

Der Sandskink der Sahara – Vorbild für Reibungs- und Verschleißminderung

Einleitung: Schuppen von Schlangen und Echsen weisen oft wundersame Oberflächenstrukturen auf, von Biologen Mikro-Ornamentation genannt. Die Erklärung der Funktion dieser ornamentalen Muster reicht von der These der erleichterten Häutung bis zur Erzeugung von schillernden Lichtreflexionen. Vorliegend wird die These aufgestellt, dass die gezackten Nanograte auf den Schuppen des Sandskinks der Sahara (*scincus scincus*) sowie der Kenianischen Sandboa (*Eryx c. loveridgei*) der Reibungs- und Verschleißminderung dienen (beide Reptilien beherrschen die Kunst des Schwimmens unter dem Sand). Diese Interpretation erscheint zunächst wenig plausibel (seit wann vermindern Spikes die Reibung?). Deshalb wird im Bild 1 eine neuste Entwicklung der Nanotechnologie der Sandskink-Schuppenstruktur im Bild 2 gegenübergestellt. Es handelt sich hier nicht um eine äußerliche Ähnlichkeit, sondern die Spitzenstruktur aus ultrananokristallinem Diamant (UNCD) erweist sich als extrem reibungsarm und extrem abriebfest. Hinzu kommt die Fähigkeit der kalten Feldemission, die auch beim Sandskink eine Rolle spielt.

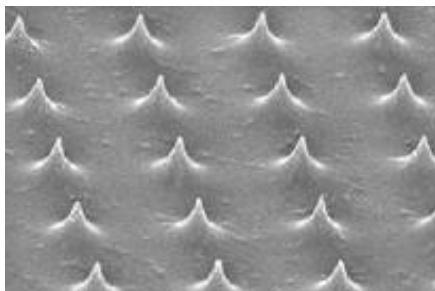


Bild 1: Nanofilm von Advanced Diamond Technologies mit DLC-Nanotip-Array.
Abstand der Nanospitzen: 10 µm
Durchmesser der Nanospitzen: 50 nm

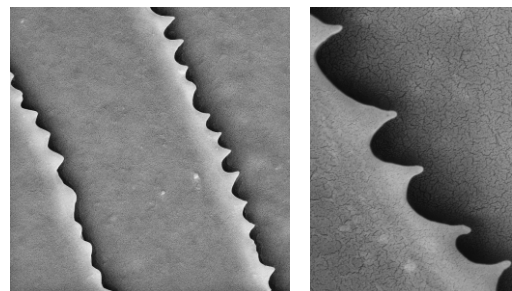


Bild 2: Häutungsstückchen eines Sandskinks mit Mikrograten und Nanozacken.
Abstand der Nanograte: 6 µm
Durchmesser der Nanozackenspitzen: 40 nm



Bild 3: Der Sandskink der Sahara

Reibungs- und Abriebmessungen in der Sahara:

Leben im Sandstrahl, Schwimmen unter dem Sand – auf der Suche nach Nahrung legt der Sandskink (Bild 3) allmorgendlich, dem Abrieb des Sandes ausgesetzt, bis zu einem Kilometer zurück. Wird die Sandoberfläche zu heiß oder gilt es sich zu verbergen, kann er schlängelnd wie ein Fisch unter dem Dünensand schwimmen. Das

Wunder der Schuppenhaut: Sie bleibt glatt und hochgradig glänzend. Diesen visuellen Eindruck galt es objektiv-messtechnisch zu belegen. Auf den Sahara-Exkursionen 2000, 2002, 2003 und 2004 haben die Autoren Reibung und Abrieb an frisch getöteten Sandskinks

gemessen. Die Apparaturen für die raue Wüstenumgebung waren denkbar einfach konstruiert: Ein Sandstrahl nach dem Modell der Sanduhr (Bild 4a) bzw. ein mit Sand gefüllter Minizylinder (Bild 4b) gleiten auf einer schräg gestellten Testfläche abwärts. Die Neigung der Testfläche (Sandfischrücken, technisches Vergleichsmaterial) wird manuell solange verringert bis die Bewegung stoppt. Der Tangens dieses Winkels ist der Gleitreibungskoeffizient μ .

