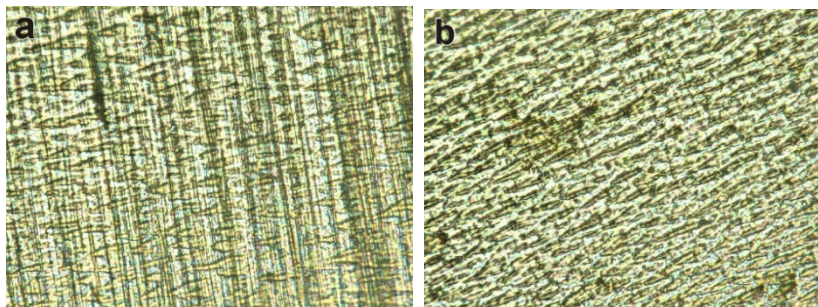
Ein gewalztes Federstahlblech (0,2 mm dick) wurde schon längere Zeit als Referenzoberfläche für die Reibwinkelmessungen mit dem Granulat-Neigungs-Tribometer verwendet. Die immer wieder auftretende Diskrepanz beim Sandstrahlversuch - mal ergeben sich gemittelt  $25^\circ$  und mal  $26^\circ$  Stoppwinkel - erfuhr eine überraschende Aufklärung. Es ist sind die vom Walzprozess hinterlassenen Riefen, die die Reibung richtungsabhängig machen. Verlaufen die Riefen quer zur Sandgleitrichtung, ergibt sich ein etwas kleinerer Stoppwinkel, als wenn die Riefen in Strömungsrichtung orientiert sind (*Bild 27a*). Noch drastischer fällt die Differenz aus, wenn durch Läppen die Riefen fast völlig beseitigt werden (*Bild 27b*). Nun ist der Stoppwinkel bei gleichen Versuchsbedingungen (gleicher Durchmesser der Strahlkanüle und gleicher Abstand der Strahlkanüle von der Oberfläche) sogar um  $2^\circ$  größer. Das Phänomen darf als „technischer Sandfischeffekt“ interpretiert werden.



*Bild 27.*

*Sandkorn auf geriefelter (a) und geläppter (b) Stahloberfläche.*

Der Sandfischeffekt findet sich auch wieder, wenn man nach einem Sandstrahlversuch das Abriebverhalten des Walzblechs mit Querriefen betrachtet: Die Abriebspuren fallen deutlich geringer aus als beim geläpften Blech (*Bild 28a*).



*Bild 28:*

*Sandstrahlabrieb am Walzblech:  
geriefte Oberfläche (a),  
geläppte Oberfläche (b).*

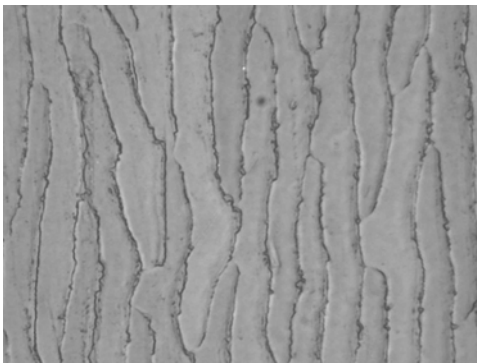
Wenn das quergeriefte Walzblech mit der quergerippten Sandfischschuppe verglichen wird, dürfen die geometrischen Unterschiede nicht übergangen werden. Die Walzstruktur des Stahlblechs besitzt Grate, die 1 bis 2  $\mu\text{m}$  voneinander entfernt sind. Bei der Sandfischschuppe beträgt der Schwellenabstand im Mittel 10  $\mu\text{m}$ . Zwischen den Graten des Walzblechs fehlen die ausgedehnten glatten, antihaftend wirkenden Talsohlen, in denen sich abgestreifte Tonpartikel sammeln, und aus denen diese auch wieder herausgetragen werden können. Die eng beieinanderliegenden Rillen des Walzblechs setzen sich schnell mit Tonpartikeln zu. Und dabei ist es egal, ob die Rillen quer oder längs vom Wüstensand überströmt werden. Ferner fällt auf, dass den Stahlgraten die hinreichende Scherfestigkeit fehlt. Es ist schon verwunderlich, dass die aus Keratin bestehenden Schwellen des Sandfischs einem mehrstündigen Sandstrahlbombardement unbeschädigt standhalten, während die Grate des gewalzten Federstahlblechs bereits nach 10 min Sandstrahlzeit durch Längsrillen zerklüftet werden.



