

Etablierung einer 3D-Bewegungsanalyse der Absprungbewegung an der Sprungschanze

(AZ 070803/18)

Jakob Ketterer¹, Albert Gollhofer¹ (Projektleitung), Dominic Gehring¹, Daniel Brinkmann¹
& Benedikt Lauber^{1,2}

¹Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Sport und Sportwissenschaft

²Universität Fribourg, Department Neuro- und Bewegungswissenschaften

1 Problem

Im Verlauf eines Skisprungs wird dem Absprung die höchste Relevanz für den sportlichen Erfolg der Athletinnen und Athleten zugeschrieben, da er die Anfangskonditionen für die Flugphase kreiert und damit eine Schlüsselrolle für die Sprungweite einnimmt (Schwameder, 2008). Den Springerinnen und Springern steht aufgrund der hohen Anfahrtsgeschwindigkeiten eine nur sehr kurze Zeitspanne zur Verfügung, in der die komplexen und dynamischen Bewegungsabläufe zum Absprung ausgeführt werden können. Folglich stellt der Absprung auch im Training eine Kernkomponente dar. Die Skispringerinnen und Skispringer können jedoch lediglich geringe Trainingsumfänge auf der Schanze absolvieren (Sandbakk et al., 2016), weshalb es in der Trainingsgestaltung zahlreicher Imitationssprünge bedarf, um den Springerinnen und Springern ein adäquates Training des Absprungs abseits der Schanze zu ermöglichen (Ettema et al., 2016). Die Komplexität der Absprungbewegung impliziert hierbei eine möglichst präzise Simulation des Sprunges im Training, damit die anspruchsvollen Bewegungsmuster verbessert und gefestigt werden können sowie ein getreuer Transfer auf die Schanze erfolgen kann (Lorenzetti et al., 2017). Imitationsformen, die in diesem Zusammenhang bereits thematisiert wurden, sind Imitationssprünge von festem Untergrund, Imitationssprünge von einem Rollwagen im Flachen und von Rampen mit verschiedenen Neigungen als auch Squat Jumps und Drop Jumps. Ein direkter Vergleich dieser Parameter während unterschiedlicher Imitationsformen wurde in keiner Untersuchung angeführt, obwohl Schwameder

(2008) zu bedenken gibt, dass ein beträchtlicher Unterschied in den Rahmenbedingungen zwischen dem Absprung bei Imitationssprüngen und Sprüngen auf der Schanze vorliegt. Zu diesen Unterschieden zählen primär die horizontale Absprunggeschwindigkeit, der Luftwiderstand sowie die Reibung und die Scherkräfte zwischen Athletin bzw. Athlet und dem Untergrund (Ettema et al., 2016). Hieraus resultiert, dass auf der Schanze geringere vertikale Absprunggeschwindigkeiten erreicht werden (Vaverka et al., 1994) und die Dauer des Absprungs im Vergleich zu Imitationssprüngen geringer ausfällt (Virma-virta, Kivekäs, & Komi, 2001).

Die Effektivität einer Imitationsübung ist primär an ihre Ähnlichkeit mit den kinematischen und kinetischen Strukturen von Sprüngen an der Schanze gekoppelt. Jedoch gibt es bisher keine vergleichende 3D-analytische und zeitlich hochauflösende Untersuchung, die Ausprägungen spezifischer, leistungslimitierender biomechanischer Parameter im Skisprung zwischen simulierten und realen Sprüngen feindifferenziert erfasst, um so Imitationsformen zu finden, die der Situation an der Schanze hinsichtlich der gezeigten Kinematik möglichst gleichen, wodurch die (Weiter-)Entwicklung skisprungspezifischer Trainingsformen vorangetrieben werden kann. Folglich werden Imitationssprünge mit und ohne Trainerunterstützung sowie mit und ohne Skisprungschuhe durchgeführt, kinematisch analysiert und hinsichtlich der leistungslimitierenden Parameter mit der Schanze verglichen. So soll die Frage geklärt werden, welche Imitationsform hinsichtlich der Ausprägung der Parameter mit den Sprüngen an der Schanze am meisten übereinstimmt. Dies liefert wertvolle Aufschlüsse für das Trainerteam

und die Trainingsgestaltung. Zudem ist dies die erste Untersuchung, die zeitlich so hochauflösende 3D-Aufnahmen des Absprungs an der Schanze aufzeichnet, wodurch die Biomechanik des Absprungs tiefgreifend aufgearbeitet werden und mit der Sprungweite korrelativ analysiert werden kann.

