



Schnee – Das Gleitmittel für den Wettkampf

Matthias Scherge

ARTIKELINFORMATION

Stichworte:

Schnee
Feuchte
Temperatur
Reibung

KURZFASSUNG

Schnee kann man mit den Eigenschaften Korngröße, Kornform, Temperatur, Feuchte und Härte beschreiben. Für alle fünf Messgrößen gibt es geeignete Geräte, die käuflich zu erwerben oder mit wenig Aufwand selbst zu bauen sind. Für das Skifahren sinnvoll wird es, wenn Reibungswerte hinzukommen. Der Beitrag zeigt, wie die Reibung von oben genannten Größen abhängt und ob sie vorhersagbar ist.

© Team Snowstorm

1. Einführung

Schnee, wie er vom Himmel fällt, verzaubert durch seine Formenvielfalt. Hat Wasser Zeit zum Kristallisieren, führt dieser Vorgang zu perfekten sechseckigen Formen, von denen eine anders ist als die nächste. Viel wurde zu diesem Thema bereits geschrieben, wobei die Bilder von Kenneth Libbrecht den lebhaftesten Eindruck vermitteln [1]. Angekommen am Boden beginnt der Schnee sich zu verändern, er transformiert. Aus den sechseckigen Gebilden entstehen schrittweise runde Körner, die auf ihrem Weg zur Kugel noch Ecken und Kanten zeigen. Erst nach langen Umwandlungszeiten mit häufigen Wechseln von kalt zu warm und zurück bilden sich perfekt runde und große Kugeln, siehe Bild 1.

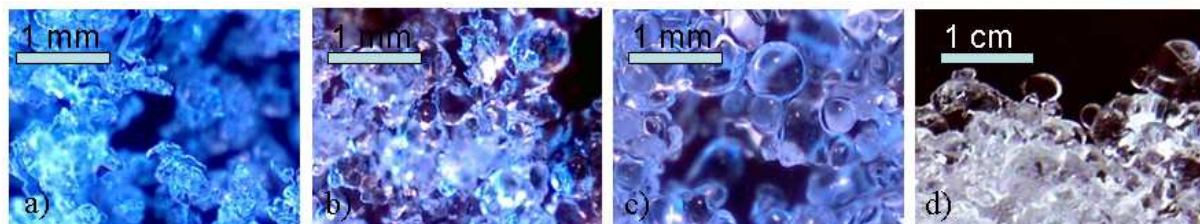


Bild 1: Schnee bei unterschiedlichen Temperaturen. a) Kantiger Schnee bei -6°C und geringer Schneefeuchte. b) Schnee mit Rundungen und Kanten bei $-0,5^{\circ}\text{C}$ und mittlerer Schneefeuchte. c) Schnee-Wasser Gemisch bei $-0,8^{\circ}\text{C}$. d) Alter Schnee (Juni) bei -0°C und hoher Schneefeuchte. Die Korngröße in a) bis c) schwankt zwischen $100\ \mu\text{m}$ und $600\ \mu\text{m}$. In Bild d) liegt die Korngröße bei 3 bis 5 mm.

Neben der Umwandlung der Form gehen die Schneekörner auch eine Verbindung untereinander ein. Diesen Prozess nennt man das Sintern. Schnee bildet somit eine kompakte Masse, der man eine mittlere Dichte sowie eine Härte zuordnen kann. Dieser Artikel behandelt die Messung wichtiger Schneeeigenschaften wie Temperatur, Feuchte und Härte und stellt den Zusammenhang zur Reibung her.

2. Ergebnisse

2.1 Schneetemperatur und Schneefeuchte

Schneetemperatur kann man durch Berührung mit einem Einstichthermometer oder berührungsfrei mit Infrarotthermometer messen. Alternativ funktioniert natürlich auch ein herkömmliches Thermometer. Bei der berührenden Messung sollte man dem Thermometer 1 bis 2 Minuten Zeit geben, um die Umgebungsbedingungen zu erfassen. Da das Gleiten auf den Schneekörnern stattfindet, sollte schräg, das heißt oberflächennah eingestochen werden. Mit dem Infrarotthermometer sind die Messwerte sofort verfügbar. Allerdings sollte man darauf achten, in schattigen Bereichen zu messen, um möglichst wenig reflektiertes Sonnenlicht in die Optik zu bekommen.

