



Wie sinnvoll sind Skitests?

Matthias Scherge

ARTIKELINFORMATION

Stichworte:

Skitest
Skipräparation
Statistik

KURZFASSUNG

Skitests sind notwendig, um für den Wettkampf den schnellsten Ski auszuwählen. Man unterscheidet zwischen Labor- und Feldtests. Eine Sonderform der Feldtests sind Messungen in der Halle. Bei allen drei Testmöglichkeiten gibt es Vor- und Nachteile und in jedem der Fälle sind zahlreiche Einzeltests zu absolvieren. Die Zahl der Tests kann deutlich verringert werden, wenn die Versuche optimal vorbereitet sind. Die Vorbereitung umfasst einerseits die Auswahl des geeigneten Versuchstyps und andererseits den Einsatz statistischer Hilfsmittel. Durch die Verwendung der statistischen Versuchsplanung können beide Ziele erreicht werden.

© Team Snowstorm

1. Einführung

Skitests in der Skihalle, im Feld oder im Labor werden mit dem Ziel durchgeführt, den schnellsten Ski bzgl. Belagsmaterial, Wachs oder Schliff zu finden. Alle drei genannten Möglichkeiten bieten Vorteile, aber immer auch Nachteile. Zu den Vorteilen zählen die Konstanz der äußeren Bedingungen in der Halle, die Steuerbarkeit der äußeren Bedingungen im Labor oder die zeitliche Nähe zum Wettkampf bei Feldtests. Nachteilig für alle drei Testmöglichkeiten ist der hohe Zeitaufwand bei gleichzeitig begrenzter Testkapazität, das Vorhandensein von nur einer einzigen Schneesorte konstanter Temperatur in der Halle sowie Änderungen der äußeren Bedingungen entlang der Wettkampfstrecke bei Feldtests. Daher bedürfen Skitests einer guten Vorbereitung sowie Erfahrungen zu den lokalen Gegebenheiten. Optimale Ergebnisse können erzielt werden, wenn alle drei Testmöglichkeiten sinnvoll kombiniert und die Tests mittels statistischer Versuchsplanung ausgewählt werden, um mit möglichst kleinem Aufwand maximale Information zu erhalten. In diesem Beitrag werden alle drei Testmöglichkeiten vorgestellt und bewertet. Es werden oben genannte Vor- und Nachteile detailliert betrachtet und Optimierungswege aufgezeigt.

2. Testmöglichkeiten

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Testmöglichkeiten kurz beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung zur Bewertung von Belag, Skiwachs und Skischliff eingestuft. Die Beschreibung der Feldtests konzentriert sich auf Gleitversuche und den damit verbundenen Besonderheiten. Bei den Labortests geht es um Messungen mit Tribometern.

2.1 Tests in der Skihalle

In der Skihalle wie auch im Feld werden zumeist Gleittests, wie in [1] bereits beschrieben, durchgeführt. Der typische Ablauf eines Gleittests beinhaltet die Auswahl der Gleitstrecke, das Anbringen der Start- und Zielmarkierung, siehe Bild 1, sowie das Abfahren der Strecke in definierter oder zufälliger Reihenfolge der Ski. In der Regel messen die Tester ihre Fahrzeit über eine Zeitmesseinrichtung, die an einem der Beine nahe des Stiefels befestigt wird. Die Fahrzeit wird über mehrere Gleitversuche gemittelt.