2 Methode

2.1 Datenerhebung

Die Sprünge auf der Schanze wurden im Adler-Skistadion in Hinterzarten gemessen. Die Daten wurden im Rahmen der Deutschen Meisterschaft der Herren (N = 38) und dem tagesgleich stattfindenden DSV Jugendcup der Junioren (N = 17) erhoben. Beide Wettbewerbe umfassten zwei Sprünge pro Athlet. Neun der Springer führten an den beiden Tagen vor dem Wettkampf im Biomechanik-Labor des Institutes für Sport und Sportwissenschaft Freiburg Imitationssprünge in unterschiedlichen Ausführungen durch.

Die Imitationssprünge im Labor wurden sowohl barfuß als auch mit den persönlichen Skischuhen der Athleten durchgeführt. Beim Imitationssprung steht der Skispringer mit beiden Beinen auf dem Boden und nimmt hierbei seine individuelle Hockposition zum Absprung ein. Die Arme werden seitlich am Körper nach hinten gestreckt. Aus dieser Anfahrtshocke wird ein maximal hoher vertikaler Sprung ausgeführt. Bei der Imitationsform Rollwagen fährt der Athlet eine abschüssige Rampe herunter. Auf dem Rollwagen wird ebenso wie beim Imitationssprung die skisprungtypische Anfahrtsposition eingenommen und aus dieser abgesprungen.

2.2 Messmethodik

Um die Kinematik der Absprungbewegung zu erfassen, wurde ein videobasiertes Bewegungsanalysesystem verwendet (Simi Reality Motion Systems GmbH, Unterschleißheim, Deutschland). Dieses System kam sowohl an der Schanze als auch im Labor zum Einsatz. Der Absprung des Skispringers wurde von sechs synchronisierten Kameras erfasst. Die so aufgenommenen Videos wurden zunächst in dem Programm Simi Shape bearbeitet, wo ein virtuelles 3D-Modell

hinterlegt ist, das Proportionen entsprechend der Silhouette des Skispringers annimmt. Das Modell passt sich über jeden aufgenommenen Bildframe an die Position und Haltung der Segmente des Skispringers an. So wird die Absprungbewegung des Springers erfasst und dynamisch nachverfolgt (getrackt), wodurch die Bewegung des Skispringers aus den Videoaufnahmen dreidimensional rekonstruiert werden kann.

Über eine inverse Kinematik wurde aus dem Modell in Simi Shape die Lage und die Ausrichtung jedes Segments des Athleten in ein weiteres Programm – Simi Motion – exportiert. Hier können anschließend die zu untersuchenden Parameter berechnet werden.

2.3 Untersuchte Parameter

Das Ziel dieser 3D-Bewegungsanalyse war vor allem das Bestimmen von Winkelverläufen im Knie- und Hüftgelenk. Ferner kann aus dem hinterlegten Modell der Körperschwerpunkt (KSP) berechnet und sein räumlicher Verlauf oder Geschwindigkeit betrachtet werden. Es wurden folgende biomechanische Parameter während des Absprungs berechnet:

- › Anlaufgeschwindigkeit [km/h]
- › Maximale vertikale Absprunggeschwindigkeit (v_{\max}) [m/s]
- › Maximale Knieextensionsgeschwindigkeit (v_{knee}) und Hüftextensionsgeschwindigkeit (v_{hip}) [°/s]
- › Knie-Hüft-Synchronität (KH-Sync): gibt Aufschluss über das Timing der Öffnung im Knie- und Hüftgelenk beim Absprung. Je höher dieser Wert ist, desto größer ist die Differenz der normierten Winkelverläufe des Knie- und Hüftgelenks, was eine asynchrone Knie- und Hüftextension impliziert.
- › Vorlage [cm]: beschreibt den Abstand des KSP zum Mittelpunkt zwischen Fußgelenkszentren des Springers in Bewegungsrichtung.