## Halbsynthetische Sandfischhaut

Nachdem gezeigt werden konnte, dass ein Walzblech mit einer Grat-Rillen-Struktur im Mikrometermaß einen Sandfischeffekt simulieren kann, war nun die Schaffung einer künstlichen Sandfischoberfläche das primäre Ziel. Die Aufgabe: Fertigung einer Oberflächenstruktur mit parallelen Schwellen, 1 µm hoch und 1 µm breit in einem Abstand von 10 µm. Da ein „Sandfisch-Master“ fehlte, dessen Schwellenstruktur hätte abgeformt werden können, wurde auf das Original zurückgegriffen. Es wurde die Rückenpartie eines Sandfischs in Kunststoff abgeformt. Als Vorlage für die Abformung diente ein Rückenstück (5 cm lang und 1,4 cm breit), das in der Wüste Erg Chebbi präpariert worden war.

Die Kunststoffabformung in der konventionellen Positiv/Negativ-Technik wurde von Michael Zwanzig (FhG-IZM) vorgenommen. Eine Silikonmasse (ohne Füllstoffe) wird unter Vakuum auf die Schuppenhaut aufgebracht und ausgehärtet. Nach Entfernen der biologischen Basisstruktur entsteht eine Negativform, die mit Polyoxymethylen (POM) ausgegossen wird. Als kritisch erwies sich immer wieder das Ablösen des Positivs von der fein strukturierten Negativform. Das *Bild 29* zeigt eine erfolgreiche Abformung. Die lichtmikroskopische Aufnahme bei 2000-facher Vergrößerung zeigt keinen Unterschied zwischen dem wieder gewonnenen Positiv aus Polyoxymethylen und dem biologischen Original.



*Bild 29.*

*Abgeformte Sandfischhaut aus Polyoxymethylen bei 2000-facher Vergrößerung.*

*Hersteller der Abformung:  
Michael Zwanzig, FhG-IZM*

Die Nanostruktur wird in ihren feinsten Einzelheiten reproduziert. Unbefriedigend ist bei dem Abformversuch, dass die Sandfisch-Urform nicht die Ebenheit des lebenden Sandfischs besaß. Das Ablösen der dorsalen Schuppenhaut und der anschließende Trocknungsprozess im Laborwagen in der Wüste ziehen Mikro- und Makroverformungen des Präparats nach sich. Dennoch erbrachte die Gleitreibungsmessung mit dem Granulat-Tribometer das erhoffte Resultat. Aus 20 Messungen ergaben sich die Mittelwerte:

*Reibungswinkel der Sandfischnachbildung: 26,2° (Standardabweichung 0,30)*

*Reibungswinkel der ebenen Materialprobe: 28,5° (Standardabweichung 0,36).*

Das *Bild 30* zeigt das erfolgreiche Sandfischimitat unter dem Granulat-Reibungs-Tribometer.