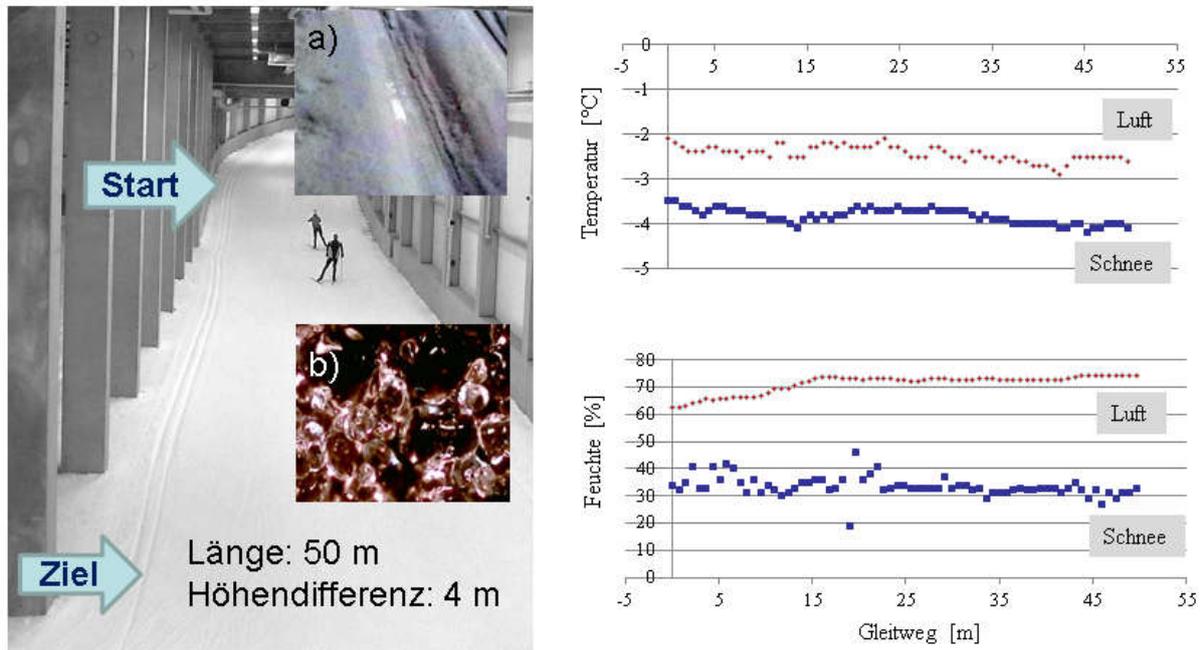


Bild 1: Skitest in der Skihalle Oberhof. Links: Abgesteckte Strecke mit Start- und Zielmarkierung. a) Fotografie der Gleitspur; b) Schneemikroskopie eines 3 mm Ausschnitts. Rechts: Temperatur und Feuchte von Schnee und Luft entlang der Gleitstrecke.

Bild 1 unterstreicht, dass in der Halle entlang der Messstrecke sehr konstante Bedingungen herrschen. Der kleine Abfall der Temperaturen ist der Höhendifferenz von 4 m geschuldet. Beide Temperaturen – Schnee und Luft – wirken sich kaum auf die für den Gleitvorgang wichtige Schneefeuchte aus. Insgesamt ist der Schnee an diesem Tag relativ feucht. Die Größe der einzelnen Körner weist darauf hin, dass der Schnee bereits einige Zeit an Ort und Stelle gelegen hat. Teilweise wirken sich lange Lagerzeiten negativ aus, da der Schnee verunreinigt ist und nicht mehr sintert. In diesem Fall hat man es mit einzelnen Körnern ohne Zusammenhalt zu tun. Die Spur zeigt Anzeichen von Vereisung, was auf Komprimierungen der Körner gefolgt von Poliereffekten hinweist.

2.2 Feldtests

Feldtests erfolgen in gleicher Weise wie die Gleittests in der Halle. Anders als in der Halle sind z.B. auf dem Gletscher verschiedene Schneesorten zu finden. Das reicht von Neuschnee bis zu abgelagertem Schnee mit sehr großen Körnern, siehe Bild 2. Darüber hinaus kann durch Wahl des Zeitpunkts (morgens oder nachmittags) bei verschiedenen Schneetemperaturen und/oder Schneefeuchten getestet werden. Die Schneesorten in Bild 2 umreißen die große Bandbreite äußerer Bedingungen.

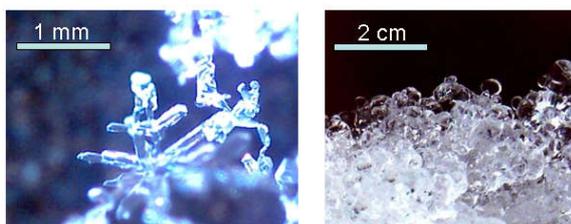


Bild 2: Schneesorten. Links: Neuschnee mit Stäbchenstruktur. Rechts: Ablagerter Schnee (Dachstein, Juni) mit sehr großen runden Körnern.

