



Skifahren auf Sand

Matthias Scherge

ARTIKELINFORMATION

Stichworte:

Ski
Skipräparation
Sand

KURZFASSUNG

Skifahren auf Sand erfreut sich immer größer werdender Beliebtheit, obwohl Sand nicht gerade ein geeigneter Untergrund ist. Der Beitrag zeigt auf, was Sand zum Gleitmedium macht und spannt den Bogen von den physikalischen Grundlagen über Langlauf bis zum Alpinsport. Weiterhin wird ein Bezug zur Biomechanik und zur Skipräparation hergestellt und Ratschläge für optimales Gleiten gegeben.

© Team Snowstorm

1. Einführung

Sand ist neben Streusalz das weitverbreitetste Mittel zum Abstumpfen glatter Schnee- und Eisflächen. Daher verwundert es zunächst, dass es immer wieder Versuche gibt, auf Sand Ski zu fahren. Die Tageszeitung *DIE ZEIT* berichtete 2014 über Langlaufübungen an der polnischen Ostseeküste [1]. Diese Übungen hatten eher touristischen Hintergrund und die Dynamik war vernachlässigbar. Schon deutlich schneller ging es bei Touren in der Namibwüste, wo Henrik May den Weltrekord im Dünenabfahrtski mit 92,12 km/h hält [2]. Ebenfalls erwähnenswert ist das Sandskifahren am Monte Kaolino. Auf der 200 m hohen Abraumhalde mit einer Neigung von ca. 30° geht es sowohl mit Alpinski als auch Snowboards bergab und das sehr elegant.



Bild 1: Boarding auf Sand (Kangaroo Island, Australien).

Wie kann es also sein, dass man auf einer extrem stumpfen Unterlage gleiten kann?

2. Sand und Ski

2.1 Sand

Sand ist von seiner Zusammensetzung her hauptsächlich kristallines Siliciumdioxid (SiO_2). Silicium ist mit 28% das häufigste Element in der Erdkruste. Je nach Fundort liegen die Sandkörner entweder kugelförmig oder eckig vor. Bild 2 zeigt Sande aus oben genannten Orten und vergleicht sie mit Normsand, wie er z.B. beim Sandstrahlen benutzt wird. Während Sand von Abraumhalden, wie dem Monte Kaolino, oder von Stränden in der Regel eckig ist, liegt Wüstensand in kugliger Form vor, welcher ihn als Baustoff ausscheiden lässt, da die Körner wenig Potenzial zum Verhaken bieten.

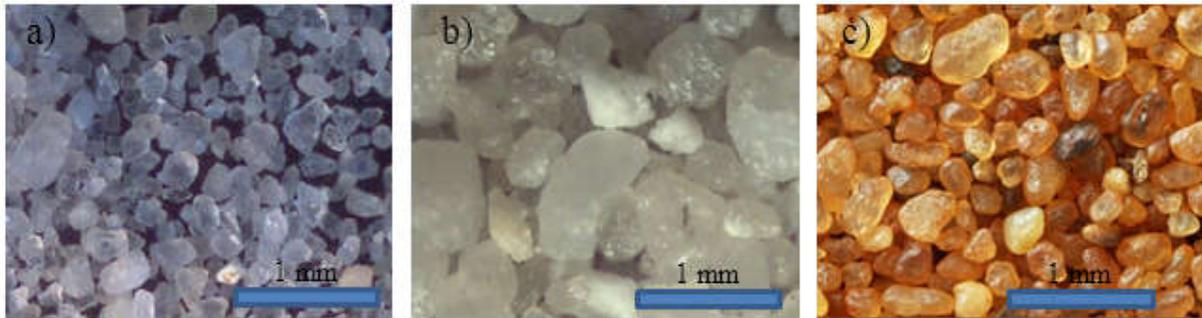


Bild 2: Verschiedene Sande. a) Normsand [siehe Anhang]; b) Sand vom Monte Kaolino; c) Sand aus der Namibwüste.

