



Neue Perspektiven für die Skitechnologie: Biomechanische Ansätze für individuelle Skiauswahl

Matthias Scherge, 76131 Karlsruhe

Kurzfassung

Mit Hilfe von Stand- und Ganganalysen sowie der Messung der Kontaktflächen zwischen Ski und Untergrund wurde eine neue Methode zur Auswahl von Langlaufski entwickelt. Die Methode umfasst ebenfalls die Analyse der biomechanischen Fähigkeiten der Probanden und stellt somit ein ganzheitliches Auswahlwerkzeug dar.

Einführung

Ein bislang ungelöstes Problem in der Welt des Langlaufsports liegt in der Herausforderung der individuellen Auswahl von Skatingski, insbesondere in Bezug auf die Abdruck- und Gleitfähigkeit. Die Vielfalt an verfügbaren Skatingski in verschiedenen Längen, Spannungen und Kammerhöhen macht die Auswahl für jeden Sportler zu einer komplexen Aufgabe. Ein innovativer Ansatz rückt nun die biomechanischen Aspekte der Sportler ins Zentrum, um die Performance auf ein neues Niveau zu heben.

Das Herzstück dieser neuartigen Forschung liegt in der Untersuchung der realen Kontaktfläche zwischen Skibelag und Untergrund. Ziel war die Entwicklung eines Vorhersage- und Skiauswahltools, das individuelle Leistungsfähigkeit berücksichtigt und die Gesamtleistung des Langläufers optimiert.

Die nichtlineare Abhängigkeit der Kontaktfläche von Gewicht und Dynamik, kombiniert mit materialspe-

zifischen Eigenschaften, beeinflusst maßgeblich das Verhalten unter Belastung. Die Forschung zielte darauf ab, einen Zusammenhang zwischen der Art und Weise des Gangs und der Bewegung auf Ski herzustellen. Weiterhin sollte die Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit von der sich einstellenden Kontaktfläche untersucht werden. Außerdem wurde analysiert, ob die körperliche Leistungsfähigkeit und Erfahrung des Sportlers das Gleitgefühl beeinflussen.

Die erforderlichen Untersuchungen fanden im Biomechaniklabor der Firma molibso statt. Hierbei kam eine hochauflösende Druckmessplatte zum Einsatz. Die Gleitanalysen auf Schnee wurden in der Skihalle Neuss durchgeführt. Diese multidisziplinäre Herangehensweise markiert einen entscheidenden Schritt in der Evolution der Skiauswahl und verspricht eine personalisierte, leistungsorientierte Zukunft für jeden Skating-Enthusiasten.

Experimente

Auswahl der Probanden

Im Streben nach optimaler Leistungsverbesserung im Langlaufsport wurden aufwendige Bewegungsanalysen an einer Gruppe von acht Probanden durchgeführt. Das Ziel dieser detaillierten Untersuchung war die präzise Einschätzung der sportlichen Fähigkeiten, um die individuellen Einflüsse auf die Skiauswahl zu berücksichtigen.

Für die Bewegungsanalyse wurde ein Functional Kinetics Test, basierend auf einem physiotherapeutischen Konzept, angewendet. In diesem Rahmen wurden in Anlehnung an den DSV-Athletiktest spezifische Übungen identifiziert, um die Leistungsfaktoren des Langläufers zu prüfen. Hürdensteiger dienten der Charakterisierung der Koordinationsfähigkeit und des Abdruckverhaltens, Wechselsprünge ermöglichten eine Einschätzung der Balance in der Dynamik und tiefe Kniebeugen wurden zur Überprüfung von Koordination und Kraft eingesetzt.

Für die weiteren Untersuchungen wurden aus der Gruppe der acht Sportler zwei Probandinnen ausgewählt, deren Bewegungsanalyse äußerst ähnliche Ergebnisse zeigte.

