

Mit Physik zum Sieg

Wer im Wintersport Spitzenleistungen erbringen will, muss sich die Physik zur Verbündeten machen.

von FINN BROCKERHOFF

Wenn die Ampel oben am Start der Sprungschanze auf Grün springt, heißt es für den Skispringer: 15 Sekunden lang höchste Konzentration. Jahrelang hat er auf diesen Moment hingearbeitet, Muskeln und Bewegungsabläufe trainiert und zusammen mit den Technikern in unzähligen Stunden daran gefeilt, das Equipment zu optimieren. Für den Sprung zum Sieg muss der Athlet auf der fast 100 Meter langen Anfahrt nun zum perfekten Geschoss werden.

Denn physikalisch betrachtet ist der Flug des Skispringers nichts anderes als eine ballistische Kurve – ein Kampf gegen Gravitation und Reibung, der durch Geschwindigkeit gewonnen werden kann. Annähernd 95 Stundenkilometer sind das Ziel, wenn der Sportler eine große Schanze wie jene bei den Olympischen Winterspielen in Peking hinabschießt. Sind es auch nur ein oder zwei Stundenkilometer weniger, sinkt die Chance auf das Siegeretappen bereits erheblich.

Wie entscheidend die Anfahrts- geschwindigkeit auf der Schanze für die Sprungweite ist, zeigen physikalische Simulationen des Skisprungs am Compu-

ter: Wird die Geschwindigkeit um nur einen Kilometer pro Stunde erhöht, fliegt der virtuelle Skispringer bereits vier bis sechs Meter weiter. Außerdem ergaben die Simulationen, dass bei einem Sprung unter typischen Bedingungen mehr als drei Kilometer pro Stunde an Geschwindigkeit im Anlauf – und damit über 18 Meter an Sprungweite – allein durch den Luftwiderstand bei der Anfahrt verloren gehen. Ein Ziel der Athleten ist es daher, diesen physikalischen Reibungsverlust so weit wie möglich zu verringern.

Am effektivsten erreichen sie dies durch die typische Anfahrtshaltung: Die Knie sind über 90 Grad gebeugt, der Oberkörper waagrecht, und die Arme nach hinten gestreckt. In Kombination mit dem maßgeschneiderten eng anliegen-

KOMPAKT

- Die Flugbahn des Skispringers gleicht einer ballistischen Kurve.
- Rasante Kurvenfahrten sind beim alpinen Skirennen nur möglich, weil die Zentrifugalkraft in den Carving-Skiern eine Biegung erzeugt.
- Beim Eisschnelllauf gleiten die Sportler auf einer quasi-flüssigen Wasserschicht.

den Sprunganzug sorgt das dafür, dass der Körper der vorbeiströmenden Luft im Idealfall eine nur noch fast ein Viertel so große Angriffsfläche von etwa 0,2 Quadratmetern bietet.

Training im Windkanal

Damit das im Wettkampf optimal gelingt, trainieren die Athleten ihre Anfahrtshaltung auch immer wieder im Windkanal. Etwa in der Rail Tec Arsenal Fahrzeugversuchsanlage in Wien: Dort, wo normalerweise die Aerodynamik neuer Automobile und ganzer Züge untersucht wird, werden auch Skispringer auf den Prüfstand gestellt. In der Anfahrtshocke bläst ihnen dabei ein Wind von Stärke 10 entgegen – entsprechend einem schweren Sturm mit über 90 Kilometern pro Stunde. Das simuliert die Bedingungen während des Anlaufs auf der Schanze.

Mit ihren Skiern stehen die Sportler dabei auf einer beweglich gelagerten Platte, die mit Sensoren ausgestattet ist. Sie messen, mit welcher Kraft die Luftmassen die Athleten nach hinten drücken. „Aus der gemessenen Kraft und der Windgeschwindigkeit können wir den sogenannten Widerstandsbeiwert, den



Beim Training im Windkanal suchen die Skispringer nach den optimalen Körperhaltungen für die Anfahrt (oben) und die Flugphase (links). Dafür werden sie von einem 90 Kilometer pro Stunde schnellen Wind angeblasen. Messungen des Luftwiderstands und des Auftriebs geben Aufschluss darüber, wie sich Änderungen der Sprungtechnik auf die Flugweite auswirken.