Eine Auswahl von Messgeräten ist in Bild 2 gezeigt. Die Feuchtemessung beruht auf der Änderung der Kapazität einer Messgabel in Kontakt mit Schnee. Das elektrische Feld zwischen den Zinken der Gabel dringt mehrere Zentimeter tief in den Schnee ein. Unter Schneefeuchte versteht man die Menge an freiem Wasser zwischen den Schneekörnern. Somit hat Schnee um 0°C die größte Schneefeuchte. Bild 3 zeigt den Zusammenhang von Schneefeuchte und Schneetemperatur.



Bild 2: Geräte zur Messung von Schneefeuchte a) und Schneetemperatur. b) Einstichthermometer; c) Infrarotthermometer.

Nach Abzug der Messungenauigkeiten liegen die Werte für kleine Temperaturen bei ca. 20%. Ab etwa -8°C fächern die Werte auf und decken am Gefrierpunkt einen Bereich von 10% bis zu 100% ab. Diese Streuung wird durch den inhomogenen Charakter des Schnees verursacht. Wie bereits beschrieben, besteht Schnee aus einer Vielzahl einzelner Körner. Zwischen den Körnern befindet sich bei kleinen Temperaturen Luft und in Richtung des Schmelzpunkts mehr und mehr Wasser. Der Schmelzprozess der einzelnen Körner wird von Parametern wie Korngröße, Kornform aber auch von der Temperatur des Erdreichs und der Sonneneinstrahlung beeinflusst. Daher schmilzt der Schnee unterschiedlich schnell und es kann Bereiche geben, in denen bereits viel Wasser gebildet wurde und andere, in denen kaum Wasser existiert. Je nachdem wo die Gabel des Messgeräts aufgesetzt wird, kann es mehr oder weniger freies Wasser geben und das Gerät gibt Messwerte von 10% bis zu 100% aus.

Bei der Betrachtung von Wasser muss man zwischen Wasser auf den Schneekörnern und zwischen den Schneekörnern unterscheiden. Auch wenn kein freies Wasser zwischen den Körnern existiert, findet man einen nanometerdünnen Film auf den Körnern. Forscher vom Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart konnten zeigen, dass selbst bei -13°C ein Wasserfilm vorhanden ist [2]. Bei noch tieferen Temperaturen muss allerdings der Wasserfilm erst durch Reibung erzeugt werden, Skifahren wird dann anstrengend.

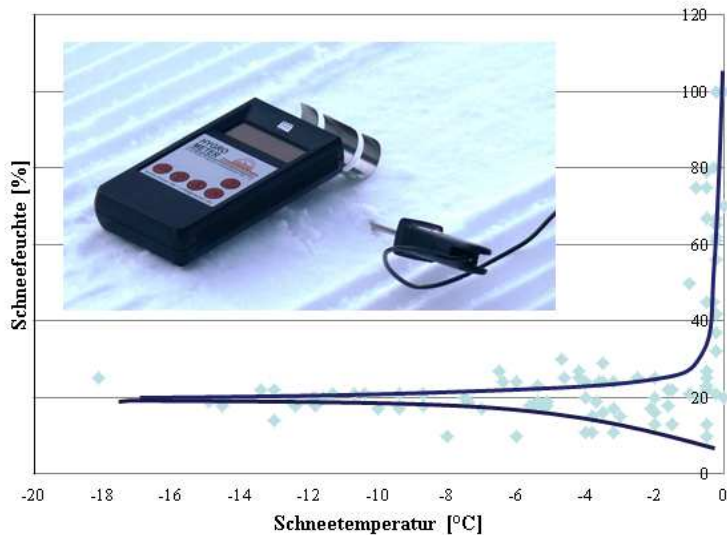


Bild 3: Schneefeuchte und Schneetemperatur. Das Bild im Bild zeigt ein Schneefeuchtemessgerät und ein Einstichthermometer.