Ganganalyse

Die Ganganalyse hat eine technisch neue Phase erreicht, in der das Ganganalysesystem *dyneosRUN* der Firma molibso zum Einsatz kommt [1]. Dieses innovative System, bestehend aus einer präzisen Druckmessplatte und einer darauf abgestimmten Software, eröffnet Einblicke in biomechanische Eigenheiten, die bisher unerreichbar waren, siehe Abb. 1.

dyneosRUN ermöglicht die Bewertung entscheidender Indikatoren für das Gehen und Laufen, darunter die Neigung zum Vorfuß-, Mittelfuß- oder Fersenlaufen. Zudem werden die Fortbewegungsmuster als Neutralfußläufer, Supinierer oder Überpronierer kategorisiert. Diese präzisen Messungen wurden auch durchgeführt, um das Abrollverhalten und die Gangstabilität der Testpersonen zu untersuchen.

Während der Ganganalyse bewegt

sich die Testperson in einem normalen Schrittempo von etwa 3 bis 5 km/h über die Sensorfläche des Systems. Die Platte, bestückt mit insgesamt 15.360 hochsensiblen, kapazitiven Kraftsensoren, registriert die Druckbelastung. Diese Kräfte werden in Echtzeit ausgelesen und dem Bediener auf dem Bildschirm als präzise Druckinformationen präsentiert. Nach nur 10 Sekunden ist die Messung abgeschlossen, und ein umfassendes Bild mit bis zu 64 Einzelparametern der biomechanischen Abläufe während des Gehens liegt vor.

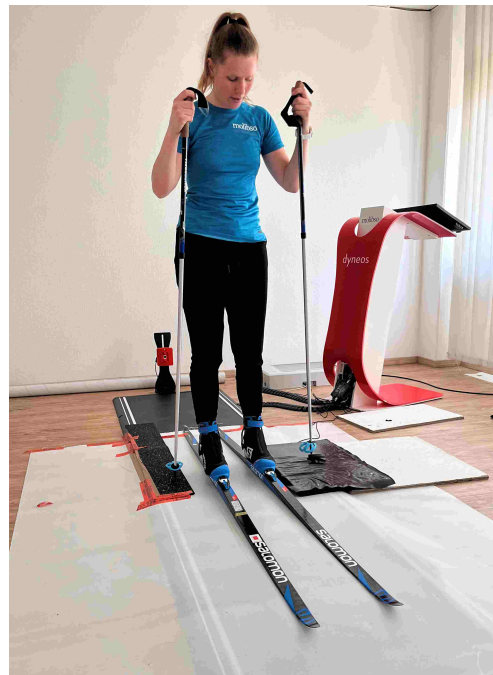


Abb. 1: Testaufbau. Die Druckmessplatte ist von einer Gleitfolie bedeckt. Das Abstoßen erfolgte auf Antirutschmatten. Mittels Kamera hinter der Läuferin wurde die Bewegung aufgezeichnet.

Die Anwendung von *dyneosRUN* eröffnet nicht nur neue Dimensionen in der Ganganalyse, sondern legt auch den Grundstein für personalisierte Erkenntnisse zur Optimierung von Lauftechniken und zur Vorbeugung von Verletzungen. So lassen sich zum Beispiel frühere Kreuzbandverletzungen erkennen und durch eine geeignete Versorgung mit Einlage und Schuh adressieren. Zeigt ein Proband etwaige biomechanische Veranlagungen für derartige Verletzungen, kann ebenfalls proaktiv eingegriffen werden.

Der Verlauf des Center of Pressure (CoP) wird als Abrolllinie dargestellt, wobei der ideale Verlauf von der Mitte der Ferse über die Mitte des Vorfußes bis hin zum Abdruck von der Großzehe reicht. Diese Abrolllinie ist von zentraler Bedeutung, um

die Gangbewegung präzise zu verstehen. Anhand der Belastungslinie können Unsicherheiten während der Standphase sowie Unregelmäßigkeiten im rechts-links-Vergleich aufgedeckt werden.

