



Skischliffe falsch interpretiert

Matthias Scherge

ARTIKELINFORMATION

Stichworte:

Skischliff
Skipräparation

KURZFASSUNG

Skischliffe sind essentiell für optimales Gleiten. Obwohl ausgefeilte Schleiftechnik seit Jahren verfügbar ist, hinken Wissen und Verständnis zu Ursache und Wirkung des Skischliffs deutlich nach. Das wird besonders deutlich, wenn es um die Tiefe der Schleifriefen und die vermutete Drainagewirkung oder um Faustregeln, die die Körnigkeit des Schnees mit der Riefenbreite in Verbindung bringen, geht.

© Team Snowstorm

1. Einführung

Zur Auswahl geeigneter Schliffe gibt es eine Hand voll Regeln wie z.B. grober Schliff bei nassem Schnee oder feine Strukturen bei kaltem Schnee. Tiefe Strukturen sorgen dafür, dass überschüssiges Wasser abtransportiert wird und so den Saugeffekt verhindert. Sehr oft wird zur Veranschaulichung das Beispiel eines Reifens auf nasser Fahrbahn genutzt. Feine Schliffstrukturen werden hingegen gewählt, um bei kaltem Schnee durch verringerten Druck das Eindringen und Verhaken von kleinen und aggressiven Schneekörner in den Skibelag zu vermeiden. Die Regeln wurden empirisch gewonnen und widerspiegeln viele Jahre Erfahrung von Skitechniker und Skifahrern. Die Regeln sind instruktiv und einfach handzuhaben, Allerdings sind die Modellvorstellungen, die zu den Regeln geführt haben, im Allgemeinen falsch.

Zu Realisierung eines bestimmten Schliffs muss die Schleifscheibe entsprechend abgerichtet werden. Bild 1 zeigt zwei Schliffe in Draufsicht sowie im Profil. Typische Schleifriefenbreiten liegen zwischen 100 μm und 500 μm und widerspiegeln so den wahrscheinlichsten Größenbereich der Schneekörner. Die Tiefe des Profils variiert zwischen 5 μm und 50 μm , siehe Bild 1. Wenn man also den Schliff mit dem Fingernagel spürt, handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um einen Nassschliff. Schliffe für trockene und kalte Bedingungen sind mit dem Auge sichtbar aber mit dem Fingernagel kaum zu spüren. Die Steuerparameter der Schleifmaschinen ermöglichen eine nahezu unendliche Bandbreite von Varianten wie zum Beispiel Schleifriefenbreite und -tiefe, Riefenausrichtung, usw. und machen eine umfassende Testung unmöglich. Dieser Beitrag prüft daher an den oben genannten Schliffvarianten die Modellbasis und klärt Schwächen und Probleme auf.

Im ersten Teil des Artikels werden Effekte im Temperaturbereich erläutert. Hierbei geht es um das Wasser, welches sich frei zwischen den Schneekörnern befinden kann sowie um nanometerdünne Wasserfilme auf Schneekörnern. Im 3. Abschnitt werden physikalische Werkzeuge diskutiert, mit denen die Interaktion von Oberflächen und Wasser beschrieben werden kann. Schließlich werden im letzten Abschnitt Fehleinschätzungen diskutiert und richtig gestellt.

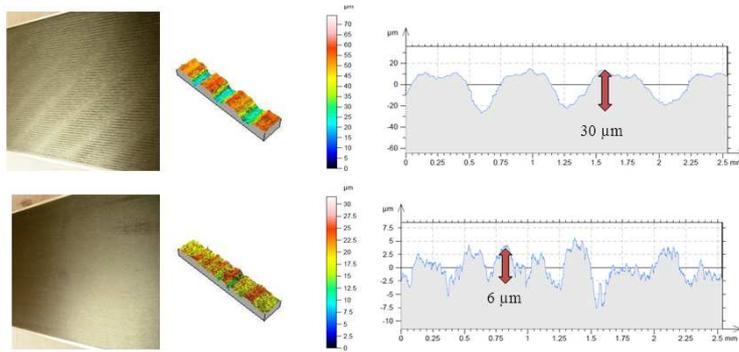


Bild 1: Schleifstrukturen von Alpinski. Oben grober Schliff; Unten: feiner Schliff. Achtung! Die Skalen sind verzerrt, d.h. horizontal sind 2,5 mm Skibelag dargestellt, aber vertikal nur 100 µm bzw. 18 µm.