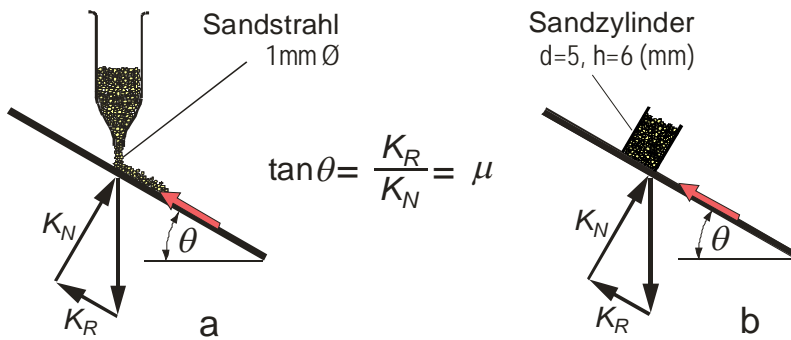


Bild 4: Eine einfache Reibungsmessung im Sahara-Feldversuch

Die Messungen bestätigen die Kernthese: Die Evolution hat an der Sandskinkhaut in punkto Energiesparen Entwicklungsarbeit geleistet. Polierter Stahl besitzt gegenüber der Sandskinkhaut im Fall der Granulatströmung 34% mehr Reibung (Bild 5a) und im Fall des vom Minizylinder umschlossenen Sandblocks sogar 58% mehr Reibung (Bild 5b).

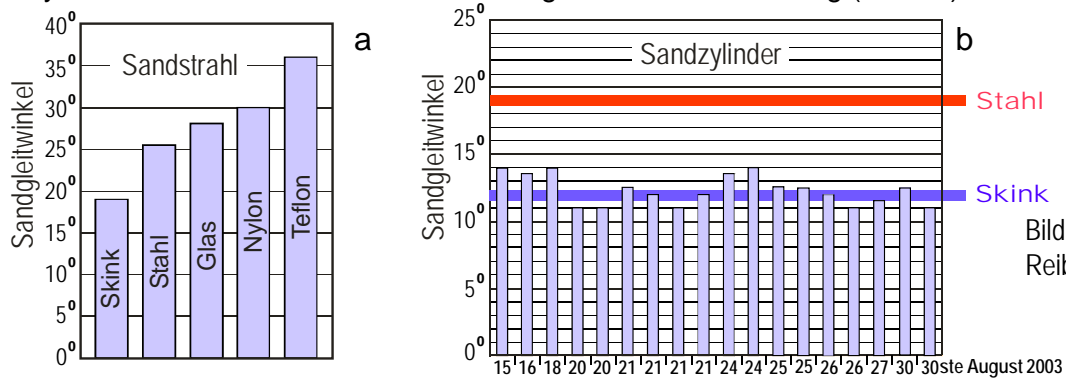


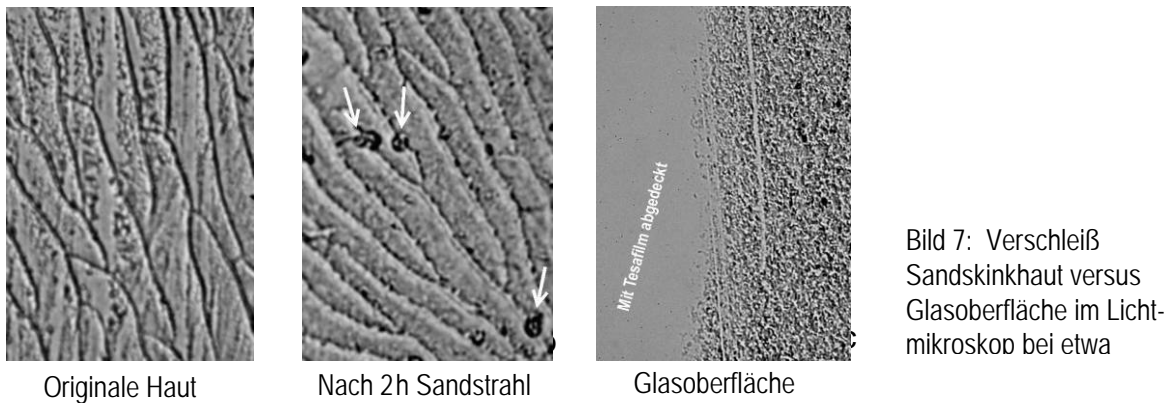
Bild 5: Vergleichende Reibungsmessungen

Für Abriebmessungen im Sahara-Feldversuch wurde wieder das Sanduhrprinzip angewendet. In einem Trichter befindet sich genügend Saharasand, um durch eine in die Tülle gesteckte Kanüle (1,5 mm Ø) 5 Stunden lang zu fließen. Nach 30 cm Fallhöhe trifft der Sandstrahl auf die Probe. Ein 10 Stunden währendes Sandkörnchen-Bombardement zeigte am Rücken des Sandskinks keine erkennbare Abnutzung (Bild 6a), während Stahl und Glas im Vergleich deutlich sichtbare Abriebflecke aufwiesen (Bild 6b).