2.2 Schneehärte

Härte stellt den Widerstand beim Eindringen eines Körpers in einen anderen dar. Der eindringende Körper übt mit seiner Kraft über der Eindringfläche also einen bestimmten Druck aus. Ist der Druck hoch genug, bricht der Schnee ein. Um ein Gefühl für den wirkenden Druck zu bekommen, kann man sich eine stumpfe Nadel mit einem Durchmesser von 1 mm vorstellen, die in den Schnee gedrückt wird. Ein Bruch erfolgt, wenn auf der Nadel ca. 1 kg lasten. Bild 4 zeigt ein sehr einfaches Instrument, mit dem man Schneehärte quantitativ bestimmen kann. Durch Spannen der Feder erzeugt man die notwendige Kraft. Dieser Vorgang ist stufenlos. Ab einer bestimmten Kraft dringt der 1 mm dünne Stab ins Eis ein. Diesen Wert kann man als Schnee- bzw. Eishärte betrachten. Von der Kraft zum Druck gelangt man nach geeigneter Kalibrierung. Hierzu wird das Gerät senkrecht mit der Spitze nach oben aufgestellt und eine Masse aufgelegt. Masse mal Erdbeschleunigung ergibt die wirkende Kraft. Für eine Masse von 1,25 kg und der Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$ ($\approx 10 \text{ m/s}^2$) erhält man eine Kraft von 12,5 N (Newton). Die wirkende Fläche ist ca. $0,78 \text{ mm}^2$ groß ($A = \pi/4 \cdot d^2$), so dass ein Druck von etwa $16 \text{ N/mm}^2 = 16 \text{ MPa}$ (Megapascal) entsteht. Zum Vergleich, den Luftdruck misst man in Hektopascal ($1.000 \text{ hPa} = 0,1 \text{ MPa}$). Das Instrument deckt einen Druckbereich von 1 MPa bis etwa 40 MPa ab. Aus der Fachliteratur sind Werte für die Schneehärte um ca. 10 MPa bekannt [3].

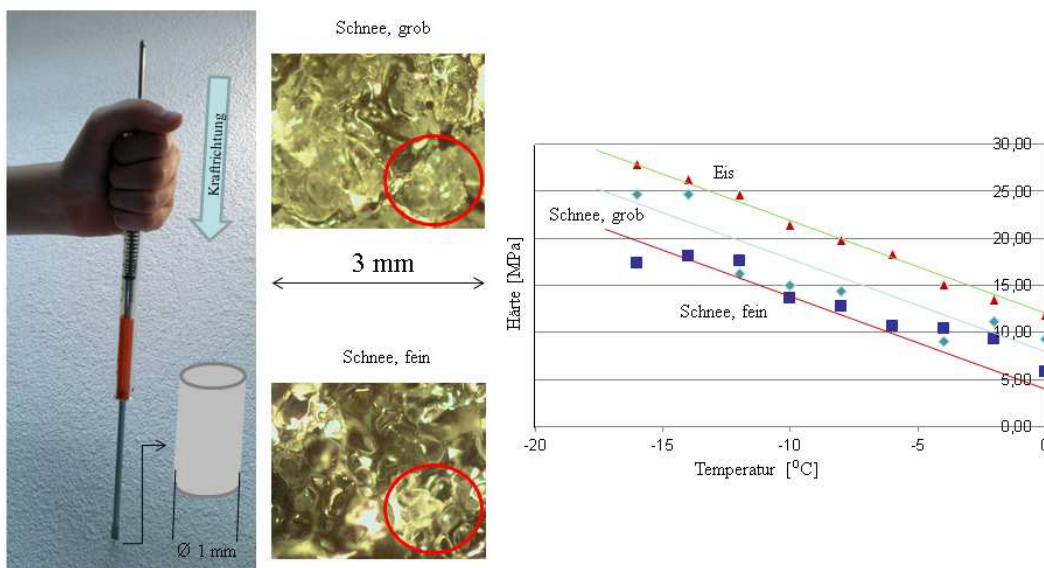


Bild 4: Messinstrument für Härtemessung sowie Härtewerte von Eis, grobkörnigem und feinkörnigem Schnee. Der rote Kreis zeigt den Durchmesser des Spitzes.

Mit dem Instrument wurde Eis, feinkörniger sowie grobkörniger Schnee gemessen. Die Ergebnisse sind in Bild 4 rechts dargestellt. Aus dem Bild ist zu entnehmen, dass die Härte mit abnehmender Schneetemperatur linear steigt. Deutlich wird zudem, dass Eis die größten Härtewerte und feinkörniger Schnee die kleinsten Härtewerte aufweist. Im Gegensatz zu Eis haben die einzelnen Schneekörner Kontaktstellen untereinander. Sehr schöne Aufnahmen zur Schneemorphologie sind Lukas Bäurle in seiner Doktorarbeit gelungen [4]. Mit Hilfe der Tomographie erkennt man in dreidimensionalen Darstellungen einzelne Kontakthälse zwischen den Schneekörnern. In der Regel versagen diese Hälse, bevor das Eis flächig bricht. Daher hat feinkörniger Schnee, bei dem unter dem stabförmigen Eindringkörper eine Vielzahl von Körnern liegen, eine geringere Härte als grobkörniger Schnee. Somit hat Eis die größte Härte, denn es ist kompakt und hat keine Kontaktstellen. Diese gefrorene Verbindung geht nahe des Nullpunkts, an dem Schnee mehr und mehr zu Wasser wird, verloren und es liegen einzelne Körner vor. Einen ähnlichen Effekt sieht man bei altem Schnee mit Verunreinigungen. Dieser Schnee hat eine mehlartige Konsistenz. Die Härte des Schnees erlaubt Aussagen über die Mobilität einzelner Schneekörner. Je mobiler die Körner sind, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie die Schliifstrukturen des Belags zusetzen und die Reibung erhöhen.