2. Effekte im Temperaturbereich

2.1 Um den Nullpunkt

Wenn Schnee wärmer wird, so steigt dessen Temperatur solange, bis der Schmelzpunkt erreicht ist. Ab diesem Punkt hält das System die Temperatur auf 0°C konstant, bis der letzte Rest Eis in Wasser übergegangen ist. Diesen graduellen Übergang zeigt Bild 2. Selbst bei Raumtemperatur dauert es 5 Stunden, um von -5°C bis zu +12°C zu gelangen. Der Haltepunkt, an dem Eis und Wasser koexistieren, dauert 200 Minuten. Im linken Teilbild beginnt der Schnee gerade mit dem Schmelzvorgang und es befindet sich noch kein freies Wasser zwischen den Schneekörnern. Im Bild in der Mitte ist bereits freies Wasser entstanden und im rechten Teilbild schwimmen die Schneekörner im Wasser.

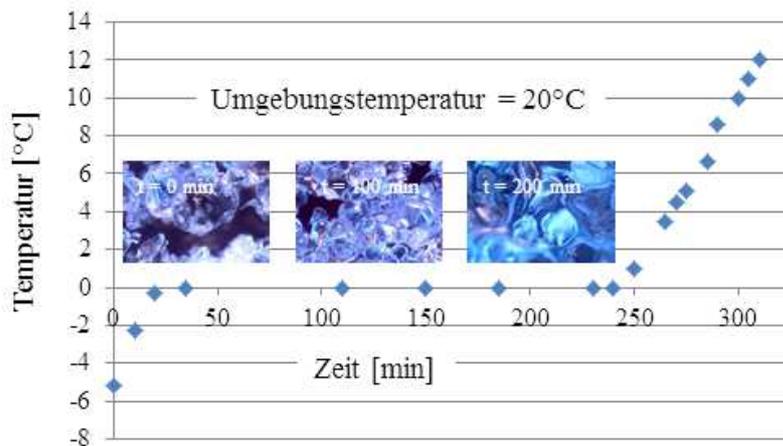


Bild 2: Tauvorgang von Schnee bei Raumtemperatur. Schneekörner in 60 facher Vergrößerung. Die Korngröße beträgt ca. 1 mm. Im linken Teilbild befindet sich kein Wasser zwischen den Körnern während nach rechts der Schnee am Taupunkt zunehmend freies Wasser bildet.

Die Kräfte zwischen Oberflächen, die durch eingeschlossenes Wasser verursacht werden, nennt man Kapillarkräfte. Ein schönes Beispiel ist die Bildung eines Kapillarhalses, wenn man mit der Fingerkuppe eine nasse Fensterscheibe berührt. Nahezu instantan umgibt das Wasser die Kuppe und bildet einen Saum, den sogenannten Meniskus, welchen man mit dem Finger hin und her bewegen oder auch ein gewisses Stück in die Länge ziehen kann, bis er bricht. Zum in-die-Länge-ziehen benötigt man Kraft, man muss die Kapillarkraft überwinden, die für einen einzelnen Meniskus kaum fühlbar ist, wenn aber der gesamte Ski benetzt wird, eine signifikante Saugkraft bildet. Der Widerstand beim Gleiten rührt also nicht daher, dass das Scheren des Kapillarhalses Mühe bereitet sondern, dass die Kapillarkraft den Ski in den Schnee zieht. Will man also auch bei höherer Schneefeuchte gut gleiten, darf sich dieser großflächige Kapillarhals nicht bilden. An dieser Stelle setzt der Skischliff an.

2.2 Temperaturen -1°C bis -15°C

Dass sich das Gleiten auf Schnee auf einem dünnen Wasserfilm abspielt, kann mittlerweile als allgemeiner Stand des Wissens betrachtet werden. Gesichert ist auch die Theorie, dass es Reibung braucht, um den Wasserfilm zu vergrößern und, dass einfacher Druck nicht ausreicht. Vollkommen überschätzt wird allerdings die Dicke des Wasserfilms. Hierzu gab es in den letzten 20 bis 30 Jahren mehrere Forschungsarbeiten, die durch großen labor-technischen Aufwand die Wasserfilmdicke messen konnten. Übereinstimmend wurde festgestellt, dass die Wasserfilmdicke natürlich von der Schneetemperatur aber auch von der in den Schnee eingebrachten Reibleistung abhängt und in der Regel deutlich geringer als 1 μm ist. Dosch und Kollegen konnten mittels Röntgenstrahlung ermitteln, dass sogar bis minus 13°C ein wenige Nanometer dünner Wasserfilm auf der Oberfläche von Eis existiert [1]. Dieser Film nimmt mit steigender Schneetemperatur zu und liegt bei 0°C bei ca. 100 nm. Roman Böttcher zeigte in seiner Dissertationsschrift eindrucksvoll, dass die Wasserschicht auf den Schneekörnern auch berechnet werden kann [2]. Mittels Modell, welches die Reibleistung, die Wärmeleitfähigkeiten von Schnee und Skibelag sowie eine Betrachtung der realen Kontaktfläche zwischen Ski und Schnee umfasste, ist Bild 3 entstanden.