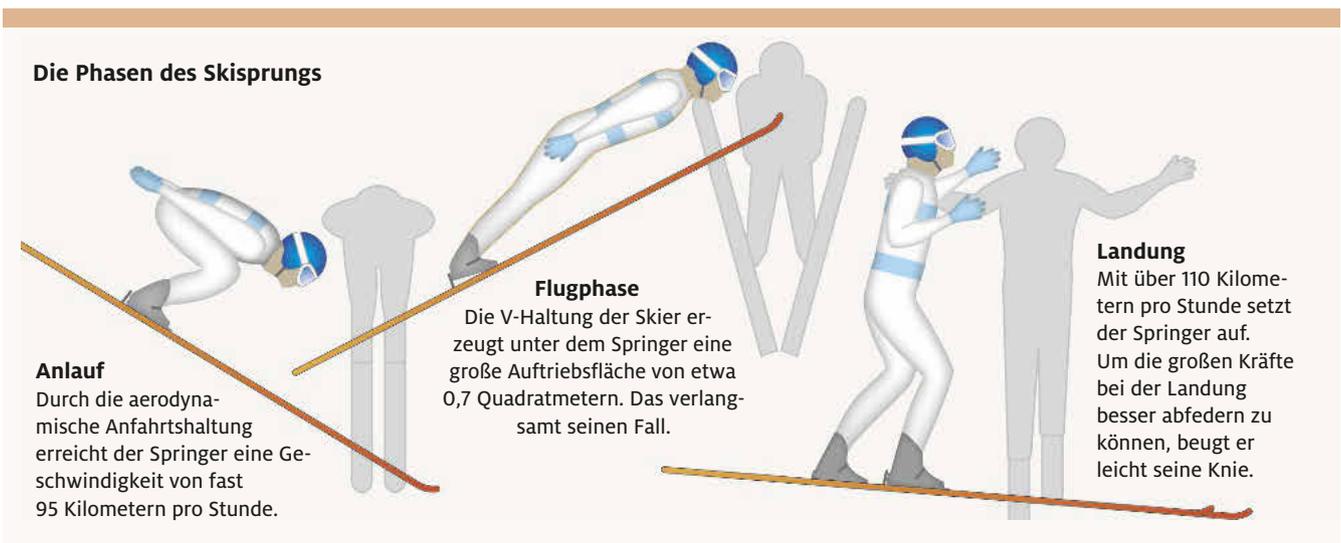
C_w -Wert, berechnen“, erklärt Sören Müller, Leiter der Fachgruppe Skispringen/Nordische Kombination am Institut für Angewandte Trainingswissenschaften in Leipzig. Anhand dieses Wertes kann der Sportwissenschaftler beurteilen, wie windschnittig die Anfahrtshaltung der Athleten ist, und gegebenenfalls Optimierungen vorschlagen.

„Durch eine tiefere Hockposition könnten die Sportler sicher noch etwas schneller werden“, sagt Müller. Die Anfahrtshaltung müsse aber ein Kompromiss sein, der sowohl eine gute Aerodynamik als auch ein effektives Abspringen erlaubt: „Die Bewegung der Sprunggelenke ist in den Skischuhen stark eingeschränkt. Ein zu tiefes Beugen der Knie

würde daher dazu führen, dass der Körperschwerpunkt des Springers nach hinten wandert“, erklärt Müller. Dadurch würde ein Drehmoment entstehen, das den Springer beim Absprung in eine rückwärtige Drehung zwingt. „Ein effektiver Übergang in die Flugphase ist nur möglich, wenn das Gewicht auf dem Vorderfuß liegt, sodass die Körperstreckung ein Drehmoment nach vorne erzeugt.“

Trotz der Bezeichnung „Flugphase“, handelt es sich dabei aus physikalischer Sicht eher um einen verlangsamen Fall in Richtung Boden: „Da das Ende des Anlaufs um etwa elf Grad nach unten geneigt ist, geht es für die Springer von Beginn an abwärts“, sagt Müller. Durch ihren Absprung können die Athleten diesen Winkel zwar auf etwa fünf bis sechs Grad reduzieren. An Höhe gewinnen können sie aber nicht. Im Verlauf des Fluges versuchen die Springer daher durch geschickte Wahl der Körperhaltung, der vorbeiströmenden Luft eine möglichst große Fläche zu bieten. Mit nach vorne gestrecktem Körper und nach hinten abgespreizten Armen gleiten sie durch die Luft, die Skier unter sich in Form eines V gespreizt. So erzeugen sie Auftrieb und verlangsamen ihren Fall.