2.3 Reibung

Reibung zwischen Skibelag und Schnee wurde mit einem tragbaren Tribometer gemessen. Tribometer sind die Arbeitspferde des Reibungsforschers. Die Reibungskraft, also die Kraft, die einen gleitenden Körper abbremst hängt hauptsächlich von der Last, die auf den Reibkörper, wirkt ab. Beeinflusst wird die Reibung von der Rauheit der Reibkörper aber nicht von der Größe der Kontaktfläche. Dieser Zusammenhang wird durch das Coulomb'sche Gesetz beschrieben und gilt für trockene Oberflächen, d.h. sehr kalten Schnee. Sind die Oberflächen feucht oder sogar nass, kommt zusätzlich zur Last eine weitere Kraft hinzu, die die Reibkörper aufeinander presst, die Kapillarkraft. Diese Kraft kann so groß sein, dass sie die Bewegung bis zum Stillstand abbremst, was man erleben kann, wenn man im Frühjahr auf einem Ziehweg vom Schatten in einen sonnenbeschienenen Abschnitt fährt. Der Ski saugt an, der Druck zwischen Ski und Schnee nimmt zu und die Reibung steigt.



Bild 5: Kräfte auf einen Skifahrer.

Bild 5 illustriert die Kräfte auf einen Skifahrer. Getrieben von der Gravitationskraft entsteht über den Winkel α die Hangabtriebskraft. Den Winkel α findet man auch im Kraftdreieck unter dem Ski wieder. Die reibungstechnisch wirksame Kraft, die Normalkraft, entsteht als Komponente der Gravitationskraft. Als abbremsende Kräfte wirken der Luftwiderstand, der hier nicht näher betrachtet werden soll, und die Reibungskraft. Der Quotient aus Reibungskraft und Normalkraft wird als der Reibungskoeffizient μ bezeichnet:

$$\mu = \frac{\text{Reibungskraft}}{\text{Normalkraft}}$$

Man unterscheidet zwischen statischer Reibung (Haftreibung), das ist der Wert bei dem Haften in Gleiten übergeht, und dynamischer Reibung (Gleitreibung) als dem Mittelwert bei Bewegung. In der Regel ist die statische Reibung größer als die dynamische. Für den dargestellten Fahrer kann man allerdings den Reibungskoeffizienten nicht bestimmen, da die Reibungskraft nicht messbar ist. Zur Messung müsste man einen Kraftsensor zwischen Bindungsplatte und Ski anbringen und die Daten zwischenspeichern oder per Telemetrie nach außen senden. Derartige Messungen sind sehr aufwändig, wurden aber vereinzelt durchgeführt [5].

3. Auswirkungen auf die Reibung

Dieser Abschnitt behandelt, wie sich Schneetemperatur, Schneefeuchte, Korngröße und Kornform auf die Reibung auswirken. Bild 6 zeigt ein Spinnendiagramm mit 4 typischen Konstellationen:

Farbkodierung	Eigenschaften
blau	feinkörniger, trockener und kalter Schnee mit abgerundeten Kanten
rot	größerkörniger, leicht feuchter und kalter Schnee mit abgerundeten Kanten
grün	grobkörniger, nasser Schnee mit runden Körnern
grau	feinkörniger, trockener jedoch warmer Schnee mit scharfen Kanten

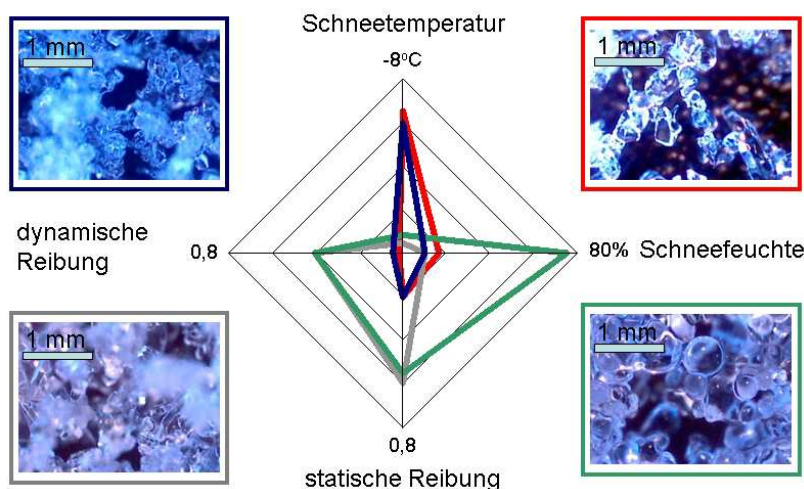


Bild 6: Reibung in Abhängigkeit von Schneetemperatur, Schneefeuchte und Korngröße sowie Kornform.