Sand ist in trockenem Zustand lose und zeigt keinen Zusammenhalt zwischen den einzelnen Körnern. Bei Vorhandensein von Feuchtigkeit kleben die Körner auf Grund von Kapillarkräften zusammen. Bei Nässe verlieren die Kapillarkräfte allerdings ihre Wirkung und Sand beginnt zu fließen. Mit der einfachen Gleichung $F_{\text{kap}} = 4\pi\gamma R$ kann die Kraft zwischen 2 runden Sandkörnern berechnet werden. γ ist hierbei die Oberflächenenergie von Wasser (71 mN/m) und R der Radius des Sandkorns. Mit einem angenommenen Radius vom 1 mm erhält man eine Kapillarkraft von ca. 700 μN , welche etwa sieben Mal so groß ist wie die Erdanziehungskraft, die auf ein Sandkorn wirkt. Dieses Verhältnis macht plausibel, warum Sandburgen ihre Form so gut halten.



Bild 3: Reibungsmessung auf geneigter Ebene, basierend auf einer Idee von Ingo Rechenberg [3].

Zur Bestimmung der Haftreibung wurde ein Ring (Höhe = 4 mm, Durchmesser = 7 mm) mit Normsand sowie den Sanden vom Monte Kaolino sowie aus Swakopmund, Namibia gefüllt und auf Skibelag aus ultrahochmolekularem Polyethylen (UHMWPE) gestellt. Danach wurde der Skibelag entgegen dem Uhrzeigersinn verkippt, bis Gleiten einsetzte, siehe Bild 3. Der Tangens des so bestimmten Winkels entspricht der Haftreibung. Zuvor wurde die Haftreibung des Rings ohne Sandfüllung bestimmt. Tabelle 1 zeigt die Reibungswerte. Zum Vergleich: Ein rutscharmer Fußboden bietet einer Gummischuhsohle einen Reibungskoeffizienten von ca. 0,5. Ein sehr gut präparierter Ski kann einen Reibungskoeffizienten von 0,02 erreichen.

Tabelle 1: Reibungskoeffizienten.

Reibkörper	Ring (leer)	Normsand	Monte Kaolino	Namib
Haftreibung	0,19	0,4	0,34	0,25

2.2 Ski

Bei den verwendeten Ski kommen Standardbeläge aus Polyethylen aber auch härtere Materialien wie z.B. Formica oder PVC zum Einsatz. Formica ist ein Kompositwerkstoff, der aus mehreren Lagen Kraftpapier, einer Papiersorte höchster Festigkeit, und Melaminharz besteht. Durch Wärmebehandlung wird das Material fest, hitze- und abriebbeständig. Auffallend ist, dass es sich in allen 3 Fällen um Kunststoffe handelt. Der Vorteil von weichem Kunststoff gegenüber z.B. Stahl wird im nächsten Kapitel besprochen. Die Laufsohle wird zudem mit Wachs behandelt, obwohl bei trockenem Sand kein Wasser zum Fernhalten wie im Schnee vorhanden ist.



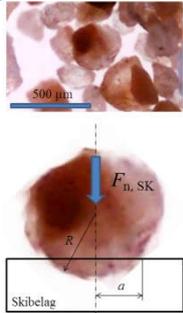
Bild 4: Links: Skifahrer am Monte Kaolino. Rechts: Strandskifahren.