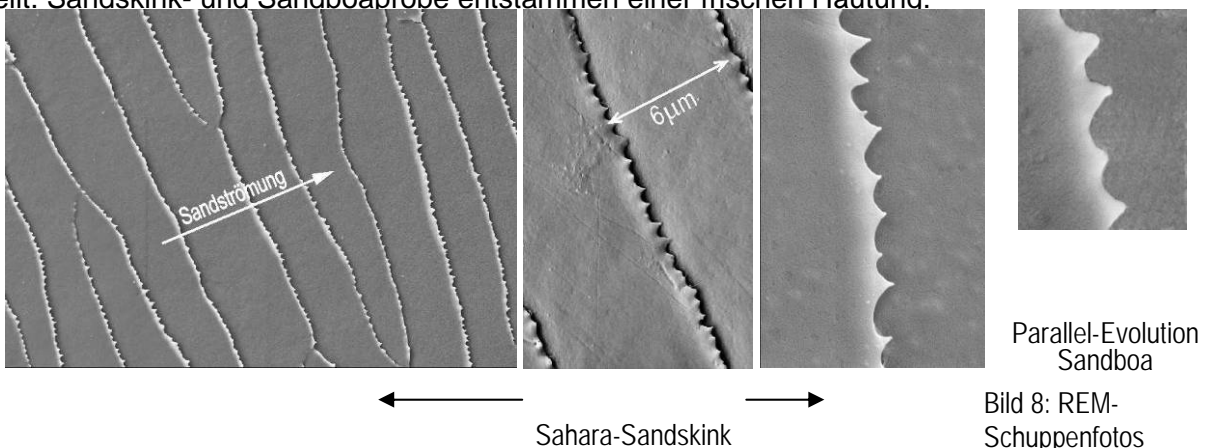


Bild 6: Abrieb Sandskink versus Stahl und Glas

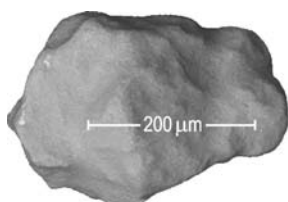
Abriebmessungen im Labor: Die visuelle Beurteilung des Abriebs auf der farblich variierenden Schuppenoberfläche ist unbefriedigend. Deshalb wurden die Abriebexperimente im Berliner Bionik-Labor wiederholt. Die zu erwartenden Abriebspuren sollten unter dem Lichtmikroskop fotografisch dokumentiert werden. Dazu wurde ein etwa 5mm^2 großes Hautstückchen von einem sich gehäuteten Sandskink mit Sekundenkleber auf einem Objektträger fixiert, im Lichtmikroskop fotografiert (Bild 7a), einem 2-stündigen Sandkörnchen-Bombardement (Höhe 25 cm) ausgesetzt und abermals im Lichtmikroskop fotografiert (Bild 7b). Es ist der Kleber, der die Körnigkeit zwischen den Mikrograten erzeugt. Ausschlaggebend ist, dass die Grat-Struktur der Sandskinkhaut lediglich an drei Stellen zerstört wird (Pfeile), während eine Glasoberfläche im vergleichenden Experiment total zerklüftet wird (Bild 7c).



Statik und Kinematik der Schuppenhaut: Es gilt zu erklären, weshalb die Sandskinkhaut die niedrige Gleitreibungszahl und die hohe Verschleißfestigkeit besitzt. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (Bild 8) wurden von M. Zwanzig, Fraunhofer IZM hergestellt. Sandskink- und Sandboaprobe entstammen einer frischen Häutung.



Aus Sicht der Reibung überrascht die quer zur Strömung gerippte und gezackte Oberfläche. Betrachten wir die Größenverhältnisse: Der Abstand der Quergrate beträgt beim Sandskink und bei der Sandboa etwa $6\mu\text{m}$ und die Spikes sind im Mittel 400nm voneinander entfernt.



Ein Sahara-Sandkorn von $250\ \mu\text{m}$ \varnothing würde so rund 20000 Spikes berühren – eine ebene Grundfläche vorausgesetzt. Mit einem Spitzen \varnothing der Spikes von 40 nm ergibt sich eine Kontaktflächenreduktion von 1 zu 2000 – gut für kleine Adhäsionsreibung. Unebenheit des Sandkorns könnte die effektive Kontaktfläche gar auf ein 2 Millionstel reduzieren. Das Problem: Die Pressung an den Kontaktstellen übersteigt die Bruchspannung und die Spikes werden zerstört. Hier kommt die Statik der Grate zum Tragen, die von uns – nach dem Modell der Bodenmechanik – als „auf einem elastischen Halbraum gebetteter Biegeträger“ behandelt wird. Das Ergebnis: Eine Unebenheit drückt den Halbraum nicht lokal ein (Bild 9a), sondern eine konvex gewölbte Gegenfläche wird (eindimensional) weitläufig umfasst (Bild 9b). Die Last verteilt sich auf mehr Nano-Spitzen, wodurch sich die Verschleißfestigkeit erhöht.