- › Vorwärtsgerichteter Drehimpuls (L)[Nms]
- › Valgus Index (VI): gibt Aufschluss über die Stellung der Beinachsen des Skispringers bei dessen Absprung (Pauli et al., 2016). Ein $VI < 0$ bedeutet einen Knievalgus, ein $VI > 0$ einen Knievarus.

2.4 Statistik

Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mittels der Statistiksoftware SPSS Statistics 22 (IBM, Armonk, NY, USA). Bei allen statistischen Analysen ist jeweils die Wahrscheinlichkeit p für Gleichheit der Mittelwerte angegeben. Hierbei wurde die Signifikanzgrenze α auf 5 % festgelegt ($p < .05$). Um Unterschiede zwischen den Ausprägungen der biomechanischen Parameter zwischen der Schanze und den Imitationssprüngen zu untersuchen, wird ein mixed-effects model verwendet. Zeigt der F-Test einen Haupteffekt, wird über einen Bonferroni-Post-hoc Test geklärt, zwischen welchen Faktorstufen (Imitationssprüngen) Unterschiede bestehen.

3 Ergebnisse

Es zeigt sich, dass die Imitationsbedingung einen Einfluss auf die v_{\max} hat ($F[2.714, 17.19] = 36.10$, $p < .001$). Die post-hoc Analyse zeigt, dass sich die v_{\max} auf der Schanze von der bei Imitationssprüngen ohne Schuhe (Imi) ($p = .003$), Imitationssprüngen mit Schuhen (Imi_S) ($p < .001$), Imitationssprüngen vom Rollwagen ohne

Schuhe und ohne Trainer (SL) ($p = .003$), Imitationssprüngen vom Rollwagen ohne Schuhe und mit Trainer (SL_T) ($p = .004$), Imitationssprüngen vom Rollwagen mit Schuhen und ohne Trainer (SL_S) ($p < .001$) als auch Imitationssprüngen vom Rollwagen mit Schuhen und mit Trainer (SL_T_S) ($p = .008$) unterscheidet (Abb. 1). Einen Haupteffekt zeigt die Imitationsform u. a. auch auf den vom Springer im Verlauf des Absprungs generierten Drehimpuls ($F[2.897, 18.35] = 18.26$, $p < .001$). Der post-hoc Test zeigt, dass sich der vom Springer auf der Schanze erzeugte Drehimpuls von dem bei Imi ($p = .017$), Imi_S ($p < .001$) und SL_S ($p = .01$) unterscheidet (Abb. 1).

4 Diskussion

In diese Untersuchung wurde ein Großteil der Parameter aufgenommen, die in früheren Studien in Zusammenhang mit der Sprungweite gebracht wurden, um erstmals über eine detaillierte 3D-Analyse auf der Schanze deren Relevanz für die Sprungweite zu verifizieren. Lediglich die v_{\max} steht in Zusammenhang mit der Sprungweite, was die in vorherigen Studien beschriebene hohe Relevanz dieses Parameters bestärkt (Pauli et al., 2016; Rasdal et al., 2017; Schwameder & Müller, 1995; Schwameder et al., 2005; Virnavirta et al., 2005; Vodičar & Jošt, 2010). Darüber hinaus kann dieses Ergebnis für die Trainingsgestaltung der Athleten eine wichtige Erkenntnis sein, da es die Explosivkraft des Springers als Kernkomponente identifiziert, die entsprechend trainiert werden kann. Gestützt wird das durch die Tatsache, dass eine Korrela-