3. Reibungseffekte

3.1 Betrachtungen auf der Mikroskala

Zur mikroskopischen Analyse der Reibung reicht es, wenn man sich zunächst auf den Kontakt von einem einzelnen Sandkorn mit dem Belag konzentriert. Auf dieser Ebene wird die Reibung durch das Gesetz von Bowden und Tabor [4] beschrieben: $F_r = \tau A$. Die Größe A beschreibt die Kontaktfläche die entsteht, wenn das Sandkorn auf den Skibelag drückt. τ kennzeichnet den mikroskopischen Widerstand beim Gleiten. Veranschaulichen kann man sich das wissenschaftliche Konzept, indem man eine Fingerkuppe auf die Schreibtischplatte auflegt und nach vorn schiebt. Zuerst fühlt man wie druckabhängig die Kontaktfläche A entsteht. Der Scherwiderstand hängt entscheidend davon ab, ob der Kontakt trocken oder mit einem Flüssigkeitsfilm (z.B. Schweiß) bedeckt ist. Folgt man dem wissenschaftlichen Konzept weiter, so entsteht geringe Reibung, wenn sowohl τ als auch A klein sind. Hier kommt es aber zu einem Zielkonflikt. Kleine Kontaktfläche kann durch Wahl eines Materials mit großem Elastizitätsmodul E erreicht werden. Der Modul beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei elastischer Verformung eines festen Körpers. Der E -Modul, der die Steigung der Kurve im Spannungs-Dehnungsdiagramm repräsentiert, darf nicht mit der Härte verwechselt werden, denn diese charakterisiert die Fließgrenze, bei welcher plastische Verformung einsetzt. Beide Größen haben also nur bedingt etwas miteinander zu tun, was bei der Auswahl geeigneter Belagsmaterialien beachtet werden muss. Zum Beispiel würde eine Lauffläche aus Stahl [5] mit ihrem großen Elastizitätsmodul zu einer kleinen Kontaktfläche führen. Da der Gleitkontakt zwischen Sandkorn und Stahl aber abrasiv erfolgt, ist der Scherwiderstand τ groß, da das Sandkorn beim Pflügen durch die Stahloberfläche einen großen Widerstand spürt. Unter Abrasion versteht man das Furchen eines weicheren Körpers durch einen harten Gegenkörper, z.B. Skibelag und Sandkorn. Der Abrasionswiderstand hängt von der sich bildenden Kontaktfläche aber auch von der Kornform ab. So führen eckige Körner zu deutlich größerer Reibung als runde [6].

Tabelle 2: Vergleich der Kontaktflächen.



Sandkorn (SiO_2), $R = 125 \mu\text{m}$, $E = 70 \text{ GPa}$		
	Skibelagsmaterial	
	Stahl	Polyethylen (UHMWPE)
E -Modul [GPa]	210	1
a [μm]	1	3
Fläche pro Korn [μm^2]	3	30
Gesamtkontaktfläche [mm^2]	4,4	44

Im Kontrast dazu wäre beim Kontakt des Sandkorns mit Polyethylen die Kontaktfläche deutlich größer, jedoch der Scherwiderstand kleiner. Tabelle 2 analysiert das Eindringen eines Sandkorns in Stahl bzw. Polyethylen. Der Elastizitätsmodul von Stahl ist ca. 200 Mal größer als der von Polyethylen. Die Berechnung der entstehenden Kontaktfläche erfolgte auf Basis der Kontakttheorie von Heinrich Hertz, deren Grundlagen bereits 1881 gelegt wurden [7]. Die Theorie basiert auf den Annahmen ideal elastischer Verformung, kleinen Deformationen und vernachlässigbarer Adhäsion. Die Berechnungsgleichung für die Kontaktfläche verarbeitet den Radius der eindringenden Kugel (hier das Sandkorn), die Elastizitätsmoduln von SiO_2 , Stahl bzw. Polyethylen sowie die auf das Sandkorn senkrecht wirkende Kraft $F_{n,SK}$. Diese Kraft kann man berechnen indem man annimmt, dass der Langlaufski ($1,8 \text{ m} \times 0,05 \text{ m}$) auf dicht gepackten Sandkörnern ruht, die einen Radius von ca. $125 \mu\text{m}$ haben, siehe Bild in Tab. 2. Nach Division von Ski- und auf eine Ebene projizierter Sandkornfläche erhält man als Anzahl der Körner unter dem Ski 1,44 Millionen.

Steht nun ein Skifahrer mit einem Gewicht von 80 kg auf dem Sand, so übt er pro Ski eine Kraft von etwa 400 N aus (Kraft = Masse \times Gravitationskonstante). Diese Kraft wird nun geteilt durch die Anzahl der Körner und ergibt so die Kraft pro Korn von 0,28 mN. Mit dieser Kraft und den Angaben für den entsprechenden E -Modul sowie dem Kornradius R erhält man die Größe a , mit der die Kontaktfläche berechnet werden kann. Man erhält die Kontaktfläche pro Korn, die wiederum mit der Anzahl der Körner unter dem Ski multipliziert werden kann und die Gesamtkontaktfläche ergibt. Hier wird sichtbar, dass der Gleitvorgang auf weniger als einem Tausendstel der geometrischen Skifläche erfolgt. Diese Fläche wird nochmals kleiner, wenn der Ski geschliffen ist.

