



# Gleiteffekte beim Skispringen im Sommer

Matthias Scherge

## ARTIKELINFORMATION

Stichworte: Schanze, Anlaufspur, Aufsprunghügel, Reibung

## KURZFASSUNG

Schanzen werden im Winter wie im Sommer betrieben. Daher existieren verschiedenartige Reibpartner, mit denen die Ski Kontakt machen, wie z.B. Schnee, Eis, Porzellan, diverse Kunststoffe sowie Gras. Alle genannten Stoffe ziehen eine breite Palette von Reibungskoeffizienten nach sich. Während in der Anlaufspur geringste Reibung gefragt ist, besteht im Aufsprunghügel die Forderung einer sicheren Landung, was einen gewissen Reibungswert zur Seitenführung erfordert. Während Schnee und Eis inhärent niedrige Reibung gegen Polyethylen aufweisen, müssen die anderen Materialien erst ertüchtigt werden, was einen tiefen Griff in den tribologischen Handwerkskasten erfordert. Dieser Beitrag berichtet über die physikalisch/chemischen Grundlagen niedriger Reibung und gibt technische Ratschläge für die Skipräparation.

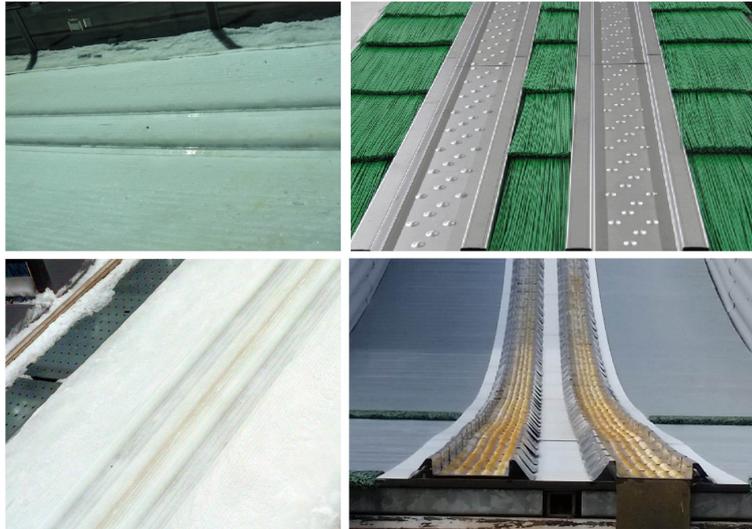
©Team Snowstorm

## 1 Einführung

Für Winter- und Sommerbetrieb existieren naturgemäß unterschiedliche Anlaufspuren. Im Winter findet man Spuren aus Schnee oder Eis, während im Rest des Jahres Spuren aus Metall oder Metall mit Gleitkörpern zum Einsatz kommen, siehe Bild 1. Da über das Gleitverhalten von Schnee und Eis bereits ausgiebig berichtet wurde (siehe z.B. [1]), soll sich hier auf Sommeranlaufspuren konzentriert werden. Ähnlich verhält es sich für den Aufsprunghügel, der im Winter mit Schnee bedeckt ist und im Sommer mit Matten, die die Reibung verringern sollen. Sowohl bei der Spur als auch im Aufsprunghügel muss die Reibung in Fahrtrichtung deutlich niedriger sein als quer dazu. Bei der Spur wird dem Rechnung getragen, indem die Bewegung quer zur Fahrtrichtung durch Seitenbegrenzungen nicht möglich ist. Im Aufsprunghügel muss die Beschaffenheit der Matten so beschaffen sein, dass ein Wegrutschen zur Seite schwerer möglich ist als in Fahrtrichtung. Umgesetzt wird diese Forderung durch die Struktur der Matten, die bei Kanteneinsatz einen gewissen Grad an Widerstand leisten.