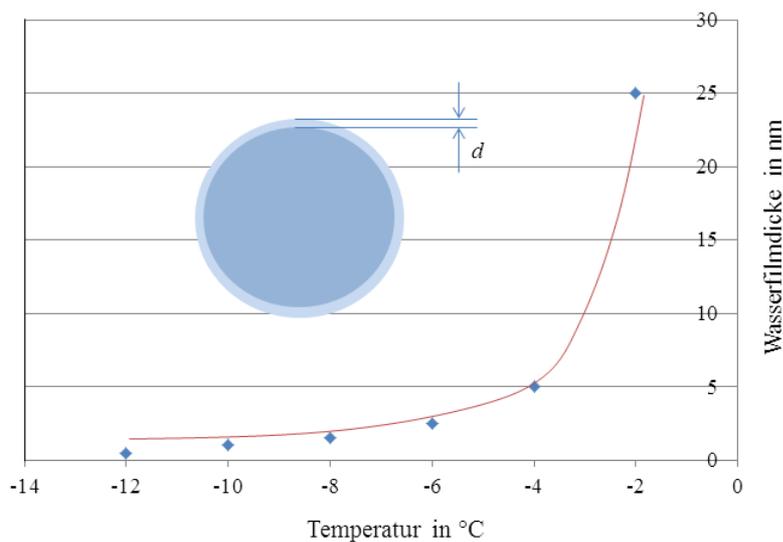


Bild 3: Berechnung der Wasserfilmdicke. Unter Verwendung des Modells aus [2].

Ein Vergleich der Dimensionen – z.B. 50 nm dünner Wasserfilm und 50 μm tiefer Schliff, d.h. 1:1000 – belegt, dass im hier betrachteten Temperaturbereich die Kapillarkräfte vernachlässigt werden dürfen.

3. Den physikalischen Ursachen auf der Spur

In der Lehre von Reibung, Verschleiß und Schmierung (Tribologie) gibt es zwei elementare Ansätze, um die Wechselwirkungen von Wasser zwischen Oberflächen zu verstehen. Bei beiden Ansätzen sind Druck und Gleitgeschwindigkeit die wichtigsten Größen. Im ersten Ansatz wird die Reibung in Abhängigkeit von Druck mal Gleitgeschwindigkeit ($p \cdot v$) betrachtet. Druck entsteht, wenn der Skifahrer den Ski in den Schnee presst und Körpergewicht multipliziert mit der Gravitationskonstanten wirken. Diese Kraft verteilt sich unter dem Ski und es entsteht eine reale Kontaktfläche. Betrachtet man $p \cdot v$ einheitenmäßig, so erkennt man, dass Watt pro Quadratmeter entsteht. Das Produkt $p \cdot v$ ist also eine Leistungsdichte, d.h. die Reibleistungsdichte. Da bei der Reibung die meiste Leistung in Wärme umgewandelt wird, nimmt die Wasserfilmdicke mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit oder schwererem Skifahrer zu. Somit wird klar, dass die Reibleistungsdichte ebenfalls erhöht werden kann, wenn die Kontaktfläche zwischen Ski und Schnee kleiner wird. Da am Schnee nichts gemacht werden kann, bleibt einzig der Skischliff übrig, um mehr Wasser zu erzeugen.

Durch den zweiten Ansatz der Druck-Gleitgeschwindigkeitsbetrachtungen wird deutlich, dass der Reibleistungserhöhung Grenzen gesetzt sind. Anstelle des Produkts von p und v wird jetzt der Quotient v/p betrachtet. Eine Aufzeichnung der Reibung als Funktion von v/p wird in der Tribologie Stribeckkurve genannt und geht auf Messungen von Richard Stribeck zurück, die er 1902 an geschmierten Gleitlagern unternahm [3].