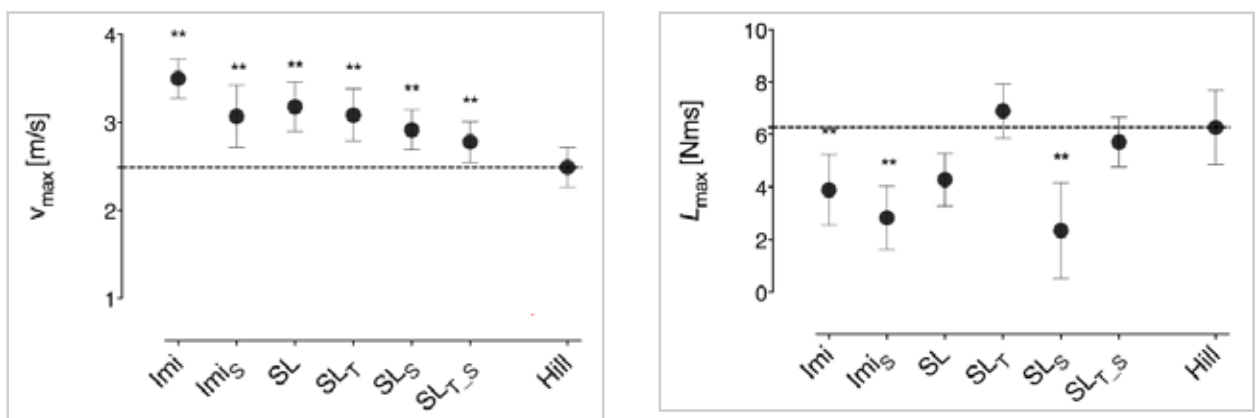


Abb. 1: Imi = Imitation ohne Trainer ohne Schuhe; Imi_S = Imitation ohne Trainer mit Schuhen; SL = Rollwagen ohne Trainer ohne Schuhe; SL_T = Rollwagen mit Trainer ohne Schuhe; SL_S = Rollwagen ohne Trainer mit Schuhen; SL_T_S = Rollwagen mit Trainer mit Schuhen; Hill = Schanze. * $p < .05$; ** $p < .01$

tion zwischen der v_{\max} und v_{knee} besteht ($r = .5$; $p > .001$). Die Knieextensoren beschleunigen den Körperschwerpunkt vertikal, um so die hohe v_{\max} zu realisieren zu können.

Die v_{\max} und das Erreichen eines vorwärtsgerichteten Drehimpulses können als Hauptaufgabe des Absprungs gesehen werden (Schwameder, 2008), weshalb diesen beiden Parametern im Training eine besondere Relevanz zukommt. Es kann ein kontinuierlicher Abfall der v_{\max} mit zunehmender Komplexität der Imitationsform beobachtet werden, wobei sich die v_{\max} der Schanze immer weiter annähert. Es bleiben jedoch stets statistisch signifikante Unterschiede bestehen. Dass die v_{\max} auf der Schanze unter der v_{\max} bei Imitationssprüngen im Labor liegt, steht im Einklang mit bisherigen Untersuchungen in der Literatur (Vaverka et al., 1994). Es zeigt sich, dass die v_{\max} speziell mit dem Tragen von Skischuhen abnimmt, was unter anderem an der Limitation der Plantarflexion liegt (Komi & Virravirta, 1996; Virravirta & Komi, 2001). Da die v_{\max} der einzige Parameter ist, der in dieser Untersuchung eine Korrelation mit der Sprungweite aufwies, sollte ein primäres Augenmerk darauf liegen, diesen Parameter möglichst getreu der Schanze simulieren zu können, was nachweislich mit der komplexesten Imitationsform möglich wird.

Um einen vorwärtsgerichteten Drehimpuls zu erzeugen, muss der Körperschwerpunkt nach anterior verschoben werden, damit der Vektor der Bodenreaktionskraft dahinter ansetzen kann (Ettema, Bråten, & Bobbert, 2005). Der bei den Imitationssprüngen generierte Drehimpuls hat lediglich dann eine mit dem Absprung auf der Schanze übereinstimmende Ausprägung, wenn die Auffangunterstützung des Trainers in die Simulation miteinbezogen wird. Nur so kann der KSP ausreichend transferiert werden, um ähnlich hohe Drehimpulse zu erzeugen.

Grundsätzlich zeigt sich, dass die Imitationsform – mit Ausnahme der v_{hip} und des VI – auf alle Parameter einen Haupteffekt hat. Weiter kann mit Ausnahme der v_{\max} für alle Parameter keine Imitationsform identifiziert werden, die sich hinsichtlich der Ausprägung des Parameters nicht von der Schanze unterscheidet und damit adäquat trainiert werden kann. Außerdem muss festgehalten werden, dass sechs der

sieben untersuchten Parameter am besten über eine Imitationsform mit Skischuhen simuliert werden können. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Skischuhe zunehmend in die Trainingsroutine zu implementieren.