## 2 Anlaufspuren

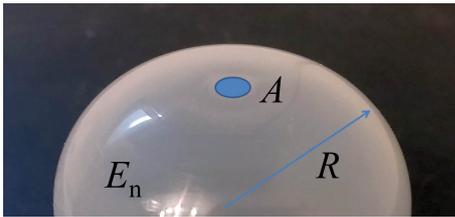
In einfachster Bauart findet man Spurrinnen aus Metall, in denen die Ski geführt werden. Zur Verringerung der Reibung werden diese Spuren mit Wasser gespült. Zur weiteren Reibungsreduktion erhalten die Spuren halbkugelförmige, teils abgeflachte Noppen. Als Noppenmaterial findet man Kunststoff (POM), Keramik oder Porzellan. Zum Teil wird auch durch Prägen die Metallsur so strukturiert, dass Noppen entstehen. Durch die Noppenstruktur werden gleichzeitig 3 tribologische Effekte angesprochen: Die Verringerung der realen Kontaktfläche, die Hydrodynamik und die Pflügewirkung. Alle 3 Effekte werden in den folgenden Abschnitten erläutert.



**Abb. 1:** Links oben: Schneespur. Links unten: Gefräste Eisspur. Rechts oben: Metallspur mit Noppen (mit Genehmigung von Conductio Oy). Rechts unten: Metallspur mit Keramiknoppen.

## 2.1 Verringerung der realen Kontaktfläche

Die Noppen verringern die Kontaktfläche zwischen Ski und Spur. Die Größe der mikroskopischen Kontaktfläche hängt von einer ganzen Reihe mechanischer Größen ab und wird mathematisch durch die Hertz'sche Kontaktmechanik beschrieben [2]. Die Fläche des Kontaktkreises  $A$  errechnet sich aus:



$$A = \frac{3}{4} \left( \frac{F_n R}{E^*} \right)^{2/3} \quad (1)$$

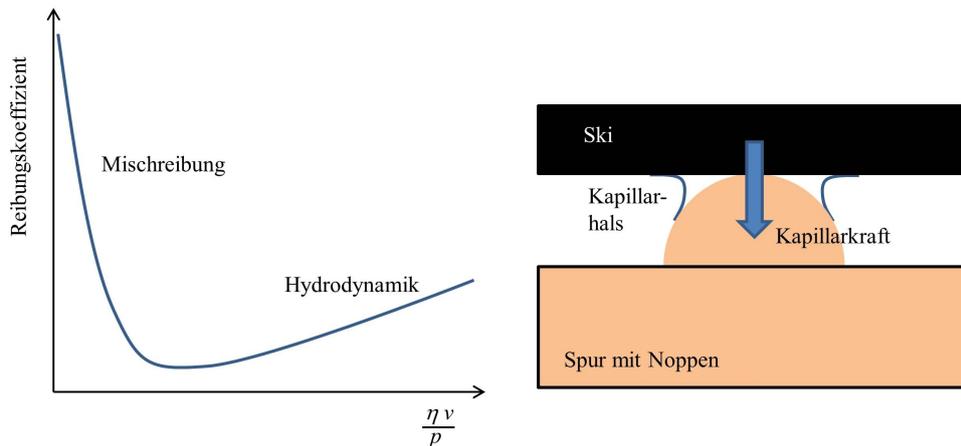
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \quad (2)$$

Hierbei sind  $F_n$  die Kraft pro Noppe,  $R$  der Radius der Noppe,  $E_n$  und  $E_s$  die Elastizitätsmoduln von Noppen und Skibelag.  $\nu_n$  und  $\nu_s$  sind die zugehörigen Poissonzahlen. Für den Fall des Kontakts einer einzigen Keramiknoppe mit dem Skibelag erhält man eine Kontaktfläche von  $0,78 \text{ mm}^2$ . Bezieht man alle Kontakte über die Skilänge ein (ca. 50), so erhält man eine Gesamtkontaktfläche pro Ski von ca.  $40 \text{ mm}^2$ , was um einen Faktor 60 geringer ist als die geometrische Kontaktfläche zwischen Ski und Spur ohne Noppen. Da der Skibelag nicht ideal eben ist, verringert sich die Kontaktfläche nochmals.