Diese als V-Stil bekannte Technik revolutionierte Anfang der 1990er-Jahre das Skispringen. Zuvor war es üblich, die Skier im Flug parallel unter dem Körper zu halten. Der Auftrieb wurde dabei fast ausschließlich durch die beiden etwa 11



Zentimeter breiten und 230 Zentimeter langen Skier erzeugt. Im V-Stil dagegen trägt durch das seitliche Abspreizen der Skier auch der Körper des Athleten selbst zum Auftrieb bei. Die vom Wind angeströmte Fläche vergrößert sich so von 0,5 auf 0,7 Quadratmeter. Dadurch fliegen die Athleten zwar deutlich langsamer, der verbesserte Auftrieb sorgt aber dennoch dafür, dass sie mit dieser Sprungtechnik bis zu zehn Meter weiter springen können.

Und noch ein anderer Faktor hat massiven Einfluss auf die Weite: das Gewicht. Leichte Springer werden in der Flugphase von der Gravitation weniger stark nach unten gezogen, sodass der Auftrieb seine Wirkung besser entfalten kann. Berechnungen ergaben, dass sich die Flugweite durch ein Kilogramm Gewichtsabnahme um einen Meter steigern lässt.

In den 2000er-Jahren entwickelte sich bei vielen Springern daher ein ernst zu nehmendes Untergewichts-Problem. Die Internationale Skiföderation FIS reagierte 2004 mit einer Regelung, nach der nur noch Sportler mit einem Body-Mass-Index von über 21 mit der maximal zugelassenen Ski-Länge springen dürfen. Springer, bei denen diese Maßzahl für das Verhältnis von Körpergewicht zu Körpergröße unter diesem Wert liegt, müssen entsprechend kürzere Skier verwenden und verlieren dadurch an wertvoller Auftriebsfläche. Doch etliche Springer sind nach wie vor untergewichtig. Das Problem ist nicht vollständig gelöst.

Simulationen ergaben, dass die BMI-Regelung lediglich 37 Prozent der Vorteile eines geringeren Körpergewichtes kompensiert. Trotz der kürzeren Skier können Springer für jeden halben Punkt, den ihr BMI unter 21 liegt, einen Weiten-Vorteil von einem Meter erlangen. Durch Neuerungen in der Sprungtechnik und veränderte Bindungen zwischen Ski und Schuh können die Sportler ihre Flugbahn mit kürzeren Skiern zudem besser kontrollieren – und so auch weiter springen.

Ski-Alpin: Die Kurvenlage zählt

Keinen Wert auf große Weiten, dafür aber umso mehr auf geringe Zeiten legen die Athleten beim alpinen Skirennen. So fanden bei den diesjährigen Olympischen

Carving-Skier machen beim alpinen Skirennen engere Kurven möglich.

Winterspielen in Peking

Abfahrt, Super-G und Co. im Nationalen Ski-Alpin-Zentrum Xiaohaituo auf einer der mit bis zu 68 Grad steilsten Pisten der Welt statt. Dass die Athleten hier bei Geschwindigkeiten von über 100 Kilometern pro Stunde in den Kurven die Kontrolle behalten, verdanken sie ihren sogenannten Carving-Skiern.

Während die Skier beim Langlauf und auch beim Skispringen eine einfache gerade Form besitzen, weisen Carving-Skier eine Taillierung auf: Sie sind in der Mitte schmaler als an den Enden. Lehnt sich der Skifahrer bei hoher Geschwindigkeit

Beim Skifahren ist die kürzeste Strecke nicht immer die schnellste

nach innen in die Kurve, werden die Skier leicht zur Seite gekippt. Die Alpinsportler sprechen vom „Aufkanten“. Auf diese Weise graben sich zunächst nur die breiteren Enden der Skier mit ihren harten Stahlkanten in den Schnee, während die schmalere Mitte den Kontakt zum Untergrund verliert. Doch da der Skifahrer in einer Kurve von der Zentrifugalkraft mit annähernd 3000 Newton nach außen gegen seine Skier gedrückt wird, biegen sich diese entlang der Kurve durch, sodass in der Folge die komplette Seitenkante Kontakt zum Untergrund hat. „Diese Biegung gibt den Sportlern in der Kurve nicht nur mehr Halt, sondern ermöglicht es ihnen auch, deutlich kleinere Kurvenradien zu fahren“, erklärt Karlheinz Waibel, Bundestrainer für Wissenschaft und Technologie beim Deutschen Skiverband.