Wie so oft in der Tribologie muss für die Reibung ein Optimum gefunden werden. Gutes Gleiten kann in der Kombination von großem Elastizitätsmodul und geringem Scherwiderstand erzielt werden. An dieser Stelle kommt das Wachs als Deckschicht ins Spiel. Mittels dünner Paraffinschicht kann τ deutlich verringert werden, ohne dass – wie bei einem weichen Polymer – die Kontaktfläche zu groß wird.

3.2 Betrachtungen auf der Makroskala

Neben den oben genannten mikroskopischen Effekten der Kontaktfläche und der Scherung, gibt es einen weiteren wichtigen Einfluss auf größerer Skala, die Hydrodynamik. Während der Kontakt von Ski mit trockenem Sand zu wenig Eleganz beim Gleiten führt, ändert sich die Lage drastisch, sobald das Skifahren auf einem Sand-Wasser Gemisch erfolgt. Das Wasser wird über Kapillarkräfte zwischen den Sandkörnern gehalten und verringert den Gleitwiderstand erheblich. Der durch Stribeck beschriebene Effekt wurde bereits in GLIDING 1(2017) behandelt [8]. Das Gleiten fällt leichter, je größer die Geschwindigkeit v ist. Es handelt sich also um einen selbstverstärkenden Effekt. Weiterhin gleitet man besser, wenn der Druck p auf den Ski verringert wird, d.h. wenn Skilänge und -breite zunehmen, siehe Bild 5.



Bild 5: Gleitwiderstand als Funktion der Geschwindigkeit sowie des Drucks.

Da das Wasser zwischen den Sandkörnern auch mit dem Skibelag Saugkräfte entwickelt, sollten die Ski gewachst werden, um ausreichend Hydrophobie zu entwickeln. Dabei ist darauf zu achten, dass das Wachs nicht zu dick aufgetragen wird, da es sonst zu Anhaftungen einzelner Sandkörner kommt. Es sollte also wie im Winter gewachst, abgezogen und gebürstet werden. Ein zweiter Effekt, den das Wachs mitbringt, ist die Verringerung des Scherwiderstands beim Gleiten. Die Wachsschicht kommt als allererstes mit Sand in Kontakt. Da diese Schicht dem eindringenden Sandkorn wenig Widerstand entgegensetzt, ist die Reibung klein. Die Haltbarkeit der Wachsschicht kann über die Wachshärte gesteuert werden. Auch Topschichten wie z.B. das Speedfinish in Form von Sprays oder Pasten sind wie auf Schnee wirksam, da diese Substanzen nur einen nanometerdünnen Hauch auf die Oberflächen zaubern. Dieser Hauch besteht in der Regel aus einem Molekül, welches mit einer polaren Kopfgruppe an die Oberfläche – hier der Skibelag – andockt und eine unpolare Endgruppe in Richtung Gegenkörper (Sand) streckt. Derartige Moleküle haben eine Größe von 2 bis 3 nm und verhalten sich wie eine Bürste, die auf einem Tisch gleitet, siehe Bild 6.

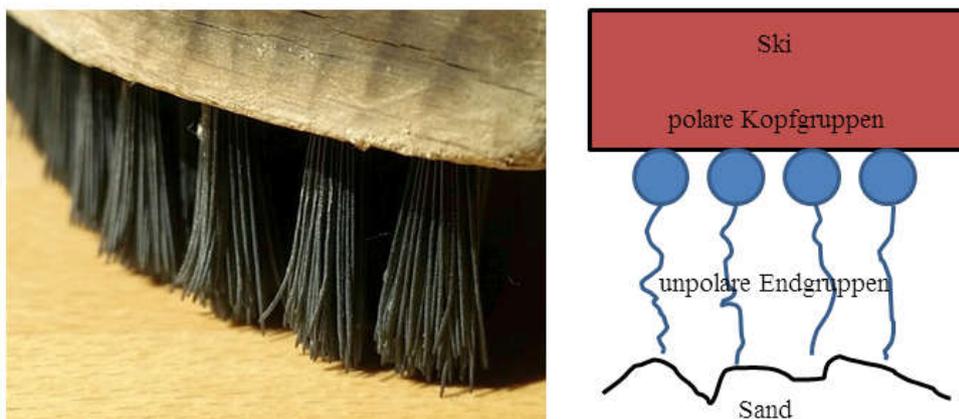


Bild 6: Bürstenartige Moleküle zur Reibungsverringernung.