Skianalyse

In dieser Untersuchung wurden insgesamt acht Paar Skier mit unterschiedlichem Ausdrückgewicht einer umfassenden Charakterisierung unterzogen. Anlage A listet die Daten zu den Ski auf. Diese Analyse, bestehend aus drei statischen Messungen, lieferte detaillierte Einblicke in das Verhalten der Skier unter verschiedenen Bedingungen.

Die Druckmessplatte, ausgestattet mit einer Dyneema-Folienbahn zur Reibungsreduktion, bildete die Grundlage für die Messungen. Jedes der acht Skipaare wurde dreimal statisch vermessen, während die Testperson mit Langlaufschuhen und Ski exakt positioniert auf der Platte stand. Markierungsstreifen gewährleisteten dabei die Parallelität der Ski. Die genaue Standposition auf der Messfläche wurde akkurat markiert, um eine konsistente Ausgangsposition zu sichern. Die Testperson hielt dabei eine möglichst gerade Körperhaltung bei, mit dem Blick nach vorne gerichtet. Insgesamt ergaben sich somit 24 Datensätze pro Testperson, bestehend aus den Parametern Kontaktfläche, Druck und Kraft.

Neben dem statischen Verhalten der Skier wurde auch ihr dynamisches Verhalten unter die Lupe genommen. Das Gleiten über die Platte wurde durch einen initialen Doppelschub eingeleitet.

Gleitversuche auf Schnee

Die Gleitversuche wurden in der Skihalle Neuss durchgeführt, um die Performance jedes Skimodells unter realen Bedingungen zu evaluieren. Jedes Modell wurde dabei dreimal von beiden Testpersonen getestet, um eine umfassende und vergleichbare Datengrundlage zu gewährleisten.

Die Auswertung erfolgte durch die präzise Aufzeichnung jedes Laufs mittels Videoaufnahmen von einem vordefinierten Startpunkt aus. Mithilfe des Programms *Tracker* wurde je-

des Video in einzelne Frames zerlegt. Durch die Platzierung von Trackpunkten an den Fußspitzen der Testpersonen konnte die Zeit beim Überqueren der Ziellinie präzise abgelesen werden. Ein spezielles Koordinatensystem, das in die Analysesoftware integriert ist, ermöglichte zudem die genaue Bestimmung des Gefälles der Teststrecke, das sich auf etwa 14 % beläuft. Für das Zurücklegen der Strecke ohne initialen Stockeinsatz wurden Zeiten zwischen 4,74 s und 5,03 s gemessen.

Ergebnisse

Stand- und Gangbilder

Die Standanalysen der Testpersonen offenbarten deutliche Unterschiede in der Druckverteilung. Bei Testperson 1 wurde eine erhöhte Belastung in der Ferse festgestellt, während der Vorfuß insgesamt weniger beansprucht wurde. Interessanterweise zeigte der linke Vorfuß erhöhten Druck im Bereich des Großzehengrundgelenks, mit zusätzlichem Druck unter der Großzehe. Der rechte Fuß wies einen leichten medial verschobenen Druckpunkt in der Ferse auf, während der höchste Druck im Vorfußbereich im Bereich des dritten Zehengrundgelenks lag. Im Zehenbereich wurde Druck im distalen Bereich der Großzehe und der dritten Zehe beobachtet, begleitet von einer leichten Ausrotation des rechten Fußes. Der Mittelfuß generierte keinen Druck, siehe Abb. 2.

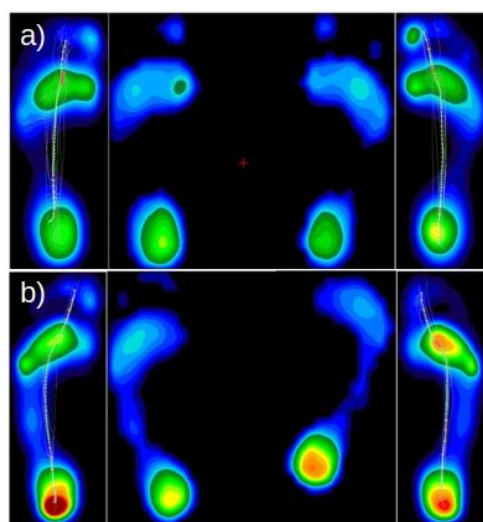


Abb. 2: Stand- und Ganganalyse beider Probandinnen. a) Testperson 1. b) Testperson 2. In den Gangbildern erkennt man den Verlauf des CoP.