## 2.2 Hydrodynamik

Als zweiter tribologischer Effekt wirkt die Hydrodynamik. Da die Spur gewässert wird und sich zwischen Noppe und Skibelag ein Keil aus eingeklemmtem Wasser bildet, entsteht in diesem Keil während der Fahrt ein Staudruck, der den Ski nach oben drückt. Ein sehr dünner Wasserfilm zwischen Belag und Noppen trägt also den Ski. Der Wasserfilm ist allerdings nicht vollständig ausgeprägt, sondern es existieren noch Anteile trockener Reibung. Man nennt dieses Regime Mischreibung, welche den Zustand zwischen trockener Reibung und Hydrodynamik beschreibt. Die Physik des Gleitens mit und ohne Fluidfilm wird durch die Stribeckkurve beschrieben [3], siehe Bild 2, links. Der Reibungskoeffizient startet am linken Rand des Diagramms aus dem Gebiet der Trockenreibung mit hohen Werten. Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit baut sich der trennende Wasserfilm auf und verringert die Reibung bis zu einem Minimum. Ab diesem Punkt steigt die Reibung wieder an, da im Wasserfilm Turbulenzen entstehen, die bremsend wirken. Neben der Gleitgeschwindigkeit hängt die Reibung auch vom Athletengewicht ab. So wird ein schwererer Athlet einen dünneren Wasserfilm vorfinden als ein leichter und somit auch höhere Reibung spüren. Als weiterer Parameter hängt die Reibung auch von der Viskosität des Wassers ab was bedeutet, dass bei geringeren Temperaturen ein dickerer Wasserfilm existiert.

Die Stabilität des Wasserfilms hängt entscheidend vom Benetzungsverhalten der Noppen ab. Im Fall der Keramik, meistens Aluminiumoxid, sind die Oberflächen naturgemäß hydrophil (wasserliebend)



**Abb. 2:** Links: Reibungskoeffizient als Funktion des Verhältnisses von Geschwindigkeit  $v$ , Viskosität  $\eta$  und Kontaktdruck  $p$ . Rechts: Kapillarkraft zwischen Noppen und Skibelag.

und benetzen sehr gut. Allerdings kann sich die Hydrophilie abschwächen, wenn es zum Übertrag von hydrophobem Wachs auf den Noppen kommt. Somit sollte hinterfragt werden, ob es notwendig ist, den Ski zu wachen. Es gibt allerdings einen mikroskopischen Grund, der für das Wachsen spricht und der liegt im Zuschmieren der Schleifriefen im Skibelag. Das Auftragen von Wachs gefolgt von Bügeln und Abziehen bewirkt eine glatte Oberfläche, die dem Wasser keine Wege zum Entrinnen bietet. Wird der Ski allerdings nach dem Wachsen gebürstet, kommen die Schleifriefen wieder zum Vorschein und es entstehen Mikrokanäle, die das Wasser transportieren können. Außerdem steigt mit dem Freilegen der Riefen der mikroskopische Kontaktdruck, was zum Herausquetschen des Wasserfilms aus dem Kontakt führt.

Dem aufmerksamen Leser wird nicht entgangen sein, dass die obige Argumentation zu einem vermeintlichen Widerspruch geführt hat. Zur Aufrechterhaltung der Benetzbarkeit des Noppens sollte der Übertrag von Wachs auf den Noppen vermieden werden. Es stellt sich daher die Frage, ob die wasserabweisende Funktion des Wachses auf dem Ski nicht kontraproduktiv ist, denn sie wirkt ja dem Wasserfilmaufbau entgegen. Zur Beantwortung der Frage muss ein weiterer physikalischer Effekt einbezogen werden. Es handelt sich um die Kapillarwirkung, die ebenso wie die Normalkraft, siehe Bild 2, rechts, den Ski auf die Noppen drückt. Die Kapillarkraft wirkt also wie eine zusätzliche Last auf den Schultern des Athleten. Diese Last kann verringert werden, wenn die Oberflächen schlecht benetzen, wie es bei Wachs der Fall ist. Es kommt also zu einem Zielkonflikt zwischen Hydrophilie zur Stabilisierung des Wasserfilms und Hydrophobie zur Minimierung der Kapillarkraft. Hier ist die Erfahrung des Skitechnikers gefragt.

### 2.3 Pflügewirkung

Der dritte tribologische Mechanismus basiert auf der Pflügewirkung der Noppen. Die Noppen sinken durch das Gewicht des Athleten und durch die Beschleunigung senkrecht zur Fahrtrichtung ca. 10 bis 20  $\mu\text{m}$  in den Skibelag ein. Da der Ski sich bewegt, muss jeder Noppen Polymer verdrängen, was sich in erhöhter Reibung äußert.