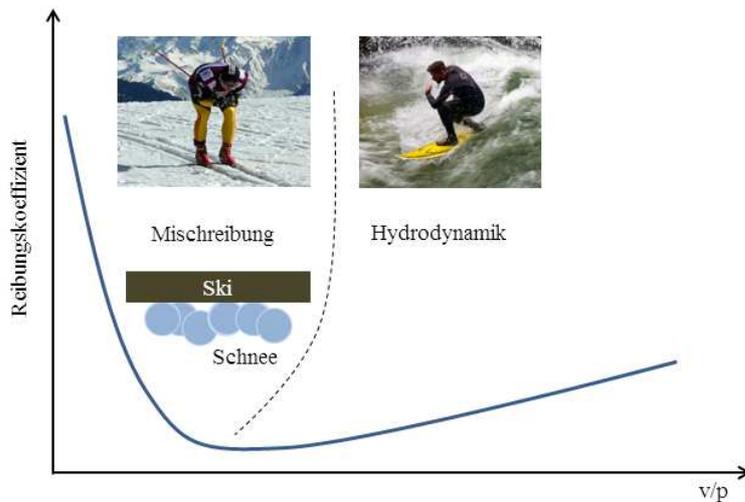


Bild 4: Stribeckkurve, die den Reibungskoeffizienten in Relation zum Quotient aus Gleitgeschwindigkeit und Druck bringt [4].

Wie Bild 4 zeigt, findet das Skifahren im Bereich der Mischreibung statt. Zu kleineren Reibwerten kann man gelangen, wenn entweder die Geschwindigkeit erhöht und/oder der Druck auf den Ski verringert wird. Zwar nimmt mit höherem $p \cdot v$ die Wassermenge zu, aber der Wasserfilm wird mit steigendem Druck schneller aus dem Reibkontakt gedrückt und steht nicht mehr als Schmiermittel zur Verfügung. In den Bereich der Hydrodynamik kommt man als Skifahrer nicht, da die Ski zu wenig Fläche haben. Dieser Bereich – das Aquaplaning – ist den Surfern vorbehalten.

$p \cdot v$ und v/p sind also zwei Seiten einer Medaille, die unterschiedliche Mechanismen ansprechen. Die gegenläufigen Effekte – Wasserfilmerhöhung durch Reibleistungserhöhung und Wasserfilmverringering durch Herausquetschen – machen das Finden des Optimums sehr schwer. Für das Finden dieses Optimums gibt es bisher keine Berechnungsmöglichkeit, hierzu muss getestet werden.

4. Mythenjagt

4.1 Die Drainagewirkung des Schliffs

Wenn bei Temperaturen um null Grad zu viel Wasser im Schnee vorhanden ist, würde jegliche Reibleistungserhöhung zu noch mehr Wasser führen und den Saugeffekt weiter verstärken. Ein effektives Mittel zur Verringerung des Saugeffekts, d.h. der Kapillarkraft, ist das Vermeiden der Benetzung großer, zusammenhängender Areale durch das Einbringen von Schleifriefen. An den Riefen stoppt die seitliche Ausbreitung des Wassers, wenn der Ski sich im Schnee bewegt. Je tiefer die Riefen sind, desto besser funktioniert die Barriere. Da allerdings tiefere Riefen mit vergrößerter Riefenbreite einhergehen, sind der Vertiefung der Riefen Grenzen gesetzt. Einen weiteren Grund, die Riefen nicht zu breit werden zu lassen, ruft die Schneekorngröße hervor. Es besteht die Gefahr, dass sich bei losem Schnee Körner in den Belag setzen und die Fahrt verlangsamen.

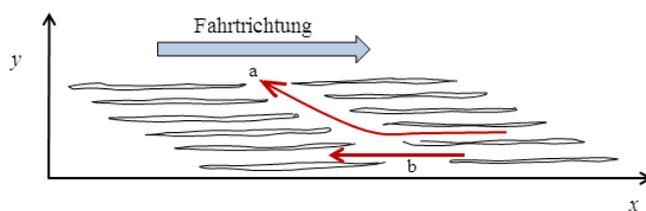


Bild 5: Schleifriefen.

