
Nordische Kombination

Simulative Untersuchungen des Bewegungsablaufes im Skisprung und dessen materialtechnische Beeinflussung

Albrecht Keil, Heike Hermsdorf, Norman Hofmann, Karin Knoll
& Sören Müller

Institut für Mechatronik e. V., Chemnitz
Institut für Angewandte Trainingswissenschaft, Leipzig

Einleitung

Bewegungssimulation hat sich als unverzichtbarer Bestandteil im Prozess zur Entwicklung neuer technischer Produkte und technologischer Verfahren etabliert. Moderne Simulationsmethoden stehen in allgemein anwendbaren Softwareprodukten zur Verfügung und liefern bereits in der frühen Entwicklungsphase erste Aussagen zur Bewertung von Produkten und Prozessen auf der Grundlage virtueller Modelle.

Obwohl die physikalischen Modelle zur Beschreibung menschlicher Bewegungen weitgehend den in der Technik verwendeten entsprechen, gestaltet sich die Nutzung der entsprechenden Software für sportwissenschaftliche Anwendungen schwierig. Ursache sind in erster Linie fehlende Modelle für die Ansteuerung menschlicher Bewegungen. Für Anwendungen in der sportwissenschaftlichen Forschung wird deshalb stets ein Modell benötigt, das in Zusammenarbeit von Expertinnen und Experten aus der Sportwissenschaft und der Simulationstechnik an die Spezifik der jeweiligen Sportart angepasst wird. Damit wird die Komplexität des Problems reduziert und gleichzeitig die Robustheit des Modells erreicht, die Voraussetzung für eine effiziente Nutzung durch Trainingswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler ist.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines solchen Modells für den Skisprung. Mit Hilfe des Modells können Fragen zum zweckmäßigen Bewegungsablauf sowie zur materialtechnischen Beeinflussung des Sprungs untersucht werden.

Methode

Für Modellierung, Generierung und Lösen der Bewegungsgleichungen wird das Simulationswerkzeug *alaska* (*alaska*, 2009) eingesetzt, das am Institut für Mechatronik entwickelt wird.

Mit *alaska* kann auf der Grundlage von Mehrkörper-Modellen die Bewegung von Körpern unter der Wirkung von Kräften berechnet werden. Für Sportlergruppe, Schuh, Ski und Schanze wurde ein Mehrkörpersystem-Modell entwickelt, das alle Kräfte, die innerhalb des Systems Sportler-Sportgerät wirken (z. B. Kontaktkräfte zwischen Bindung und Schuh), sowie alle äußeren Kräfte (Schwerkraft, Luftkräfte) so realitätsnah wie möglich abbildet. Die „innere“ Bewegung der Sportlerin bzw. des Sportlers wird durch den Zeitverlauf von Gelenkwinkeln vorgegeben. Die globale

Bewegung der Sportlerin bzw. des Sportlers, d. h. Flugbahn und Anstellwinkel zur Flugbahn, wird durch Dynamiksimulation berechnet.

Das biomechanische Menschmodell Dynamicus (Dynamicus, 2009), ein AddOn zu alaska, wird als Modell für die Sportlerin/den Sportler genutzt. Dynamicus bildet den menschlichen Körper durch 21 Segmentkörper ab. Einzelne Bewegungsmöglichkeiten, die für den Bewegungsablauf beim Skisprung nicht relevant sind, werden gesperrt. Zur Vorgabe der anthropometrischen Daten der Sportlerin bzw. des Sportlers stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Können Athletin bzw. Athlet anthropometrisch vermessen werden, wird ein sogenanntes Probandenmodell eingesetzt, das die Sportlerin bzw. den Sportler individuell abbildet. Ist eine Vermessung nicht möglich, können empirische Regressionsformeln verwendet werden, die alle notwendigen Daten aus Angaben zu Größe und Gewicht berechnen.

Das Modell des Skis besteht aus 13 starren Teilkörpern, die untereinander durch Drehgelenke gekoppelt sind. Die viskoelastischen Eigenschaften der Ski werden durch Feder-Dämpfer-Elemente in den Gelenken modelliert. Zur Ermittlung von geeigneten Parametern für diese Elemente wurden umfangreiche Analysen mit Sprungskiern durchgeführt. Ein Verfahren der Parameteridentifikation liefert Parameter, die die realen Eigenschaften des Skis bestmöglich abbilden.

Zur Bestimmung von Parametern für das Schuhmodell und zur Validierung des Modells wurden Druckmessungen im Schuh durchgeführt. Mit Hilfe von Druckmesssohlen wurden die Kräfte und Kraftangriffspunkte in der Sohle sowie beim Kontakt zwischen Spoiler und Wade gemessen.

Die Geometrie der Schanze, die zugleich für die Kontaktsensorik zwischen Schanze und Ski benötigt wird, wird aus den im FIS-Zertifikat gegebenen Parametern berechnet. Kontaktelemente realisieren das Gleiten der Skier auf der Schanzenoberfläche.