Die Ganganalyse vertiefte das Verständnis der dynamischen Druckver-

teilung. In der Ferse entstand Druck, wobei der Fersenaufsatz zentral war und die Ganglinie mittig über den Fuß verlief, um im Bereich der zweiten Zehe zu enden. Eine Verzögerung der Abrollbewegung im Vorfußbereich wurde festgestellt. Der rechte Fuß zeigte einen leicht nach medial verschobenen Fersenaufsatz und eine Tendenz, die Ganglinie mehr über die Großzehe zu führen. In der Dynamik wurde bei beiden Füßen der äußere Teil des Mittelfußes sichtbar.

In der Standanalyse von Testperson 2 wurde links ein erhöhter Druck in der Ferse festgestellt, begleitet von einem Druck entlang der Außenkante des Mittelfußes. Interessanterweise ist der Druck im Vorfußbereich lateral verlagert, wobei der höchste Druck im Bereich der dritten und vierten Zehengrundgelenke auftritt. Sichtbar sind partiell drei Zehen. Der rechte Fuß zeigt einen erhöhten Druck in der Ferse, der leicht nach posterior verlagert ist. Die Außenkante des Mittelfußes erzeugt ebenfalls Druck, wobei der maximale Druck zwischen dem dritten und vierten Zehengrundgelenk auftritt. Der rechte Fuß ist insgesamt nach ventral verlagert und lateral rotiert, wobei keine Zehen im Zehenbereich sichtbar sind.

In der Ganganalyse zeigt sich im linken Fuß ein erhöhter Druck in der Ferse mit zentralem Fersenaufsatz. Die Außenkante des Mittelfußes ist sichtbar und die Ganglinie verläuft nach lateral. Im Vorfußbereich verläuft die Ganglinie über das Grundgelenk der dritten Zehe und endet im proximalen Ende zwischen Groß- und zweiter Zehe. Die fünfte Zehe erzeugt keinen Druck. Im rechten Fuß ist der Fersenaufsatz zentral mit erhöhtem Druck. Die Außenkante des Fußes ist im Mittelfußbereich sichtbar und die Ganglinie verläuft ebenfalls nach lateral. Im Vorfußbereich liegt der höchste Druck auf dem Grundgelenk der dritten Zehe, wobei die Ganglinie an diesem Punkt eine Verzögerung erfährt. Die Ganglinie verläuft über die Großzehe und endet am proximalen Ende dieser Zehe.

Bestimmung der Kontaktfläche der Ski im Stand

Die detaillierte Betrachtung der Ski-

modelle, in Abb. 3 repräsentativ für Ski *d* gezeigt, offenbarte bei der statischen Untersuchung Unterschiede in den Kontaktflächen. Während Testperson 1 eine Kontaktfläche von 223,54 cm² erzeugte, bildete sich bei Testperson 2 eine deutlich kleinere Fläche von 177,36 cm² aus. Dieser Unterschied lässt sich nicht allein durch den geringen Gewichtsunterschied von 2 kg zwischen den Testpersonen erklären.

Bei genauerer Betrachtung der Stand- und Ganganalyse wird deutlich, dass Testperson 2 eine klare Tendenz zu einem Stand und Gang über die Fußaußenkante (Supination) zeigt. Diese Supinationstendenz führt zu einer verstärkten Belastung der Skier an der Außenkante. Im Gegenzug wird die Innenseite der Ski wenig belastet und trägt somit kaum zur Kontaktfläche bei. Die Skiinnenseiten erfahren keinen oder einen wesentlich geringeren Druck im Vergleich zur äußeren Kante. Der Druck, den die Außenkanten verursachen, ist bei Testperson 2 größer als bei Testperson 1.