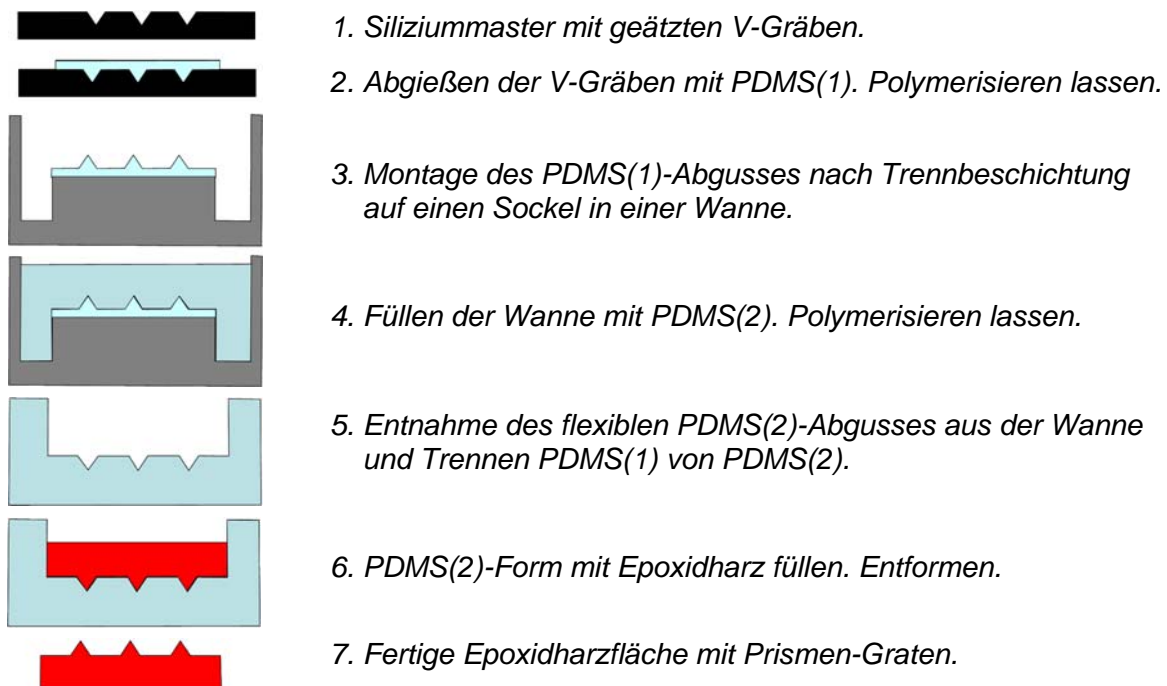
*Bild 30.*

*Halbsynthetische Sandfischoberfläche unter dem Sandstrahl des Granulat-Tribometers.*

## Vollsynthetische Oberfläche mit Sandfischeffekt

Im Herbst 2008 gelang es Michael Zwanzig vom Partnerinstitut (*FhG-IZM*), eine Negativ-Form aus Silizium mit geätzten V-Gräben herzustellen. Aus diesem Negativ-Master entstand über mehrere Abformschritte schließlich eine Epoxidharzfläche mit Prismengraten, die als grobe Annäherung an eine Sandfischoberfläche gelten kann.

Das Problem ist die Reliefumkehr, die im *Bild 31* mit den Schritten 3 und 4 dargestellt ist, nämlich die Abformung eines weichen Silikon Elastomers mit einem weichen Silikon-Elastomer. Denn gießt man noch nicht polymerisiertes PDMS (Polydimethylsiloxan, Sylgard 184) auf den ausgehärteten PDMS-Master, lassen sich nach der Polymerisation Master und Abformung nicht mehr voneinander trennen. Das Problem konnte erst nach vielen Fehlversuchen gelöst werden. Chemische Beschichtungsversuche aus Flüssigkeiten führten zu keinem Erfolg (PDMS ist sehr inert). Metallbesputterungen im Vakuum führten zwar zu einer Trennschicht, doch im Vakuum bekommt der Master Risse und ändert seine Form. Die Abscheidung einer trennenden Substanz aus der Gasphase brachte schließlich den erwünschten Erfolg. Die endgültige Silikon-Negativform konnte mit Epoxidharz Polyoxymethylen ausgegossen werden. Polyoxymethylen (POM) wird in der Chemieliteratur wegen seiner hohen Steifigkeit, niedrigen Reibwertes und ausgezeichneter Dimensionsstabilität als technischer Kunststoff für Präzisionsteile empfohlen.



*Bild 31. Arbeitsschritte zur die Erzeugung einer künstlichen Sandfischoberfläche (FhG-IZM).*

Die Nanotechnologie wird als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts gepriesen. Doch bei den heutigen Nano-Erfindungen und Nano-Produkten handelt es sich meistens um Technologie im Mikrometerbereich. Nanotechnologie fängt laut Definition bei Abmessungen um 100 nm an. Eine Nachbildung der Ornamentation der Sandfischschuppe ist deshalb Mikro- und nicht Nanotechnologie (mit Ausnahme der Nachbildung von Nanospikes). So verwundert es, dass Institutionen der Forschung und Industrie, angesprochen, eine Oberflächenstruktur à la Sandfisch zu schaffen, gepasst haben. Deshalb wurde in eigener Regie vom Partnerinstitut *FhG-IZM* die vorgestellte Lösung entwickelt, wobei Anleihe bei der klassischen Silizium-Mikrolithografie gemacht werden musste.