2.3 Tests im Labor

Im Gegensatz zu den Gleittests in der Halle oder im Feld kann mit Labortests der Reibungskoeffizient zwischen Ski (bzw. Skiprobe) und Schnee exakt ermittelt werden. Der Reibungskoeffizient setzt den Gleitwiderstand in Relation zur Gewichtskraft. Der Reibungskoeffizient zwischen Schuh und Pflaster liegt bei ca. 0,5. Gleitet man auf Schnee, verringert sich der Reibungskoeffizient auf 0,05 und wechselt man auf Schlittschuhe, kann er 0,005 betragen [2, 3], siehe Bild 3.

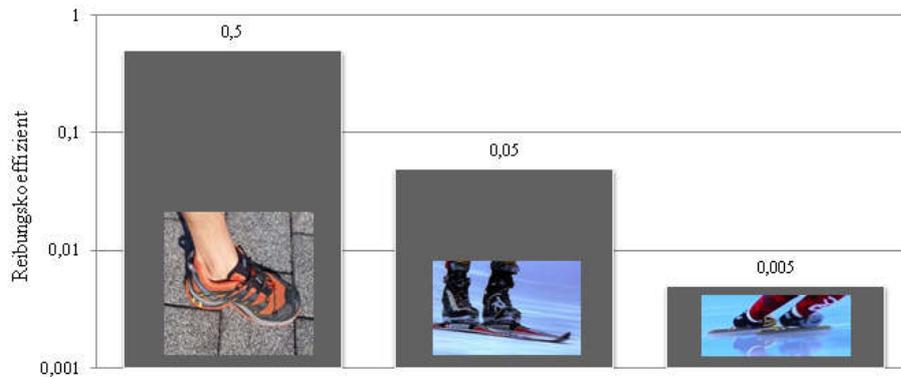


Bild 3: Reibungskoeffizienten in logarithmischer Darstellung.

Zur Messung der Reibung auf Eis und Schnee benötigt man hochauflösende Messgeräte, sogenannte Tribometer. Das Prinzip eines solchen Messgeräts ist in Bild 4 gezeigt.

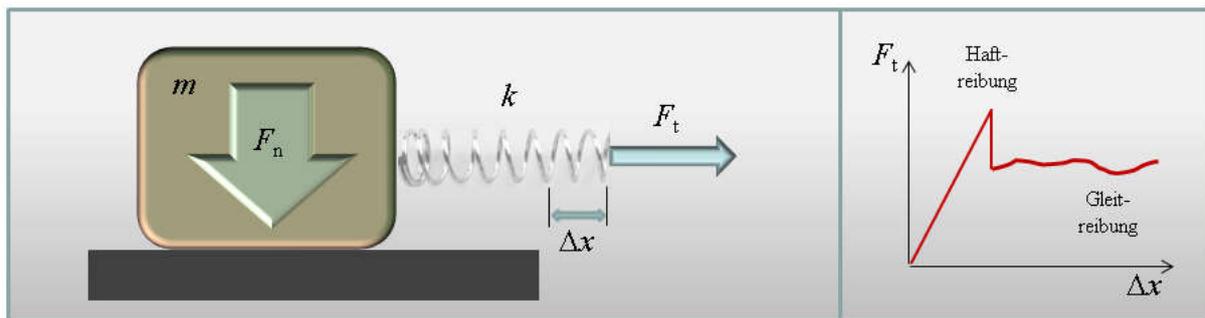


Bild 4: Links: Prinzipieller Aufbau eines Reibungsmessgeräts. Rechts: Reibverlauf.

Durch die Erdanziehung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) wird die Masse m senkrecht nach unten gezogen, es entsteht die Normalkraft $F_n = mg$. In derselben Richtung wirken auch Beschleunigungen beim Durchfahren einer Mulde oder die Saugkräfte bei nassem Schnee. Bei horizontaler Bewegung wirkt senkrecht zu dieser Kraft die Reibung, indem sie die Bewegung der Masse erschwert. Befindet sich die Masse in Ruhe, so muss zunächst die Haftreibung überwunden werden. Ist das geschafft, wirkt die Gleitreibung. Indem an der Feder gezogen wird, entsteht die Tangentialkraft F_t . Ab einer bestimmten Federdehnung Δx , die man im einfachsten Fall mit einem Lineal messen kann, startet die Masse ihre Bewegung. Jede Feder hat eine bekannte Federkonstante, so dass mittels $F_t = k \Delta x$ sowohl Haft- als auch Gleitreibungskraft exakt ermittelt werden können. Dividiert man jetzt noch die Tangentialkraft durch die Normalkraft, erhält man den Reibungskoeffizienten μ . Aufgrund von Rauheiten in der Kontaktstelle von Masse und Untergrund, bzw. Ski und Schnee oder ungleichmäßig wirkender Saugkraft, kann die Reibungskraft schwanken, siehe Bild 4 rechts.