## 3 Aufsprunghügel

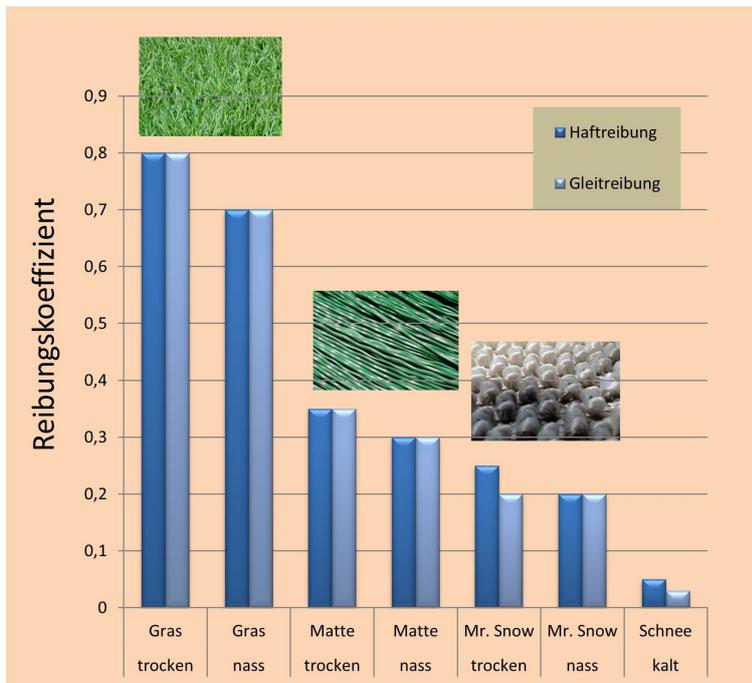
Wie auch bei den Anlaufspuren soll sich in diesem Abschnitt nur auf die Sommervariante konzentriert werden, bei der es hauptsächlich um Mattensysteme geht. Seit den 70'er Jahren haben sich Matten, bestehend aus einer Vielzahl von einzelnen Fäden, siehe Bild 3, links, bewährt. Die Matten müssen wie die Anlaufspur ebenfalls bewässert werden, um die Reibung zu reduzieren. Die Vergrößerung im Bild zeigt, wie die Matte Wasser speichert. Am Kontaktwinkel ist zu erkennen, dass der verwendete Kunststoff hydrophil ist und sehr gut benetzt. Wäre das nicht der Fall, würde das Wasser durch die Matte in den Untergrund laufen und der Wasserbedarf des Auslaufs wäre sehr groß. Reibungsmessungen mit einem tragbaren Messgerät [4] belegen den deutlichen Unterschied zwischen trockener und geschmierter Reibung. Die Messungen erfolgten bei ca. 1 m/s, d.h. kleiner Geschwindigkeit, verglichen mit der des Aufsetzens auf der Matte. Gemäß der Stribeckkurve bewirkt eine hohe Geschwindigkeit sehr kleine Reibungswerte in der Nähe des Minimums der Kurve. Ein Durchschreiten des Minimums würde in wachsender Reibung, aber



**Abb. 3:** Links: Schanzen mit herkömmlichem Mattensystem. Rechts: Schanze mit neuartigem Mattensystem.

gleichzeitig auch im Verlust der Kontrollierbarkeit des Skis resultieren, da dieser durch einen vollständig ausgebildeten Wasserfilm von der Matte getrennt wäre.

Ein neuartiger Typ von Matten wurde 2018 an einer kleinen Schanze im Thüringer Steinbach-Hallenberg installiert. Durch die Kombination von Kunststofffaser und Schlaufenform, wie es Bild 3, rechts zeigt, können mit diesen Matten kleinere Reibungswerte erreicht werden. Auf Grund der Faserbündel halten die Matten deutlich mehr Wasser als die grünen Vorgänger. Somit sinkt der Wasserverbrauch der Anlage. Der tribologische Mechanismus ist ebenso wie bei der Anlaufspur in der Hydrodynamik zu finden. Das im Faserverbund der Matten gespeicherte Wasser dient als Schmiermittel. Da bei der Landung der Kontakt zwischen Ski und Matte sehr schnell erfolgt, bleibt nicht genügend Zeit, um das Wasser aus dem Kontakt zu drängen und es entsteht Schmierwirkung. Diese bleibt erhalten bis zum Stand oder bis der Rasen anfängt. Ab diesem Zeitpunkt kommt es schlagartig zu deutlich größerer Reibung, siehe Bild 4. Werte des Reibungskoeffizienten nahe 1 signalisieren, dass es zu Klebeeffekten oder sehr großer Kontaktfläche kommt.