Die geschaffene synthetische Sandfischoberfläche mit den Abmessungen  $1 \times 1$  cm hatte Pilotcharakter. Die Länge von 1 cm war zu gering, um mit dem Granulat-Neigungs-Tribometer eine quantitative Reibungsmessung durchzuführen. Das Neigungstribometer wurde deshalb dahin gehend komplettiert, dass sich neben der Sandstrahlkanüle das Objektiv eines Digitalmikroskops anbringen ließ. So konnte das Herabgleiten des Sandstrahls über die künstliche Sandfischoberfläche genauestens beobachtet werden.

Die ebene Epoxidharzfläche und die in einem Bereich von  $1 \times 1$  cm darin eingelassene Schwellenstruktur sind gleich hoch. Der Sandstrahl rieselt auf dem schräg gestellten Epoxidharzstück abwärts. Bei Erreichen des Gleitreibungswinkels für den ebenen Bereich stoppt dort der Sandkörnchenstrom, wohingegen auf der Querschwellenstruktur die verbleibenden Sandkörnchen mit unverminderter Geschwindigkeit weiter fließen (*Bild 32*).



*Bild 32.*

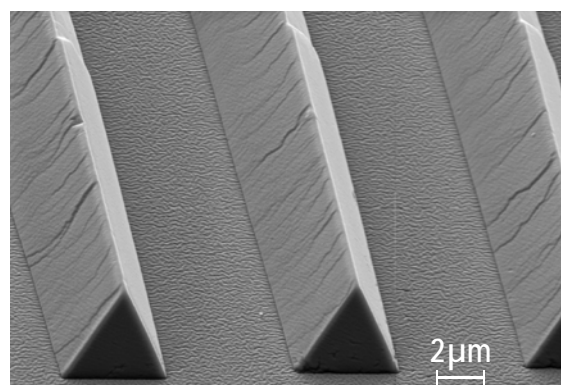
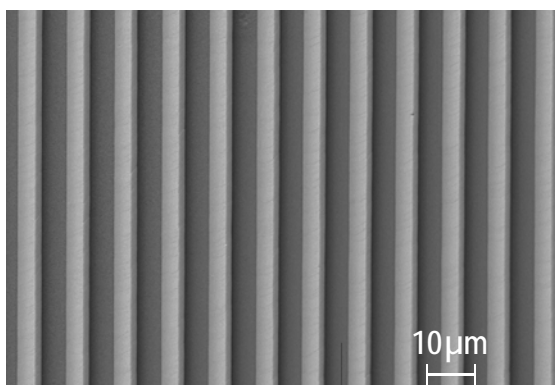
*Visualisierung der reibungsmindernden Wirkung der synthetischen Sandfischschuppe.*

*Sandkörnchen stoppen auf glatter Oberfläche.*

*Sandkörnchen gleiten auf Querschwellenstruktur.*

Die augenfällige Wirksamkeit der Querschwellenstruktur erstaunt, weil die Nachformung noch deutliche Defizite aufweist. Die Schwellen sind noch zu groß, sie liegen zu dicht beieinander und sie besitzen keine Neigung in Strömungsrichtung des Sandes (*Bild 33*). Dennoch kann die Nachbildung nicht mit dem Original konkurrieren. Das größte Manko ist, dass das Epoxidmaterial an den Schwellenspitzen nicht die Härte einer Sandfischschwelle besitzt. Die synthetische Sandfischschuppe besitzt bei Weitem nicht die Standzeit wie das Original. Schon nach Minuten zeichnet sich eine Zerstörung der Prismenspitzen ab.

Genauso wie bei der Sandfischhaut werden auch an den Prismenschwellen Tonpartikel von den darüber gleitenden Sandkörnern abgestreift. Wegen der Enge der Dreieckstäler setzen sich diese jedoch schnell darin fest. Es fehlen - wie bei der Grat-Rillen-Struktur des Walzblechs - die Plateaus zwischen den Graten, die bei der Sandfischschuppe eine noch unerklärte Antihafteffekt besitzen.