Das gezeigte Prinzip zur Messung der Reibung wird in der Technik unterschiedlich umgesetzt. Im Labormaßstab existieren Tribometer, bei denen ein Reibkörper (z.B. eine Skibelagsprobe) entweder geradlinig oder auf einer Kreisbahn über Schnee oder Eis gleitet. Bei diesen Geräten kann die Normalkraft in einem Bereich variiert werden, der typisch für Langlauf oder Alpin ist. Die erreichbaren Gleitgeschwindigkeiten liegen im Bereich zwischen 1 und 2 m/s [4, 5], siehe Bild 5 links. Es gibt aber auch Tribometer, die bei weit höheren Geschwindigkeiten betrieben werden können. Mit dem Skitribometer im finnischen Vuokatti, siehe Bild 5

rechts, können langlauftypische Geschwindigkeiten erreicht werden. Mit dem 27 Meter langen Tribometer im Technologiezentrum Ski- und Alpinsport GmbH in Innsbruck können Höchstgeschwindigkeiten von bis zu 100 Stundenkilometern erreicht werden [6]. Bei Fraunhofer IWM in Karlsruhe wurden mit einem trommelförmigen Tribometer mit einem Durchmesser von 4 m Gleitgeschwindigkeiten von bis zu 150 km/h gefahren [3]. Mittels miniaturisiertem Tribometer konnten bereits Gleitgeschwindigkeiten bis zu 250 km/h erreicht werden [7].

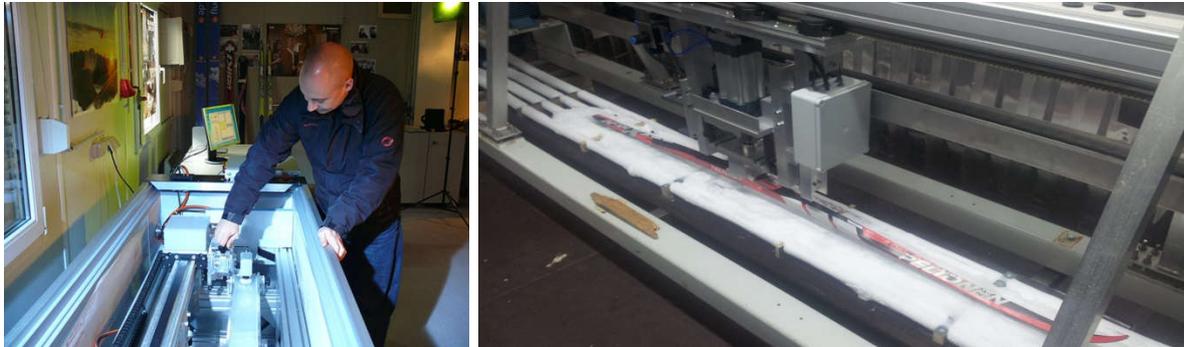


Bild 5: Links: Tribometer bei Fraunhofer IWM mit einem Gleitweg von 1,5 m. Rechts: Großtribometer in Vuokatti mit einem Gleitweg von 10 m.

3. Versuchsgestaltung

Neben einer Vielzahl von Einflussgrößen, wie z.B. Skilänge, Skispannung, Athletengewicht, usw., haben Wachs, Schliff und Belag den größten Einfluss auf das Gleitverhalten. Die Bewertung von nur 3 Wachs-, 3 Schliff- und 3 Belagsvarianten erfordert bereits 27 Tests. Die Entscheidung, ob in Skihalle, Feld oder Labor getestet werden soll, führt zu weiteren Variablen. Soll mit allen 3 Möglichkeiten getestet werden, geht es um 81 Versuche, ohne notwendige Wiederholungen. Aus dieser Zahl erkennt man, dass Optimierungen notwendig sind. Um eine erste Klassifizierung der Testmöglichkeiten zu erhalten, zeigt Tabelle 1 Vor- und Nachteile der einzelnen Tests. Dieser Abschnitt geht daher auf Kombinationsmöglichkeiten ein. Zunächst wird gezeigt, ob und wie die Tests kombinierbar sind. Danach wird eine optimale Testreihenfolge skizziert und schließlich das Werkzeug der statistischen Versuchsplanung eingeführt.