**Abb. 4:** Reibungswerte bei 1 m/s für Gras und Mattensysteme trocken und gewässert sowie Schnee.

Im Fall von nassem Gras kleben die einzelnen Halme am Skibelag. Hier wird wieder deutlich, dass

der Ski gewachst werden muss, um den Klebfeffekt klein zu halten. Trockenes Gras klebt aber ebenfalls am Skibelag, da die Blätter mit einer dünnen Wachsschicht überzogen sind [5]. Skiwachs kommt also mit Blattwachs in Kontakt und verklebt. Wird das Gras gewässert, bildet sich ein geschmierter Kontakt zweier wasserabweisender Oberflächen. Derartige Oberflächen zeigen geringere Reibung. Da aber die einzelnen Grashalme nahezu jede Schleifriefe im Belag finden, ist die Reibung trotz Wasserabstoßung sehr hoch und die Athleten passieren den Übergang von Matte zu Rasen mit deutlicher Rücklage, siehe Bild 5. Die im Diagramm gezeigten Reibungswerte zeigen deutliche Unterschiede zwischen Schnee und Matten. Dieser Unterschied resultiert aus der geringen Geschwindigkeit (1 m/s), mit der die Messung erfolgte. Im Bereich der realen Landegeschwindigkeiten verliert sich der Unterschied durch die Wirkung der Hydrodynamik.



**Abb. 5:** Springer, der der signifikant höheren Reibung auf Gras durch seine Körperhaltung Rechnung trägt (Mit freundlicher Genehmigung von Radowan Duschek.).

## 4 Skioptimierungen

Basierend auf den physikalischen Grundlagen lassen sich eine ganze Reihe von Schlussfolgerungen für die Skipräparation im Sommer ableiten.

- Mit steigender Hydrophobie des Wachses sinkt die Reibung.
- Die Verwendung von harten Wachsen verringert das Eindringen der Noppen in den Skibelag. Die reale Kontaktfläche verringert sich und die Reibung wird kleiner.
- Ein Freilegen der Schleifriefen durch Bürsten reduziert die Fähigkeit, den Wasserfilm auszubilden und kann daher wegfallen.

## Danksagung

Dank gebührt den Gutachtern Dr. Reinhard Groß und Dieter Thoma für die fachliche Durchsicht und die wertvollen Hinweise! Weiterhin möchte ich Herrn Knut Klienzig sowie Herrn Wolfram König für die Unterstützung der Messungen in Steinbach-Hallenberg danken! Ebenfalls danken möchte ich der Firma Conductio Oy und Radowan Duschek für die Überlassung von Bildmaterial.

## Über den Autor



Matthias Scherge ist Professor für Tribologie. Das ist die Wissenschaft von Reibung, Verschleiß und Schmierung. Prof. Scherge leitet das Fraunhofer MikroTribologie Centrum, lehrt am Karlsruher Institut für Technologie und managed das Team Snowstorm. Darüber hinaus berät er das Nordic Paraski Team Deutschland sowie mehrere nationale und internationale Athleten in wissenschaftlich-technischen Fragen.

## References

- [1] Matthias Scherge. Wachs oder kein Wachs – Das ist hier die Frage. *Gliding*, 1:1–3, 2016.
- [2] Heinrich Hertz. Über die Berührung fester elastischer Körper. In *Gesammelte Werke - Band 1: Schriften vermischten Inhalts*, pages 156–171. Johann Ambrosius Barth Verlag, 1895.
- [3] Richard Stribeck. Die Wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. *Z. Verein. Deut. Ing.*, 46:1341–1348, 1902.
- [4] Roman Böttcher and Matthias Scherge. Ski preparation as a three-dimensional problem. *Gliding*, 4:19–23, 2017.
- [5] Matthias Scherge and Stanislav S. N. Gorb. *Biological Micro- and Nanotribology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.