Im Maschinenbau werden die in Bild 6 gezeigten Moleküle als Reibungsmodifizierer bezeichnet. Sie finden z.B. in nasslaufenden Doppelkupplungsgetrieben von modernen Fahrzeugen Einsatz und sollen dort den Schaltvorgang ruckfrei gestalten.

4. Reibung und Biomechanik

Da der Kontakt von Ski und Sand mit einem signifikanten Reibungskoeffizienten einher geht ($\mu_{\text{Sand}} \approx 0,2$; $\mu_{\text{Schnee}} \approx 0,02$) entwickelt sich eine Biomechanik beim Gleiten, bei der der Bewegungsablauf deutlich von dem auf Schnee abweicht. Zur Verringerung des trägheitsbedingten Vorschnellens des Oberkörpers als Reaktion auf die stoppende Wirkung des Sandes, wird der Körperschwerpunkt deutlich nach hinten verlagert.

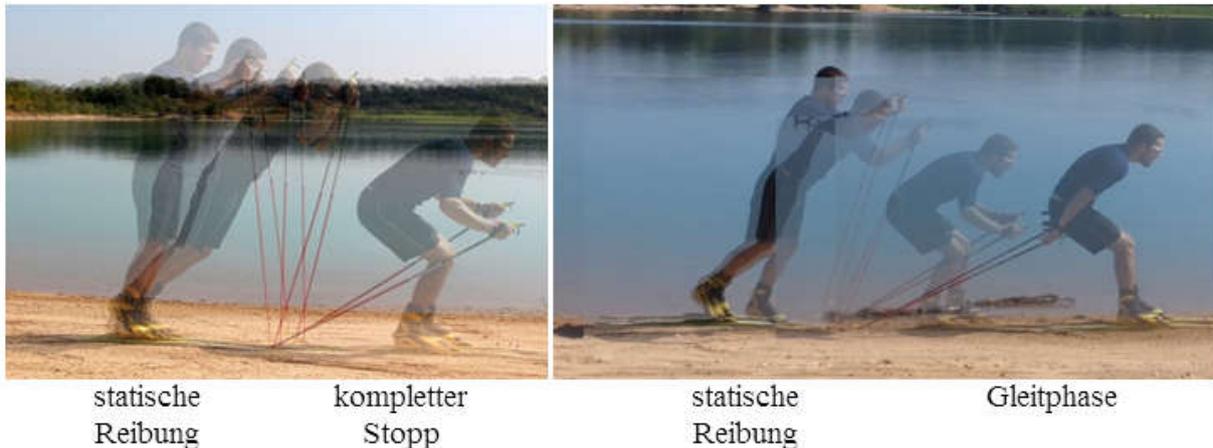


Bild 7: Langlaufstudien auf trockenem Sand (links) und nassem Sand (rechts).

Im linken Teil von Bild 7 sieht man einen Gleitversuch auf trockenem Sand. Das Überwinden der statischen Reibung (Haftreibung) bereitet deutlich Mühe. Durch den hohen Reibungskoeffizienten kommt es nicht zum Angleiten, sondern der Athlet springt nach vorn, bis er abrupt im Sand wieder zu einem vollständigen Stopp kommt. Im rechten Bild wurde der Sand gewässert, so dass der Übergang von statischer zu dynamischer Reibung einfacher erfolgt. Nach Überwindung der Haftreibung gleitet der Ski bis zum Stopp, dann erfolgt der nächste Doppelstockschub.

Eine ähnliche Biomechanik stellt man auch beim Alpinskifahren fest. Der Fahrstil hat Ähnlichkeiten mit dem im Tiefschnee. Der Körperschwerpunkt ist ebenfalls deutlich nach hinten verlagert, siehe Bild 4.