3.1 Kombination der Testmöglichkeiten

Mit Hilfe von Tab. 1 sollen zunächst die Testarten gegenübergestellt werden, um Vor- und Nachteile zu erfassen. Bei der Variation der Testbedingungen schneidet mit Abstand das Labor, also das Tribometer am besten ab. Hier können unterschiedliche Schneearten simuliert werden. Darüber hinaus können die Feuchten und Temperaturen über einen großen Bereich variiert werden. Selbst das Fahren von Temperaturintervallen ist möglich, um realistische Bedingungen im Test zu simulieren.

Tabelle 1: Vergleich der einzelnen Testmöglichkeiten.

	Skihalle	Feld	Labor
Konstanz der äußeren Bedingungen	sehr gut	teilweise schlecht	sehr gut
realistische Bedingungen	ja, in engem Bereich	ja	bedingt
Wiederholbarkeit	sehr gut	mittel	exzellent
Wachsbewertung	eingeschränkt	gut	sehr gut
Belagsbewertung	sehr gut	gut	exzellent
Schliffbewertung	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Screenings	aufwändig	aufwändig	einfach, schnell
Kosten	hoch	hoch	moderat

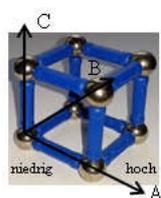
Nachteilig ist natürlich die Beschränkung auf kleinere Gleitkörper, wobei diese deutlich schneller zu präparieren sind als komplette Ski. Aus den genannten Vor- und Nachteilen lässt sich ableiten, dass Labortests sehr effektiv für das Auswählen von potenziellen Favoriten aus einer Vielzahl von Proben eingesetzt werden sollten. Ist die Anzahl der vielversprechenden Kandidaten erfolgt, können sich Feldtests anschließen, wobei sich die Tests in der Halle auf einen bzgl. der Schneetemperatur mittleren Bereich beschränken. Das bedeutet, dass sowohl Schliffe als auch Wachse, die für den Nassbereich entwickelt wurden, nicht umfassend getestet werden können. Feldtests hingegen können über die Wahl des Messorts sowie der Messzeit einen sehr großen Parameterbereich abdecken.

3.2 Optimierung der Teststrategie

Um die Vielzahl von Tests zu begrenzen, kann das Werkzeug der statistischen Versuchsplanung eingesetzt werden. Zuvor ist es aber sinnvoll, die Tests gründlich zu durchdenken. Hierzu gehören die Identifizierung der wichtigsten Einflussfaktoren, die Bewertung dieser Einflüsse und die Festlegung der Reihenfolge der Tests. Für das Gleitverhalten der Ski sind fraglos Wachs, Skibelagsmaterial sowie Skischliff die mit Abstand wichtigsten Einflüsse. Das Wachs erhöht die Wasserabweisung der Ski. Somit bestimmt es die Benetzbarkeit. Eine geringe Benetzbarkeit – gut für das Gleiten – erfordert einen Kontaktwinkel größer 120° , während der Gleitwiderstand bei Kontaktwinkeln kleiner 80° merklich zunimmt, der Ski saugt mehr und mehr. Belagsmaterialien haben unterschiedliche Härten. Zunehmende Härte verringert das Eindringen von Schneekörnern in den Belag, der Ski wird schneller. Ist der Skibelag leicht verformbar und drücken sich die Körner ein, steigt der Scherwiderstand und der Ski wird langsam. Über den Schliff wird die Kontaktfläche zwischen Ski und Schnee eingestellt. Hier gilt die Regel, dass je geringer die Kontaktfläche ist, desto schneller der Ski gleitet.