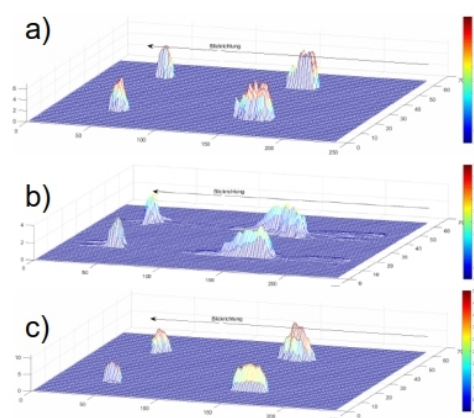


Abb. 3: Analysen beider Probandinnen mit Ski. a) Testperson 1 stehend. b) Testperson 1 gleitend. c) Testperson 2 stehend

Diese Feinheiten in der Analyse der individuellen Stand- und Gangmuster unterstreichen, dass die Kontaktfläche nicht allein durch das Gewicht beeinflusst wird, sondern vielmehr durch die spezifischen biomechanischen Eigenschaften der Testpersonen. Die Erkenntnisse bieten nicht nur einen tieferen Einblick in die Skimodell-Performance, sondern legen auch den Grundstein für eine personalisierte Herangehensweise bei der Skiauswahl, um die individuellen Anforderungen und Bewegungsmuster optimal zu berücksichtigen.

Bestimmung der Kontaktfläche beim Gleiten

Wenn ein Gleitvorgang auf der Platte durch einen Doppelstockschub eingeleitet wurde, veränderte sich das Druckverteilungsbild dementsprechend. Abbildung 3 b) zeigt diesen Fall. Es zu erkennen, dass sich die Kontaktfläche, besonders im hinteren Bereich des Skis deutlich vergrößert.

Gleiten auf Schnee

Die folgenden Diagramme, siehe Abb. 4 und 5 veranschaulichen die Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit vom Ausdruckgewicht und von der gemessenen Kontaktfläche. Die Diagramme zeigen die Werte von Testperson 1. Was zuerst auffällt ist der nahezu lineare Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Ausdruckgewicht. Die Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit von der Kontaktfläche fällt nicht so deutlich aus. Hier fallen Ski c und vor allem Ski e aus dem Rahmen.

Schaut man sich die Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeiten von der Kontaktfläche für beide Testpersonen an wird deutlich, dass Testperson 2 die kleineren Werte erzeugt. Der Unterschied ist so groß, dass es wertemäßig keine Überlappung in den Kontaktflächen gibt. So reichen die Werte der Kontaktfläche von Testperson 2 von ca. 150 cm² bis ca. 200 cm² und von Testperson 1 von etwas mehr als 200 cm² bis etwa 255 cm². Trotz dieser deutlichen Trennung und den signifikant geringeren Kontaktflächen bei Testperson 2, kann diese keine größeren Gleitgeschwindigkeiten erreichen. Bei beiden Testpersonen erzeugt Ski g die geringste Gleitgeschwindigkeit. Im Bereich der höheren Gleitgeschwindigkeiten erhält man ein gemischtes Bild. Die Streuung der Gleitgeschwindigkeiten von Testperson 1 ist geringer als bei Testperson 2 und tendenziell zu höheren Werten verschoben.

Diskussion

Die Diskussion fokussiert sich auf die erzielten Gleitgeschwindigkeiten. Hierzu wird sich auf Testperson 1 konzentriert und exemplarisch Ski f und g betrachtet. Beide Ski markieren die Extreme auf der Skala der Ausdruck-

gewichte. So besitzt Ski f mit 102 kg das größte (nur übertroffen von Ski h mit 1 kg mehr) und Ski g das kleinste Ausdruckgewicht mit 69 kg. Beide Probandinnen befinden sich körpergewichtsmäßig im nahezu selben Bereich, so dass davon auszugehen ist, dass beide den Ski g zu stark durchdrücken. Die Messungen der Kontaktflächen haben dies eindeutig belegt.