Entgegen der unter Laien weitverbreiteten Meinung sei es jedoch für die Fahrzeit nicht immer förderlich, stets die engste Kurve zu fahren: „Durch engere Kurven spart man zwar Wegstrecke, allerdings verliert man durch die starken Reibungskräfte unter Umständen auch sehr viel an Geschwindigkeit, sodass man wahrscheinlich sogar Zeit verliert“, sagt Waibel. Viel entscheidender sei es für den Sportler, die Biegung der Skier während der Kurvenfahrt optimal zu dosieren. Dies erreicht er, indem er seinen Körperschwerpunkt entlang der Ski-Längsachse variiert – je nachdem, in welcher Phase der Kurve er sich befindet. „Wenn sich der Athlet bei der Einfahrt in die Kurve etwas nach vorne lehnt, erzeugt er eine stärkere Biegung im vorderen Teil der Skier“, erklärt Waibel. „Umgekehrt führt eine Verlagerung des Gewichtes nach hinten zu einer verstärkten Biegung im hinteren Teil.“

Während es in den Kurven also auf maximalen Halt ankommt, gilt es auf den geraden Abschnitten zwischen den Toren so schnell wie möglich voranzukommen. Um das zu erreichen, muss die Reibung der Skier am Schnee so weit wie möglich reduziert werden. Die Unterseite der Skier besteht daher aus einem sehr reibungsarmen Belag aus Polyethylen, der durch spezielle Schlifff Techniken präpariert wird.

Welche Schriffe abhängig von der Temperatur und der Konsistenz des Schnees die besten Gleiteigenschaften besitzen, untersuchen Wissenschaftler am Forschungszentrum Schnee und Alpinsport an der Universität Innsbruck mithilfe eines sogenannten Tribometers: Bei genau



festgelegten Umweltbedingungen können sie damit die Reibungswiderstände zwischen Skiern und Schnee im Labor untersuchen. Die Skier werden hierfür von einem Elektromotor bei bis zu 100 Kilometern pro Stunde an einer Schiene über den Schnee gezogen. Drahtlose Sensoren messen die dabei wirkenden Kräfte und übermitteln die Messdaten an einen Computer, der sie auswertet.

Der richtige Schliff für jeden Schnee

Derartige Experimente haben gezeigt: Bei kaltem, festem Schnee bieten Schriffe mit feineren Strukturen einen Vorteil. Durch sie wird der feine Wasserfilm, der durch Reibungswärme entsteht und auf dem die Skier über den Schnee gleiten, gleichmäßiger unter der gesamten Ski-Fläche verteilt. Bei warmem, feuchtem Schnee werden hingegen eher Schriffe mit gröberen und tieferen Strukturen verwendet. Überschüssiges Wasser, das auf der Unterseite der Skier zu einer bremsenden Sogwirkung führen würde, kann auf diese Weise besser von den Skiern weggeleitet werden.

Zusätzlich tragen die Skitechniker verschiedene paraffin- und fluorhaltige Gleitwaxe auf den Polyethylen-Belag auf. Durch ihre wasserabweisende Wirkung helfen die Wachse dabei, den Was-

serfilm unter den Skiern effektiv nach hinten abzuleiten. „Bei feuchtem Schnee und höheren Temperaturen verwenden wir tendenziell weichere Wachse, bei Neuschnee und tieferen Temperaturen härtere“, sagt Waibel.

Kunstschnee, der auch im Alpingebiet Yanqing – dem Austragungsort der Ski-Wettbewerbe bei der diesjährigen Winterolympiade – zum Einsatz kam, stellt für die Skitechniker eine besondere Herausforderung dar. „Solche Pisten sind gerade bei Temperaturen von unter minus 25 Grad Celsius viel härter und aggressiver als natürlicher Schnee. Das setzt den Skibelägen speziell im Bereich der Stahlkanten stark zu.“ Für die Sportler bedeute das neben Einbußen bei der Geschwindigkeit ein erhebliches Sicherheitsrisiko. „Wir versuchen das zu lösen, indem wir Skier mit dickeren Kanten verwenden und auf Beläge ausweichen, die zwar etwas weniger gut gleiten, dafür aber temperaturbeständiger sind“, sagt Waibel.

Damit die Skier auf der Piste optimal gleiten, werden sie vor dem Wettkampf aufwendig präpariert (unten). Je nach Temperatur und Konsistenz des Schnees kommen hierbei verschiedene Schlifftechniken (rechts oben) und Gleitwaxe (darunter) zum Einsatz.

Eislaufen: Die Temperatur entscheidet

Mit derartigen Problemen haben die Eisschnell- und Eiskunstläufer nicht zu kämpfen. Das Eis unter ihren Kufen wird bei internationalen Wettkämpfen stets auf einer optimalen Temperatur gehalten. Beim Eisschnelllauf liegt diese typischerweise bei minus 9 Grad Celsius. Das Eis ist dadurch sehr hart – optimal für hohe Geschwindigkeiten. Beim Eiskunstlauf wird für die Sprünge und Figuren dagegen ein weiches Eis bei einer Temperatur von minus 5,5 Grad Celsius bevorzugt, über das die Athleten scheinbar schwerelos gleiten.