Die Tests müssen also die drei genannten Einflussgrößen berücksichtigen. Der erste Schritt in Richtung einer statistischen Versuchsplanung besteht nun darin, die Einflussgrößen zunächst nur in jeweils 2 Stufen zu variieren, d.h. niedrige und hohe Benetzbarkeit, niedrige und hohe Belagshärte sowie kleine und große Kontaktfläche. Die Variation der Benetzbarkeit kann z.B. durch die Verwendung eines normalen Paraffins und eines fluorierten Wachses erfolgen. Die Variation der Belagshärte erfordert Kunststoffe mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduln, was durch Wahl verschiedener Zusatzstoffe (Additive) erreicht werden kann. Schließlich kann die Kontaktfläche durch das Abrichten der Schleifscheibe über weite Bereiche variiert werden (z.B. Schliff für nassen und trockenen Schnee, siehe [8]).

Abfolge	Benetzbarkeit	Verformbarkeit	Kontaktfläche	AxB	AxC	BxC	AxBxC	Lauf 1	Lauf 2	Lauf 3	Lauf 4	Lauf 5	MW
6	niedrig	niedrig	niedrig	1	1	1	-1	15,1	15	14,9	15,3	15,2	15,1
8	niedrig	niedrig	hoch	1	-1	-1	1	16,1	16,4	16	15,8	16,3	16,12
1	niedrig	hoch	niedrig	-1	1	-1	1	15,6	15,5	15,4	15,6	15,7	15,56
4	niedrig	hoch	hoch	-1	-1	1	-1	16,2	16,4	16,7	16	15,5	16,16
2	hoch	niedrig	niedrig	-1	-1	1	-1	16,9	17,7	16,9	17	17,1	17,12
5	hoch	niedrig	hoch	-1	1	-1	-1	16,5	16,4	16,1	16,5	16,4	16,38
3	hoch	hoch	niedrig	1	-1	-1	-1	16,1	16,1	16,2	16,2	16,8	16,28
7	hoch	hoch	hoch	1	1	1	1	19,4	19	18,9	17,9	17,6	18,56



A = Benetzbarkeit
B = Verformbarkeit
C = Kontaktfläche

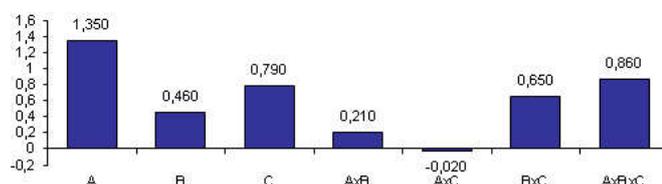


Bild 6: Statistische Versuchsplanung mit 3 Einflussgrößen (Benetzbarkeit, Verformbarkeit, Kontaktfläche). Alle 3 Einflussgrößen werden in 2 Stufen variiert, niedrig und hoch. Testbedingungen: $T_{Luft} = 0^\circ\text{C}$, $T_{Schnee} = -1^\circ\text{C}$, Luftfeuchte = 80%, Schneefeuchte (Doser) = 40%, Schneekorngröße 500 μm , Kornform rund.

Bei 3 Einflussgrößen und jeweils 2 Variationsstufen müssen 8 Versuche durchgeführt werden, um jedem Einfluss nachzugehen. Dies veranschaulicht der Würfel in Bild 6. Die Kürzel A, B und C stehen für Benetzbarkeit, Verformbarkeit und Kontaktfläche. Für die Benetzbarkeit bedeutet der Zustand „niedrig“ einen Kontaktwinkel von 125° . Der Zustand „hoch“ kennzeichnet große Benetzbarkeit und steht für einen Kontaktwinkel von 80° . Um niedrige und hohe Verformbarkeit zu realisieren können schwarze und weiße Beläge eingesetzt werden. Zur Variation der Kontaktfläche können Schleifscheiben mit unterschiedlicher

Korngröße genutzt werden. Neben den Einflüssen A, B und C müssen die Wechselwirkungen der Größen (z.B. $A \times B$) erfasst werden. Die mathematischen Grundlagen hierzu sind in [9] zu finden und sollen hier nicht wiedergegeben werden. Erwähnt soll aber werden, dass dem Zustand „niedrig“ die Ziffer -1 und dem Zustand „hoch“ die +1 formal zugeordnet wurden. Werden also die Zustände „hoch“ und „niedrig“ kombiniert, entspricht das der mathematischen Operation $+1 \times -1 = -1$. Der Zustand „niedrig“ und „niedrig“ ergibt $-1 \times -1 = +1$, usw. Für jede Variationsstufe wurden 5 Testläufe absolviert und der Mittelwert (MW) der Gleitzeit ermittelt. Die 8 Tests wurden in zufälliger Abfolge durchgeführt, um den Einfluss der Umwelt so gering wie möglich zu halten.