Im oberen Teil von Bild 1 gewinnt man zunächst den Eindruck, dass der Skibelag nach dem Schleifen nach außen gerichtete Kanäle aufweist. Bild 5 greift diesen Effekt nochmals auf und zeigt, dass bei einer Kreuzstruk-

tur die Schleifscheibe periodisch in den Skibelag eingreift und Schleifriefen gefolgt von unbearbeiteten Zwischenräumen erzeugt. Somit ist der Ausbreitung eines großen Kapillarhalses auch in Fahrtrichtung Grenzen gesetzt. An jedem Übergang von Schleifriefe zu unbearbeitetem Skibelag reißt der Film ab. Es gibt allerdings keinen vernünftigen physikalischen Grund, warum das Wasser den Weg „a“ beschreiten soll, also aus der Fahrtrichtung abbiegend zum Rand des Skis läuft, um eine Drainagewirkung zu erzielen. Der landläufige Vergleich mit einem wasserverdrängenden Reifen ist daher falsch, da das Wasser immer entlang „b“ laufen wird.

4.2 Feine Schriffe gegen das Verhaken

Bei sehr kaltem Schnee sind die einzelnen Schneekörner untereinander stark verbunden und unbeweglich und es kommt das Gefühl auf, dass man Sand anstelle von Schnee unter dem Ski hat. Potenziert wird dieses Gefühl, wenn die Schneekörner klein und eckig sind und sich an vielen Stellen in den Skibelag bohren, siehe Bild 6. Das Eindringen in den Skibelag bedeutet physikalisch, dass ein Druck entsteht, also Kraft pro Fläche wirkt. Dieser Druck kann verringert werden, indem man die Schneesorte wechselt und auf runden, großen Körnern gleitet. Der Druck kann aber auch verringert werden, wenn der Ski ebener gemacht und die Last über größere Flächen verteilt wird. Diesen optischen Eindruck vermittelt ein fein geschliffener Ski, wie er in Bild 1 zu sehen ist.

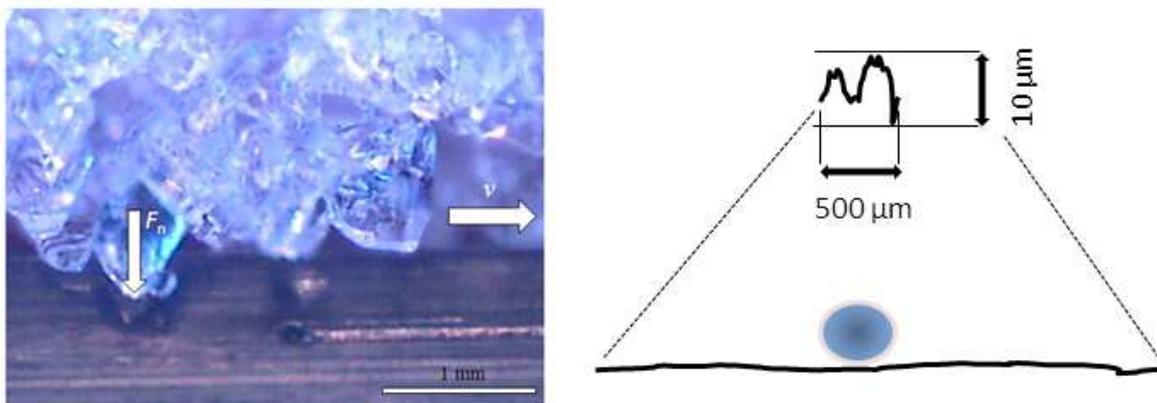


Bild 6: Links: Schnee bei -10°C . F_n ist die Kraft pro Schneekorn und v ist die Gleitgeschwindigkeit. Rechts: Profil eines kleinen Ausschnitts eines Skibelags. Die Fahrtrichtung verläuft senkrecht zur Blattebene [5].

In Bild 6 rechts ist ein kleines Stück Skischliff mit Schleifriefen gezeigt, wie man es bei einer Profilmessung erhält. Die Darstellung ist verzerrt, da in vertikaler Richtung nur $10\ \mu\text{m}$ dargestellt sind, in horizontaler Richtung aber $500\ \mu\text{m}$. Wird das Profil entzerrt, wie es im unteren Teil des Bildes zu sehen ist, erkennt man, dass es keinen Grund für ein Verhaken oder Verklemmen einzelner Schneekörner im Schliff gibt.