Warum Eis aber überhaupt rutschig ist, lässt sich aus physikalischer Sicht gar nicht so einfach erklären. Denn gleich mehrere unterschiedliche Effekte spielen hierbei eine Rolle. Der älteste Erklärungsansatz, der in vielen Schulbüchern steht, geht auf eine besondere Eigenschaft des Wassers zurück: seine Dichteanomalie. Die Dichte von Wasser ist knapp über





Eisschnellläufer gleiten auf einem dünnen Wasserfilm. Warum das möglich ist, fanden Forscher erst vor Kurzem heraus.

dem Gefrierpunkt höher als unterhalb des Gefrierpunkts. Wird Eis also hohem Druck ausgesetzt, verringert sich sein Volumen. Die Dichte des Eises steigt dadurch auf einen Wert, der dem von flüssigem Wasser entspricht – und das Eis schmilzt. Dieser Effekt wird als Druckaufschmelzen bezeichnet. Ein Eisläufer, der mit seinen Schlittschuhen Druck auf das Eis ausübt, gleitet auf einem hauchdünnen Wasserfilm unter seinen Kufen. So weit die Theorie.

Doch in der Praxis hat die Sache einen Haken: Damit ein 75 Kilogramm schwerer Mensch das Eis unter den Kufen seiner Schlittschuhe nur durch den Druck seines Körpergewichtes zum Schmelzen bringen kann, dürfte das Eis nicht kälter als minus 1,1 Grad Celsius sein.

Und auch die häufig genannte Begründung, der feine Wasserfilm unter den Kufen entstehe durch Reibungswärme, erklärt selbst bei einer Geschwindigkeit von 36 Kilometern pro Stunde gerade einmal einen Temperaturunterschied von 7 Grad Celsius. Eislaufen ist jedoch selbst bei minus 30 Grad Celsius noch problemlos möglich. Zudem liefert diese Erklärung keine Antwort darauf, warum Eis sogar dann rutschig ist, wenn man darauf völlig stillsteht. Es muss also noch ein dritter Effekt eine Rolle spielen.

Eine neue Erklärung für das Gleiten

Welcher das ist, fanden Forscher erst vor wenigen Jahren heraus: In seinem festen Aggregatzustand bildet Wasser ein starres Kristallgitter aus. In dessen Innerem ist jedes Wassermolekül über sogenannte

Wasserstoffbrücken in sechseckigen Strukturen an viele andere Wassermoleküle gebunden. Allerdings: Die Moleküle an der Oberfläche des Kristallgitters – und damit an der Oberfläche des Eises – können aufgrund ihrer Position nur eine deutlich geringere Zahl von Wasserstoffbrückenbindungen eingehen. Dadurch entsteht dort etwas, das die Forscher eine „quasi-flüssige Wasserschicht“ nennen: eine nur Nanometer dicke Schicht aus Wassermolekülen, die sich chaotisch auf der Oberfläche des Kristallgitters umherbewegen, spontan Bindungen eingehen und wieder auflösen. So bildet sich eine

Art permanenter Schmierfilm, auf dem die Schlittschuhe wunderbar reibungsarm gleiten können.

Auch wenn diese Erkenntnis keine neuen Rekorde gebracht hat – der wissenschaftliche Fortschritt stellt die Wintersport-Verbände und auch die Veranstalter der Olympischen Spiele vielfach vor Herausforderungen. Zum Beispiel beim Skispringen: Da erreichen die Springer auf großen Schanzen wie jenen in Oberstdorf oder Garmisch-Partenkirchen immer größere Weiten von inzwischen über 140 Metern – und geraten damit an die Grenzen dessen, wofür die Schanzen konstruiert wurden.

Immer wieder sind daher Anpassungen am Regelwerk notwendig, etwa zur Aerodynamik der Sprunganzüge, der Länge des Anlaufs und sogar zur Bauweise der Skischanzen. Das soll verhindern, dass die besten Athleten zu weit fliegen und sich bei der Landung womöglich verletzen. ■



FINN BROCKERHOFF ist Volontär bei bild der wissenschaft. Am Wintersport hat er erst durch die Recherche für diesen Artikel Interesse gefunden.

Warum ist Eis so rutschig?

Die Wassermoleküle an der Oberfläche des Eises sind nur schwach an das darunterliegende Kristallgitter gebunden (Mitte). Sie bewegen sich chaotisch umher, gehen kurzzeitig Bindungen mit dem Gitter ein und lösen sie wieder auf (rechts). So entsteht auf dem Eis ein hauchdünner Schmierfilm, der als „quasi-flüssige Wasserschicht“ bezeichnet wird.