*Bild 33. Synthetische Schwellenstruktur unter dem Rasterelektronenmikroskop (FhG-IZM).*



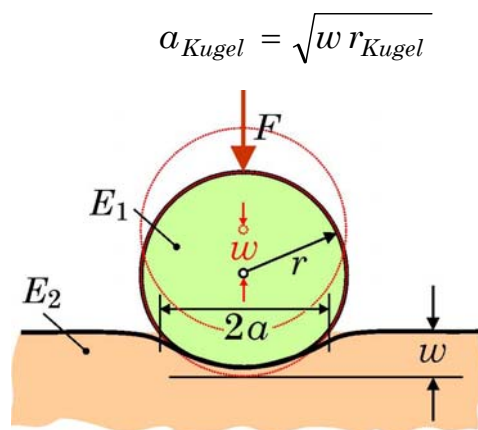
## Gleiten auf der planen Fläche, auf Kuppen und auf Schwellen

Eine Demonstration, die gern dem Laien in einer Feinwerkstatt vorgeführt wird: Der Meister drückt zwei sogenannte Endmaße aneinander (Endmaße sind kleine, extrem glatt geschliffene Stahlblöcke genau definierter Dicke). Durch die Ebenheit und Glätte der Endmaße kommen sich die Oberflächen so nahe, dass atomare Anziehungskräfte zu wirken beginnen. Die Oberflächen haften fest aneinander, und sie lassen sich schwer gegeneinander verschieben (große Reibkraft). Dass es die Wissenschaft der Tribologie gibt, ist nur der Tatsache zu verdanken, dass Rauigkeiten Grund- und Gegenkörper auf Abstand halten.

Einfache physikalische Reibtheorien arbeiten mit der Vorstellung, dass Reibkräfte durch Adhäsionskräfte entstehen. Die Adhäsionskräfte werden über die Kontaktfläche erzeugt, die sich ausbildet, wenn durch das Aneinanderdrücken von Grund- und Gegenkörper die Erhebungen plastisch oder elastisch abgeflacht werden. Wird eine natürliche Rauigkeit durch winzige Kugelkalotten beschrieben, deren Höhen statistisch normalverteilt sind, so liefert die Hertzsche Kontakttheorie, dass die abgeplattete Kontaktfläche in erster Näherung proportional zur Normalkraft ist [2]. Das Amontonsche Reibungsgesetz bestätigt sich.

Die Frage stellt sich: Gibt es neben stochastisch verteilten Kugelasperiten als Rauigkeitselemente andere Anordnungen und Formen von Mikroerhebungen, die vielleicht eine besonders kleine Abplattungsfläche und damit eine besonders kleine Adhäsionsreibung erzeugen? Da sich die Oberflächenstruktur einer Sandfischschuppe auch nach einem stundenlangen Sandstrahlbombardement nicht ändert, können die Asperiten vom Sandkorn nur intermittierend ELASTISCH verformt werden. Die Idee der nachfolgenden Theorie ist, die Hertzsche Kontakttheorie vergleichend auch auf zylindrisch langgestreckte Rauigkeitselemente à la Sandfisch anzuwenden.

Drückt eine elastische Kugel oder ein elastischer Zylinder mit dem Radius  $r$  auf einen elastischen Halbraum, so entsteht bei einer Eindringtiefe  $w$  ( $w \ll r$ ) geometrisch bedingt ein Kontaktgebiet mit dem Radius bzw. der halben Breite (*Bild 34*):



$$a_{Kugel} = \sqrt{w r_{Kugel}} \quad a_{Zylinder} = \sqrt{w r_{Zylinder}}$$

*Bild 34.*

*Eine elastische Kugel bzw. ein elastischer Kreiszylinder delt eine elastische Ebene ein.*

Heinrich Hertz hat für die zugehörigen Kräfte die Formeln abgeleitet:

$$F_{Kugel} = \frac{4}{3} E^* r_{Kugel}^{1/2} w_{Kugel}^{3/2} \quad F_{Zylinder} = \frac{\pi}{4} E^* l w_{Zylinder} \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

$$a_{Kugel} = \left( \frac{3 F r_{Kugel}}{4 E^*} \right)^{1/3} \quad a_{Zylinder} = 2 \left( \frac{F r_{Zylinder}}{\pi E^* l} \right)^{1/2} \quad l = \text{Länge des Zylinders}$$