Aus dem Balkendiagramm in Bild 6 wird deutlich, dass bei den herrschenden Testbedingungen die wasserabweisende Wirkung des Wachses den größten Einfluss hat. Das fluorhaltige Wachs führt zur geringsten Benetzbarkeit und somit zur kürzesten Gleitzeit. Den nächstgrößeren Einfluss übt der Skischliff aus. Eine große Kontaktfläche führt auf Grund von Saugeffekten zu hoher Reibung. Die Verformbarkeit des Skibelags spielt eine untergeordnete Rolle.

Es ist interessant zu sehen, dass die gekoppelten Einflüsse A und B sowie A und C nur geringen Einfluss ausüben. Da unter den herrschenden äußeren Bedingungen der Einfluss der Nässe überwiegt, spielen sowohl die Verformbarkeit des Belags als auch die Kontaktfläche nahezu keine Rolle, da der Ski großflächig mit Wasser in Kontakt kommt. B und C im Verbund zeigen einen klaren Zusammenhang, da die Kontaktfläche den maßgebenden Einfluss hat. Abschließend zeigt sich, dass alle 3 Einflussgrößen einen signifikanten Einfluss ausüben. Somit wurden die Einflussgrößen richtig gewählt und die Tests bringen sinnvolle Aussagen.

Zusätzlich zu den erhaltenen Aussagen kann durch Einsatz weiterer statistischer Techniken, z.B. Varianzanalyse, der Datenvorrat weiter untersucht werden. Mit der Varianzanalyse kann z.B. die Streuung der Messwerte analysiert werden. Streuung gibt es immer, weil sich bei den Skitests die äußeren Bedingungen – Sonnenstand, Wind, Feuchte, ...) stetig ändern.

4. Zusammenfassung

Skitests sind auf Grund der großen Zahl von Einflussgrößen notwendige Maßnahmen, um die Gleiteigenschaften der Ski zu bestimmen. Gleichzeitig verhindert diese große Zahl auch die vollständige Testung der Ski, so dass optimiert werden muss. Optimierungshilfen sind hierbei Selektionstests im Labor mit Tribometern. Durch geeignete Versuchsplanung können sowohl Labor- als auch Feldtests optimal vorbereitet werden. Der statistische Aufwand ist begrenzt. Die Einsparung von Zeit und Material ist allerdings signifikant. Zudem steigt die Verlässlichkeit der Daten und die Anzahl der Fehlgriffe kann minimiert werden.

Quellen

- [1] Scherge, M., Wettkampfvorbereitung aus der Sicht der Skitechniker, *Gliding* 3(2016)7-11.
- [2] de Koning, J.J., de Groot, G., van Ingen Schenau, G.J., Ice friction during speed skating, *Journ. of Biomech.* 25(1992)6, 565-71.
- [3] Scherge, M., Böttcher, R., Richter, M., Gurgel, U., High-Speed Ice Friction Experiments under Lab Conditions: On the Influence of Speed and Normal Force, *ISRN Tribology*, vol. 2013.
- [4] Bäurle, L., Sliding friction of polyethylene on snow and ice, Dissertation, ETH (2006).
- [5] Böttcher, R., Scherge, M., High-speed tribometry, in Vorbereitung, 2017.
- [6] Nachbauer, W., Kaps, P., Hasler, M., Mössner, M., Friction Between Ski and Snow, *The Engineering Approach to Winter Sports*, 2016.
- [7] Böttcher, R., Zur Tribologie von strukturierten Skibelägen auf Eis und Schnee, Dissertation, Shaker Verlag, 2015.
- [8] Scherge, M., Skischliffe falsch interpretiert, *Gliding* 1(2017)1-6.
- [9] Siebertz, K., van Bebber, D., Hochkirchen, T., Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE), Springer, 2010.

Danksagung: Ein herzlicher Dank geht an die Gutachter des Beitrags Dr. Reinhard Groß und Uwe Hanss!