Aufklärung bedarf allerdings das Verhalten von Ski e, welcher die größte Kontaktfläche erzeugte, aber im oberen Bereich der Gleitgeschwindigkeiten eingeordnet wurde. Wenn man sich in Anlage 2 die Verteilung der Kontaktflächen hinten und vorn der Ski f und e anschaut fällt auf, dass Ski e im vorderen Bereich mehr Fläche erzeugt. Mehr Fläche bedeutet einen geringeren Druck auf die Schaufel, was vor allem bei weichem Schnee zu geringerem Einsinken führt. Da der Schnee in der Skihalle als eher weich einzustufen war, erzeugt ein kleinerer Schaufeldruck eine eher höhere Gleitgeschwindigkeit.

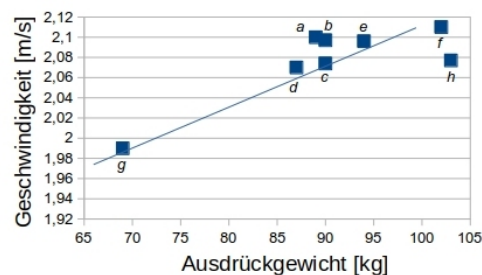


Abb. 4: Gleitgeschwindigkeiten der Testperson 1 in Abhängigkeit vom Ausdruckgewicht (oben) und der Kontaktfläche (unten).

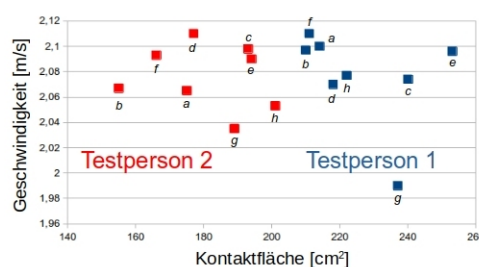
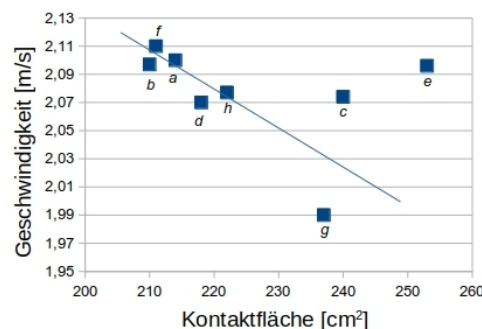


Abb. 5: Vergleich der Gleitgeschwindigkeiten beider Testpersonen.

Der Umstand, dass Testperson 2 trotz geringerer Kontaktflächen ähn-

liche oder leicht geringere Gleitgeschwindigkeiten erzielt, kann durch das Kanten der Ski erklärt werden. Die Kantenlage zwingt den Ski in eine ungünstige Gleitposition, in der der Ski versucht einen Radius zu fahren und somit an Geschwindigkeit verliert.

Schlussfolgerungen

Einer der wichtigsten Parameter, um die Eignung eines Skatingskis zu beurteilen, ist die mit dem Schnee entstehende Kontaktfläche. Je größer diese ist, desto langsamer ist der Ski. Neben der reinen Kontaktfläche spielt die Druckverteilung, d.h. das Verhältnis von vorn zu hinten sowie rechts zu links eine große Rolle. Die vorn/hinten Verteilung bestimmt maßgeblich die Manövrierfähigkeit des Skis, während die rechts/links Verteilung das Kurvenverhalten beeinflusst. Weiterhin nimmt die Form der Druckmaxima Einfluss auf das Fahrverhalten. Wenn zum Beispiel das vordere Druckmaximum nicht die Form einer Glockenkurve aufweist, sondern nadelförmig ausfällt, besteht die Gefahr, dass die Ski sich bei weichem Schnee eingraben.