blau: Auf diesem Teilbild beträgt die Korngröße ca. 100 μm . Der Schnee ist kalt und die einzelnen Körner zeigen nur wenige gefrorene Verbindungen untereinander. Somit besteht die Gefahr, dass sich Körner in die Riefen der Schliffstruktur setzen und die Reibung erhöhen könnten. In unserem Beispiel betrug die Riefenbreite der Schliffstruktur weniger als 50 μm , so dass diese Gefahr nicht bestand. Da die Körner abgerundet sind und sich kein freies Wasser zwischen ihnen befindet (Schneefeuchte 10%), gibt es keine Saugkräfte und die Reibung ist sehr klein. Wie oben erwähnt, ist die statische Reibung größer als die dynamische (ca. 2:1).

rot: Hier herrschen ähnliche Temperaturen und Feuchten wie im Fall blau. Durch die größeren Körner wird der Einfluss der Schneefeuchte kompensiert, was in geringerer dynamischer Reibung deutlich wird.

grün: Dieser Schnee befindet sich am Schmelzpunkt. Trotz großer und runder Körner überwiegt der Saugeffekt, der besonders zu hoher Haftreibung führt. Ein Gleitreibungswert von 0,4 entspricht dem Widerstand, den man beim Rutschen auf Strümpfen über Parkett spüren würde.

grau: Nahezu identische Reibwerte wie im Fall grün, aber deutlich kleinere Schneefeuchte. Somit scheidet der Saugeffekt als Grund für hohe Reibung aus. Die Ursache für die hohe Reibung liegt in den kleinen und eckigen Körnern, die in die Schliifstruktur des Belags eindringen und dort wie Sand im Getriebe wirken. Diesen Effekt kann man über die Messung der Schneehärte quantifizieren. Ist sie klein, werden viele Körner – wenn sie passende Größe haben – in die Schliifstruktur eindringen. Darüber hinaus führen kleine und eckige Körner zum Pflügen des Skibelags, was wiederum die Reibung erhöht.

4. Zusammenfassung

Die Reibung zwischen Ski und Schnee hängt empfindlich von äußeren Einflüssen wie Temperatur und Feuchte ab. Aber auch die Härte des Schnees übt einen großen Einfluss aus. Auch wenn Schneetemperatur und Schneehärte im optimalen Bereich liegen, kann bei ausgefrorenem Schnee (lose Körner = geringe Schneehärte) hohe Reibung auftreten. Auf die genannten Einflussgrößen kann man mittels Wachs- und Schliiffauswahl reagieren. Diese Themen werden in einem zukünftigen Artikel behandelt.

Was sind also die Schlussfolgerungen für den ambitionierten Skifahrer?

1. Ein Blick in den Schnee vor dem Skifahren lohnt immer. Für den Blick empfiehlt sich eine Lupe oder ein Mikroskop. Mikroskope mit 60 facher Vergrößerung als Aufsatz für die Kamera des Mobiltelefons erhält man schon für unter 5 €. Bei dieser Vergrößerung erkennt man Korngröße und Kornform sowie das Wasser zwischen den Körnern.
2. Einen Eindruck von der Schneehärte erhält man bereits durch Ritzen mit einem Schraubenzieher. Mit etwas Übung erarbeitet man sich wie Fräulein Smilla ein Gespür für Schnee.

Quellen

- [1] Libbrecht, K., *The Snowflake*, Voyageur Press, 2003.
- [2] Lied, A., Dosch, H., Bilgram, J.H., Surface Melting of Ice Ih Single Crystals Revealed by Glancing Angle X-ray Scattering, *Physical Review Letters*, 72(1994)3554-3557.
- [3] Petrenko, V. F., Whitworth, R. W. *Physics of Ice*, Oxford University Press; Revised ed. edition, 2002.
- [4] Bäurle, L., *Sliding friction of polyethylene on snow and ice*, Dissertation, ETH (2006).
- [5] Miller, P., Hytjan, A., Weber, M., Wheeler, M., Zable, J., Walshe, A., Ashley, A., Development of a Prototype that Measures the Coefficient of Friction Between Skis and Snow, *The Engineering of Sport* 6, 2006, 305-310.