Für die maximalen Druckkräfte gelten nach Hertz die Formeln:

$$\hat{p}_{Kugel} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{6 E^* F}{r_{Kugel}^2} \right)^{1/3} \quad \hat{p}_{Zylinder} = \left( \frac{E^* F}{l r_{Zylinder}} \right)^{1/2}$$

Die Druckkräfte müssen durch Druckspannungen im Material aufgefangen werden. Diese Druckspannungen dürfen die Fließgrenze des Materials nicht überschreiten. Fließen führt zu einer dauerhaften Verformung des Materials. Dies ist an einer Sandfischschuppe nicht zu beobachten. Wir setzen:

$$\hat{p}_{Kugel} = \hat{p}_{Zylinder} = \sigma_{zul}$$

Die Idee ist, eine Reibfläche (Sandfischoberfläche) zu studieren, in die einmal Kugel-Asperiten und einmal Zylinder-Asperiten eingebettet sind (*Bild 35*). Dabei werden zwei die Rechnung stark vereinfachende Annahmen getroffen: Das Modellsandkorn ist vollkommen eben (a), und die Einbettungsoberfläche (b) ist vollkommen eben. Es ist  $F$  die vom Sandkorn ausgeübte Druckkraft auf die Einbettungs-Oberfläche. Diese Normalkraft verteilt sich gleichmäßig auf  $z_{Kugel}$ -Asperiten beziehungsweise auf  $z_{Zylinder}$ -Asperiten.

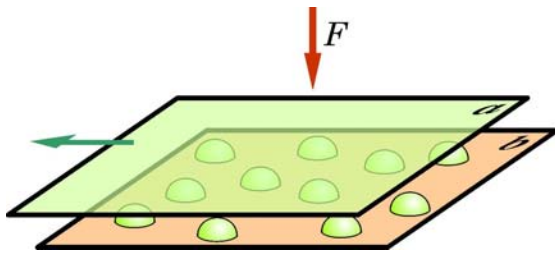


Bild 35a. Kugel-Asperiten.

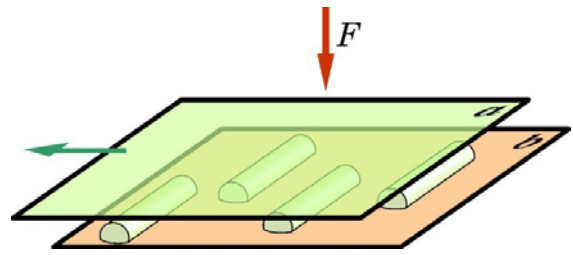


Bild 35b. Zylinder-Asperiten.

Wir berechnen die durch das Eindringen dieser Erhebungen (Asperiten) sich bildende Reibfläche, wenn in beiden Fällen  $\sigma_{zul} = \sigma_{fließ}$  nicht überschritten werden darf:

$$A_{Kugel} = z_{Kugel} \pi a_{Kugel}^2 = z_{Kugel} \pi \left( \frac{3 r_{Kugel} F / z_{Kugel}}{4 E^*} \right)^{2/3} = \frac{3}{2} \frac{F}{\sigma_{zul}}$$

$$A_{Zylinder} = z_{Zylinder} 2 a_{Zylinder} l = z_{Zylinder} 4 \left( \frac{r_{Zylinder} l F / z_{Zylinder}}{\pi E^*} \right)^{1/2} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{F}{\sigma_{zul}}$$

$$\frac{A_{Zylinderbettung}}{A_{Kugelbettung}} = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} = 1,505$$

Das Ergebnis wird besonders aussagekräftig, weil sich die geometrischen Größen bei der Quotientenbildung herauskürzen, und so nur noch ein Faktor (1,505) übrig bleibt. Es wurde eigentlich erwartet, dass durch eine behinderte Querverformung in Zylinderlängsachse die Zylinder-Asperiten zu einer kleineren und nicht zu einer 1,5-fach größeren Reibfläche führen. Das häufig vorgebrachte Argument, die Schwellenstruktur auf der Sandfischschuppe sei ein Trick zur Verminderung der wahren Reibfläche stimmt deshalb nicht. Eine natürliche Rauigkeit (Kugel-Asperiten) wäre besser. Die postulierte Funktion der Schwellen als Abstreifkamm für Schleifpartikel wird durch das theoretische Resultat gestärkt.