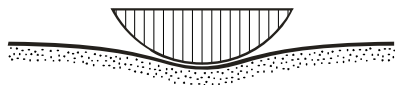


Bild 9a: Eindruckdelle elastischer Halbraum

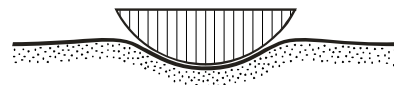


Bild 9b: Balkenbiegung elastischer Halbraum

Elektrische Eigenschaften der Sandskinkhaut: Im Sandwind in der Sahara entreißen kleinste Sand- oder Tonpartikel den gröberen Sandkörnern negative Ladung. Die mit Staub beladene Atmosphäre lädt sich (insbesondere im Sandsturm) gegenüber dem Boden negativ auf. Eine Aufladung der Sandskinkhaut ließ sich mit einem speziellen Versuchsaufbau in der Sahara durch Sandberieselung auch künstlich erzeugen (Bild 10).

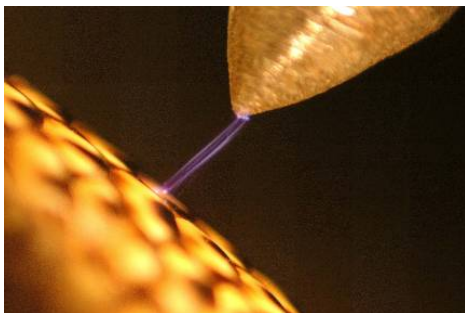


Bild 10: Schubweise elektrische Entladung einer Sandskinkhaut während der Sandberieselung der schräg gestellten Grundplatte mit darauf fixiertem Sandskink. (Nachtaufnahme, Öffnungszeit der Kamera 20 s).

Die elektrostatische Aufladung der Sandskinkhaut erhöht drastisch die Reibung. Wir vermuten, dass die Nano-Spikes als Ladungs-Abstreifkämme wirken. Eine rasterelektronenmikroskopische Röntgen-Mikroanalyse hat in den Nano-Spikes Spuren von Silizium aufgezeigt. Diamantspitzen, Siliziumspitzen und Kohlenstoffnanoröhren sind die heute diskutierten kalten Elektronenemitter. Ein weiteres Indiz für die forcierte Elektronenabgabe ist die Beobachtung, dass bei einer unbesputterten Sandskinkhaut im REM-Rückstreubild zuerst die Konturen der Nano-Gratfirste sichtbar werden. Es muss aber eingeräumt werden, dass die postulierte elektrische Funktion der Sandskinkhaut in vielen Punkten noch undurchsichtig ist.

Technische Anwendungspotenziale: Kunststoff-Pneumatikzylinder mit „zirkumferenten“ Nanograten – Wellen für Trockenlager mit longitudinalen Nanograten – Gleitringdichtungen im Motorenbau – Gleitbettkonstruktionen in der Fördertechnik – Ungeschmierte Lineargleitführungen im Maschinenbau – Gleitflächen für Sandboards – Abriebfeste Touchscreens –

Abriebfeste recycelbare Plastikflaschen – Nanostrukturierte abriebresistente Lacke – Innovative Entwicklung kalter feldemittierender Strukturen und Materialien – Antistatik-Belag für Marsmobil-Räder – Elektronen-Emissions-Antriebe für Mikro-Air-Vehikel (MAV).

Partner im Sandkink-Projekt: Firma Festo & Co. AG, Dr. Stoll (Stuttgart) – Unternehmensgruppe Freudenberg, Dr. Barth (Weinheim) – Surface Specialities Germany GmbH & Co. KG, Dr. Wonner (Wiesbaden) – Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Prof. Reichl (Berlin) – Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Dr. Gombert (Freiburg) – Max-Planck-Institut für Metallforschung, Dr. Gorb (Stuttgart) – Institut für Werkstoffwissenschaften und -technologien, FG Keramische Werkstoffe, Prof. Schubert (Berlin) – Zentralinstitut für Elektronenmikroskopie, Dr. Nissen (TU Berlin) – Institut für Mechanik, Prof. Duda (TU Berlin) – Universität des Saarlandes, Frau Dr. Kiefer, Dr. Warnke (Saarbrücken).