5. Zusammenfassung

Obwohl Sand das meistverbreitetste Abstumpfungsmittel im täglichen Leben und als Strahlmittel bekannt für seine gute Abtragsleistung ist, gibt es Wege und Möglichkeiten, auf ihm zu Gleiten. Ein erstes Rezept, um die Reibung zu verringern, ist der Übergang von Gleit- zu Rollreibung. Partiiell rollende Sandkörner findet man in der Wüste, denn im Gegensatz zur Halde sind dort die Körner rund. Rollreibung hat auch in der Technik – vergleiche Gleit- und Kugellager – einen um den Faktor 10 geringeren Reibungskoeffizient als die Gleitreibung. Zusätzlich zum Rollen hat der Sand aus der Namib eine deutlich geringere Korngröße als der Sand vom Monte Kaolino. Somit verteilt sich die Last auf mehr Körner, was zu einer kleineren Hertz'schen Kontaktfläche sowie zu geringerem Eindringen in den Skibelag führt. Je kleiner die Kontaktfläche und je geringer das Eindringen in, sowie das Pflügen des Sandkorns durch den Skibelag, desto kleiner die Reibung. Es wird schnell deutlich, dass hierbei ein rundes Korn geringeren Pflügewiderstand als ein eckiges Korn bewirkt.

Ein weiterer Weg, um Sand gleitfähig zu machen, ist die Wässerung. Hier ist allerdings Augenmaß gefragt, denn zu wenig Wasser erhöht die Kapillarkräfte, was die Reibung wieder ansteigen lässt. Zu viel Wasser hingegen, führt zum Abrutschen des Hangs. Mit dem richtigen Maß bildet sich ein Sand-Wasser-Gemisch, welches genügend Schmiermittel bereitstellt, um die Reibung deutlich zu verringern.

Bei beiden Strategien spielt der mikroskopische Scherwiderstand der Skibelagsoberfläche eine entscheidende Rolle. Dieser muss so gering wie möglich sein, aber gleichzeitig sehr gute Abriebfähigkeit sicherstellen. Eine Optimierungsmöglichkeit, die in diesem Artikel nicht besprochen wurde, ist der Skischliff mit dem sich die reale Kontaktfläche drastisch verringern und das Gleiten nochmals verbessern lässt.

Quellen

- [1] Tackmann, D., Langlauf am Strand, *Die Zeit*, 2014.
- [2] May, H., Wüstenskifahren - Ausstieg nach Namibia: Von einem, der auszog, die Freiheit zu finden, 2011.
- [3] Tribologie im Dünenand, Schlussbericht, BMBF-Förderkennzeichen: 0311967A, 2009.
- [4] Bowden, F.P., Tabor, D., The Friction and Lubrication of Solids, *New York: Oxford Univ. Press*, 1950.
- [5] Sacher, R., Weißflog, J., Winkler, R., Wilberg, R., Laufsohle für Wintersportgeräte und daraus aufgebaute Ski, Patent DE 199 09 598 A1, 2000.
- [6] Zum Gahr, K.-H., *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier, 1987.
- [7] Hertz, H., Über die Berührung fester elastischer Körper, *Journal für die reine und angewandte. Mathematik*, 92(1881), S. 156-171.
- [8] Scherge, M., Skischliffe falsch interpretiert, *GLIDING* 1(2017).

Danksagung: Vielen Dank an Dr. Reinhard Groß und Uwe Hanss für die Anregungen und Korrekturen! Ein sportlicher Dank gebührt Erik Blaner für die Gleitübungen am Eppelsee in Karlsruhe.

Ein weiterer Dank geht an Rolf Kretzschmar für die Bereitstellung von Fotos von Sandproben aus der Namibwüste. Henrik May und Wolfgang Schwarz von der SC Monte Kaolino GmbH danke ich für die Zusendung der Sandproben für die Reibungsmessung und die fruchtbare Diskussion!

Anhang: Daten zu Quarzsand Sorte L 75, Quarzwerk Baums GmbH & Co. KG

Mittlere Korngröße in mm:	0,18
Kornform	kantengerundet
Dichte	2,65 g/ml
Härte nach Mohs	7
Zusammensetzung	SiO ₂ 99% Al ₂ O ₃ 0,42% Fe ₂ O ₃ 0,07% TiO ₂ 0,08%