## Verwertungsplan des Sandfischeffekts

Die heutige Produktion von Gebrauchsgütern folgt dem Trend: „Weg vom Volumen - hin zur Oberfläche“ (Philosophie der Nanotechnologie). Während das Volumen weiterhin Grundeigenschaften und Formgebung des Produkts vorgibt, bestimmt die Oberfläche Haptik, Farbe, Glanz, Abnutzung, Leitfähigkeit, Benetzung und andere äußere Eigenschaften, die den Charakter moderner Gebrauchsgüter prägen. Der angewandte Sandfischeffekt erweitert die Möglichkeiten, funktionelle Oberflächen zu gestalten. Der Sandfischeffekt ist im übertragenen Sinn ein trockener Lotuseffekt, der wie dieser zu neuen unerwarteten Anwendungen führen kann:

Ein Auszug aus der E-Mail eines Architekten: „Wir planen im Augenblick in Qatar / Doha eine Serie von Bahnhöfen. Da es dort sehr windig ist und in der Luft große Mengen Sand bewegt werden, suchen wir nach Möglichkeiten, wie man die Oberfläche der Gebäude einfach reinigen kann oder am besten gar kein Sand dort haften bleibt ...“ Ein gleichermaßen exotisches Anwendungsfeld des Sandfischeffekts betrifft Raumfahrtmissionen, bei denen das langzeitige Ansetzen von kosmischem Staub (insbesondere Mond- oder Marsstaub) zu vermeiden ist. Hier könnte vor allem die postulierte elektrische Entladungsfunktion der Nanospikes auf den Mikroschwellen der Wüstenreptilien richtungsweisend sein.

Das Prinzip des Mikro-Abstreifkamms nach dem Vorbild der Wüstenreptilien ist in der Tribologie überall dort einsetzbar, wo Schleifpartikel zwischen Grund- und Gegenkörper zum Verschleiß führen. Ein Paradebeispiel ist der Fußbodenbelag, dessen Abrieb vornehmlich durch Schmirgelpartikel zwischen Belag und Schuhsohle erfolgt. Ein weiteres Kapitel ist die Nutzung des Sandfischeffekts für die innere Auskleidung von Kanälen für den Feststofftransport, um deren Verstopfen zu vorbeugen. Es gilt, das Festsetzen einzelner Partikel, die den Keim für ein Clusterwachstum bilden, zu vermeiden. Hier ist die Problemlage fast deckungsgleich mit der des Sandfischs in seiner Umwelt. Schmirgelnder Verschleiß verringert die Standfestigkeit und damit die Betriebsdauer von landwirtschaftlichen Maschinen, von Geräten in der Kohle- und Abraumförderung sowie von Granulierungsapparaten und Sinteranlagen. Eine Oberflächenveredelung à la Sandfischschuppe käme auch hier infrage. Möglicherweise könnte ein bionischer Mikro-Abstreifkamm sogar die Standfestigkeit von Steinbohrern erhöhen.

Der Sandfischeffekt zur Reibungsverminderung ist dann angesagt, wenn zwischen den reibenden Kontaktflächen kein Schmiermittel verwendet werden kann oder soll. Nicht verwendet werden kann ein flüssiges Schmiermittel bei einem Sandboard, ein Sportgerät, dessen Leistungsprofil mit dem des Sandfischs nahezu übereinstimmt. Auch nicht verwendet werden kann ein flüssiges Schmiermittel bei offenen Lagerkonstruktionen in der Raumfahrttechnik. Das klemmende Sonnensegel im Orbit ist ja schon Legende. Möglichst nicht verwendet werden soll ein geschmiertes Lager bei vielen Geräten in der Lebensmitteltechnik. Vorausgesetzt, der Sandfischeffekt kann wirtschaftlich realisiert werden: Es stünde ein neues Prinzip zur Verfügung, um eine effektive wartungsfreie Trockenschmierung zu verwirklichen. So könnte, um ein letztes Beispiel zu nennen, der Sandfischeffekt eine neue Generation besonders leichtgängiger Pneumatikzylinder hervorbringen.