Löst man sich von der mechanistischen Vorstellung des Verhakens und sucht die Antwort durch Betrachtung der wirkenden Reibleistung wird klar, dass durch den Schliff auch die Kontaktfläche verringert werden kann. Die Reibung konzentriert sich dann an wenigen Stellen, die Reibleistung (Leistung pro Fläche) steigt und die größere Energie wird in die Bildung des Wasserfilms investiert. Der Ski wird wieder schneller. Genau diesen Effekt findet man durch die detaillierte Analyse der realen Kontaktfläche der Beläge in Bild 1. Es zeigte sich in der Tat, dass der feinere Schliff die kleinere Kontaktfläche aufweist und somit zu einer höheren Reibleistungsdichte führt, in deren Folge mehr Wasser für das Gleiten entsteht. Die kleinere Kontaktfläche resultiert natürlich auch in verringerter Angriffsfläche für die Schneekörner. Das ist aber ein Nebeneffekt.

4.3 Extremsituationen

Es gibt Wetter- und Schneebedingungen, bei denen man entgegen den vorherrschenden Regeln reagieren muss. Wenn der Schnee zum Beispiel sehr nass ist, sind die einzelnen Körner frei beweglich. Bei derartigen Bedingungen verringert ein tiefer Schliff zwar die Saugkräfte, bietet aber besonders bei kleinen Körnern viel Raum für das Einlagern von Schneekörnern in den Belag. Als Resultat steigen reale Kontaktfläche sowie Reibung. Die Schliffauswahl muss daher sowohl die Schneetemperatur, seine Feuchte als auch die Schneekorngröße berücksichtigen, wie es Bild 7 zeigt.



Bild 7: Schnee bei 0°C.

Die Verwendung von feinen Strukturen bei kaltem Schnee kann bei bestimmten Bedingungen auch für Probleme sorgen. Handelt es sich z.B. um losen, verwehten Schnee, können sich die Schleifriefen vollsetzen, die reale Kontaktfläche steigt und die Reibung nimmt zu. Verstärkt wird dieser Effekt, wenn die einzelnen Schneekörner eckig sind. Dann hat man das Gefühl, auf Sand zu fahren. Auch hier hilft der mikroskopische Blick in den Schnee, der zur Auswahl eines gröberen Schliffs auffordert.

5. Zusammenfassung

Der Auswahl des geeigneten Schliffs muss eine detaillierte Analyse der äußeren Bedingungen vorausgehen. Schneetemperatur, Schneefeuchte sowie ein mikroskopischer Blick in den Schnee sind Grundvoraussetzungen für den Erfolg. Die landläufigen Faustregeln sind grundsätzlich richtig. Allerdings wurde im Artikel deutlich, dass die physikalischen Ursachen andere sind. Zu den Widersprüchen führt vor allem eine mechanistisch geprägte Sicht der Reibvorgänge. Zielführender ist die energetische Sichtweise, die die Frage stellt, welche Reibleistung im Gleitkontakt entsteht. Mechanistische Vorstellungen sind sehr instruktiv, leicht zu erfassen aber in der Regel falsch, da sie Veränderungen der Reibkörper – hier das Eis – nicht berücksichtigen. Daher muss bei der tribologischen Optimierung von Ski immer die Frage nach den wirkenden Kräften und realen Kontaktflächen gestellt und beantwortet werden. Beim Gleiten auf Schnee wird Reibungswärme erzeugt und diese verändert die Aggregatzustand der Schneekörner in deren Randbereich von fest über quasiflüssig zu flüssig. Die folgende Tabelle gibt eine Gegenüberstellung der mechanistischen und energetischen Sichtweisen.

Tabelle 1: Gegenüberstellung von mechanistischer und energetischer Sichtweise.

| | mechanistische Sichtweise | energetische Sichtweise |
|-----------------------|---|---|
| grober Schliff | Drainagewirkung, Abtransport des Wassers über Schleifkanäle | Verringerung der Kapillarwirkung durch tiefe Schleifriefen |
| feiner Schliff | Vermeidung des Verhakens von kleinen und eckigen Schneekörnern mit dem Skibelag | Verringerung der realen Kontaktfläche mit dem Schnee, Erhöhung der Reibleistungsdichte, Produktion von Wasser |

Quellen

- [1] 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.
- [2] Böttcher, R., Zur Tribologie von strukturierten Skibelägen auf Eis und Schnee, Shaker Verlag, 2015.
- [3] Stribeck, R., Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager, *Z. Verein. Deut. Ing.*, Vol. 46 Seite 38ff. 1341–1348 (1902).
- [4] Surferbild mit persönlicher Genehmigung von Robert Wolf.
- [5] Scherge, M., Den Mythen der Skipräparation auf der Spur, DGM Conf. on Friction and Wear Protection, 2017.

Danksagung: Vielen Dank an Dr. Reinhard Groß und Uwe Hanss für die Anregungen und Korrekturen!