5 Literatur

- Arndt, A., Brüggemann, G. P., Virravirta, M., & Komi, P. (1995). Techniques used by Olympic ski jumpers in the transition from takeoff to early flight. *Journal of Applied Biomechanics*, 11(2), 224-237.
- Ettema, G. J., Bråten, S., & Bobbert, M. F. (2005). Dynamics of the in-run in ski jumping: A simulation study. *Journal of Applied Biomechanics*, 21(3), 247-259. <https://doi.org/10.1123/jab.21.3.247>
- Ettema, G. J., Hooiveld, J., Braaten, S., & Bobbert, M. F. (2016). How do elite ski jumpers handle the dynamic conditions in imitation jumps? *Journal of Sports Sciences*, 34(11), 1081-1087.
- Komi, P. V., & Virravirta, M. (1996). Ski-jumping take-off performance: Determining factors and methodological advances. In E. Müller, H. Schwameder, E. Kornexl, & C. Raschner (Eds.), *Science and Skiing* (pp. 3-26). London: E & FN SPON.
- Lorenzetti, S., Ammann, F., Windmüller, S., Häberle, R., Müller, S., Gross, M., ... Hübner, K. (2017). Conditioning exercises in ski jumping: biomechanical relationship of squat jumps, imitation jumps, and hill jumps. *Sports Biomechanics*, 3141, 1-12. <https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1383506>
- Pauli, C. A., Keller, M., Ammann, F., Hübner, K., Lindorfer, J., Taylor, W. R., & Lorenzetti, S. (2016). Kinematics and kinetics of squats, drop jumps and imitation jumps of ski jumpers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(3), 643-652.
- Rasdal, V., Fudel, R., Kocbach, J., Moen, F., Ettema, G., & Sandbakk, Ø. (2017). Association between laboratory capacities and world-cup performance in Nordic combined. *PLoS ONE*, 12(6).

- Sandbakk, Ø., Rasdal, V., Bråten, S., Moen, F., & Ettema, G. (2016). How do world-class nordic combined athletes differ from specialized cross-country skiers and ski jumpers in sportspecific capacity and training characteristics? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(7), 899-906.
- Schwameder, H. (2008). Biomechanics research in ski jumping – 1991-2006. *Sports Biomechanics*, 7(1), 114-136.
- Schwameder, H., & Müller, E. (1995). Biomechanische Beschreibung und Analyse der V- Technik im Skispringen. *Spectrum Der Sportwissenschaften*, 1(Mai 1995), 5-36.
- Schwameder, H., Müller, E., Lindenhofer, E., De Monte, G., Potthast, W., Brüggemann, G., ... Komi, P. V. (2005). Kinematic characteristics of the early flight phase in ski-jumping. *Science and Skiing III*, 381-391.
- Vaverka, F., Janura, M., Salinger, J., & Brichta, J. (1994). A comparison of the take-off measured under laboratory and jumping-hill conditions. *Journal of Biomechanics*, 27(6), 694.
- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (2001). Ski jumping boots limit effective take-off in ski jumping. *Journal of Sports Sciences*, 19(12), 961-968. <https://doi.org/10.1080/026404101317108462>
- Virmavirta, Mikko, Isolehto, J., Komi, P., Brüggemann, G. P., Müller, E., & Schwameder, H. (2005). Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition. *Journal of Biomechanics*, 38(11), 2157-2163. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.10.004>
- Virmavirta, Mikko, Isolehto, J., Komi, P., Schwameder, H., Pigozzi, F., & Massazza, G. (2009). Take-off analysis of the Olympic ski jumping competition (HS-106 m). *Journal of Biomechanics*, 42(8), 1095-1101.
- Virmavirta, Mikko, Kivekäs, J., & Komi, P. V. (2001). Take-off aerodynamics in ski jumping. *Journal of Biomechanics*, 34(4), 465-470. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00218-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00218-9)
- Virmavirta, Mikko, & Komi, P. V. (2001). Plantar pressure and EMG activity of simulated and actual ski jumping take-off. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 11(5), 310-314.
- Vodičar, J., & Jošt, B. (2010). The factor structure of chosen kinematic characteristics of take-off in ski jumping. *Journal of Human Kinetics*, 23(1), 37-45. <https://doi.org/10.2478/v10078-010-0005-6>
- Vodičar, J., & Jošt, B. (2011). The Relationship Between Selected Kinematic Parameters and Length of Jumps of the Ski-Flying Competition. *Kinesiology*, 43(1), 74-81.