Ausgehend von der elementaren Erkenntnis, dass sich das Gangbild auf die Fahrweise überträgt, kann zielgerichtet eingegriffen werden. Als Eingriffsmaßnahmen stehen zur Verfügung:

- Korrekturen mittels Einlagen
- Korrektur mittels Bindungslage

- Auswahl der optimalen Skihärte
- Anpassungen am Schuh

Die Einschätzung der Athletik hat eine wertvolle Ausgangsbasis für die Gang- und Skianalyse erzeugt. Mit dieser Herangehensweise sollen zukünftig Wichtungsgrößen abgeleitet werden, um den Anteil der Biomechanik an der Skiauswahl besser zu berücksichtigen.

Zusammenfassung

Diese detaillierte Analyse eröffnet neue Perspektiven für das Verständnis der Performance von Skimodellen in statischen und dynamischen Situationen. Die Unterschiede in den Kontaktflächen zwischen verschiedenen Skimodellen verdeutlichen, dass die Formgebung und strukturellen Merkmale maßgeblich zur Skileistung beitragen. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten neben der Skiauswahl auch wertvolle Anhaltspunkte für die zukünftige Skimodellentwicklung und deren Optimierung, um die individuellen Anforderungen und Gleitverhalten bestmöglich zu berücksichtigen.

Danksagung

Ein herzlicher Dank geht an das gesamte Team von molibso, besonders an Beatrice Grieße, die die Messungen durchgeführt hat! Weiterhin danken wir Fabian Schöberl für die kritischen Bemerkungen und wertvollen Hinweise!

Über den Autor



Matthias Scherge ist Professor für Tribologie. Das ist die Wissenschaft von Reibung, Verschleiß und Schmierung. Prof. Scherge leitet das Fraunhofer MikroTribologie Zentrum, 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.

Quellen

- [1] Svenja List, Jens Hollenbacher, and Matthias Scherge. Doppelstocktechnik – Bewegungsanalyse und Vortrieb. *Gliding*, 2:7–14, 2019.

Anlage A: Skidaten

Ski	L [mm]	KH [mm]	G [kg]
<i>a</i>	1.870	31	89
<i>b</i>	1.920	30	90
<i>c</i>	1.920	30	90
<i>d</i>	1.920	30	87
<i>e</i>	1.920	30	94
<i>f</i>	1.920	30	102
<i>g</i>	1.820	26	69
<i>h</i>	1.920	28	103

Tab. 1: Daten der verwendeten Ski. L = Länge; KH = Kammerhöhe; G = Ausdrückgewicht.

Anlage B: Vergleich der Verteilung der Kontaktflächen.

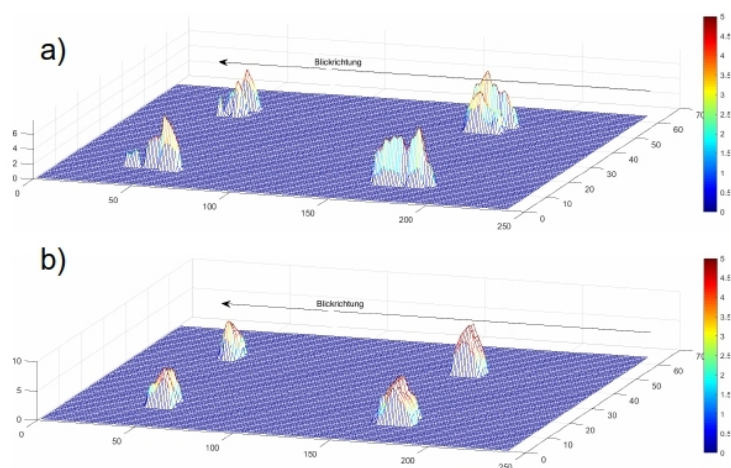


Abb. 6: Vergleich der Kontaktflächen. a) Ski e; b) Ski f.