Nach Angaben des Bundesministeriums für Forschung und Technologie verschlingen Reibung und Verschleiß in der Bundesrepublik Deutschland etwa 4,5 % des Bruttosozialprodukts. Damit beantwortet sich pauschal die Frage nach dem Anwendungspotenzial reibungs- und verschleißmindernder Techniken, hier des Sandfischeffekts.



## Zukunft des Sandfischeffekts

Es gibt verheißungsvolle Erfindungen, die dennoch lange Zeit keine Anwendung erfahren. Der Plasmabildschirm wurde 1964 erfunden, aber erst 1997 gab es den ersten Plasmafernseher der Firma Pioneer zu kaufen. Die winzigen Lichtkammerpixel ließen sich zuvor nicht wirtschaftlich fertigen. Ähnliches gilt für den Lotuseffekt. Kein käufliches Produkt weist die hierarchische Mikro/Nano-Struktur der Lotusblattoberfläche auf. Der Lotuseffekt-Löffel, an dem der Honig spurlos abfließt, bleibt ein fertigungstechnisches Unikum.

Gleiches gilt nun für den Sandfischeffekt. Das erste vom Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (*FhG-IZM*) gefertigte grobe Sandfischimitat ist nur einen Quadratzentimeter groß. Die angewandte lithografische Technik verhinderte zudem, die geometrische Form des Originals genau zu reproduzieren (z. B. die in der REM-Aufnahme sichtbare Hinterschneidung der geneigten Schwellengrate). Neben der Form der Mikroschwellen bestimmen die Materialeigenschaften entscheidend das Funktionieren des Sandfischeffekts. Die Schwellenoberkanten müssen den Scherkräften der über sie hinweg gleitenden Sandkörner widerstehen, das heißt, sie müssen nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand gehärtet sein. Ferner muss die Oberfläche zwischen den Schwellen eine niedrige Oberflächenenergie aufweisen, um antiadhäsiv zu sein. Das Haftenbleiben einzelner Mikropartikel, die den Keim für ein Clusterwachstum bilden, muss vermieden werden. Quintessenz: Allein die genaue Modellierung der Geometrie der Mikrostruktur der Sandfischschuppe genügt nicht, um ein technisches Produkt mit der Eigenschaft des biologischen Originals zu schaffen. Die angewandte Forschung muss Schritt für Schritt daran gehen, die funktionellen Details der Schuppenornamentation des Sandfischs technisch zu modellieren, und das nicht im Quadratzentimeter-Maßstab, sondern im Quadratmeter-Bereich. Bei der beschleunigten Weiterentwicklung der Mikro- und Nanotechnologie ist zu erwarten, dass die Fertigungstechniken bald zu Verfügung stehen werden, um das oben zusammengefasste „Pflichtenheft“ zu erfüllen.

Zukünftige Forschung zur Bionik des Sandfischeffekts sollte sich der Funktion der Nanospikes auf den Rückenschwellen der Sandfischschuppe zuwenden. Bestätigt sich die „Blitzableiter-Hypothese“, nämlich dass an den Nanospitzen elektrisch geladene Staubteilchen neutralisiert werden, wäre auch dieses Phänomen im Sinne der Bionik nachahmenswert. Denn wenn Wüstenstaub auf eine Sandfischschuppe herabschwebt, dann ist das nicht viel anders, als wenn Hausstaub sich auf einem Möbelstück niederschlägt. Beide Male sind es elektrostatische Anziehungskräfte, die den Staub anziehen. Eine Oberfläche mit Entladungsspitzen, gepaart mit einer antiadhäsiven Oberfläche zwischen den Spikes, würde den Staub nicht mehr elektrisch anhaften lassen. Schon ein kleiner Luftzug könnte die nicht locker aufliegenden Staubpartikel wieder von der Oberfläche abtragen.

## Literatur

- [1] Werner Baumgartner et al. The Sandfish's Skin: Morphology, Chemistry and Reconstruction. *Journal of Bionic Engineering* 4 (2007), 1-9.
- [2] Valentin L. Popov. *Kontaktmechanik und Reibung*. Springer, Berlin 2009.