Zur Berücksichtigung der Luftkräfte werden Ergebnisse von Windkanalmessungen verwendet. Für verschiedene Haltungen von Sportlerin/Sportler und Ski wurden Luftwiderstandskraft und Auftriebskraft ermittelt. Aus der Analyse dieser Daten konnten für die Absprungbewegung Regressionsformeln entwickelt werden, die den Luftwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Hockhöhe und den Auftriebsbeiwert in Abhängigkeit vom Oberkörperanstellwinkel beschreiben. Aus diesen Beiwerten werden im Modell Luftkräfte berechnet und als äußere Kräfte eingepreist.

Der Verlauf der Gelenkwinkel während des Sprungs wird vorgegeben. Damit können Bewegungsmodifikationen und deren Auswirkung auf die globale Bewegung analysiert werden. Jedoch ist es schwierig, realitätsnahe Gelenkwinkel ad hoc zu beschreiben. Deshalb wurde ein Verfahren zur Berechnung der Gelenkwinkelverläufe realer Sprünge entwickelt. Ausgehend von einer Videobildanalyse, die 3D-Koordinaten von Körperpunkten liefert, werden mit der Methode der Inversen Kinematik die zugehörigen Gelenkwinkelverläufe ermittelt, die dann als Grundlage für eine Bewegungsmodifikation genutzt werden können.

Ergebnisse

Simulationsmodell

Das Simulationsmodell (JUMPICUS) wird am Institut für Angewandte Trainingswissenschaft für die Analyse von Skisprüngen genutzt. Dabei werden folgende Fragestellungen untersucht:

1. Analyse realer Sprünge

Mit JUMPICUS können reale Sprünge analysiert werden. In der Bewegungssimulation werden sowohl biomechanische als auch sportartspezifische Kenngrößen (z. B. Körperschwerpunkt, Absprunggeschwindigkeit, Skianstellwinkel) ermittelt. Auf diese Weise können Sprünge objektiv bewertet werden. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit anderen Sprüngen oder einem Technikleitbild liefert Hinweise auf mögliche Fehlerquellen in der Bewegungsausführung. Die 3D-Visualisierung von Sprüngen erlaubt eine schnelle visuelle Beurteilung des Sprungs (Hofmann, 2009).

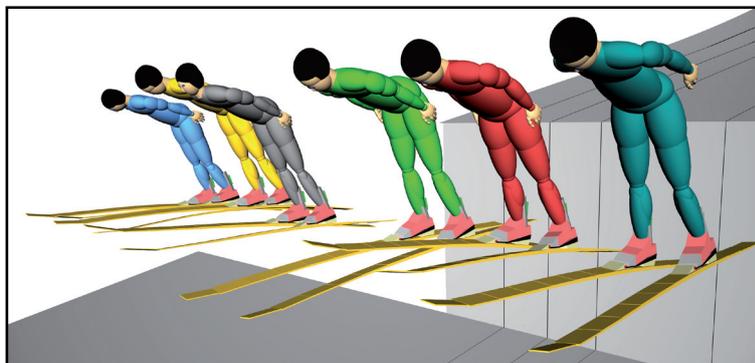


Abb. 1. Vergleich von Sprüngen in der 3D-Animation

2. Einfluss von Modifikationen des Bewegungsablaufes beim Absprung auf die Anfangsbedingungen für die Flugphase

Absprunggeschwindigkeit und Drehimpuls an der Schanzentischkante stellen die Anfangsbedingungen für die Flugphase dar und sind deshalb wichtige Bewertungsgrößen des Absprungs. Eine hohe Absprunggeschwindigkeit führt zu einer günstigeren Flugbahn und somit einer größeren Weite. Ein hoher Drehimpuls ermöglicht der Sportlerin/dem Sportler, schneller eine aerodynamisch vorteilhafte Flughaltung einzunehmen. Führt eine Absprungbewegung zu einer größeren Absprunggeschwindigkeit, ist damit jedoch eine Verringerung des Drehimpulses verbunden. Dieser Zusammenhang kann mit JUMPICUS untersucht werden, mit dem Ziel einer Optimierung des Bewegungsablaufes (Hermsdorf, 2008; Müller, 2008).

3. Einfluss von Parametern des Sprungschuhs

Der Spoiler des Sprungschuhs ist für den Absprung von zentraler Bedeutung. Kurz vor dem Absprung kontaktiert die Sportlerin bzw. der Sportler mit der Wade den Spoiler und verformt damit den Schuh. Die im Schuh gespeicherte Verformungsenergie wird beim Verlassen des Schanzentisches in kinetische Energie umgewandelt, die dazu führt, dass sich der Ski schneller anstellt. Durch die Simulation konnte gezeigt

werden, dass eine stärkere Neigung des Spoilers zu einem schnelleren Anstellen der Ski führt. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die Plantarflexion der Sportlerin bzw. des Sportlers auf der Schanze nicht vom stärker geneigten Spoiler beeinflusst wird. Der gleiche Effekt wird durch eine Verlängerung des Spoilers erreicht.

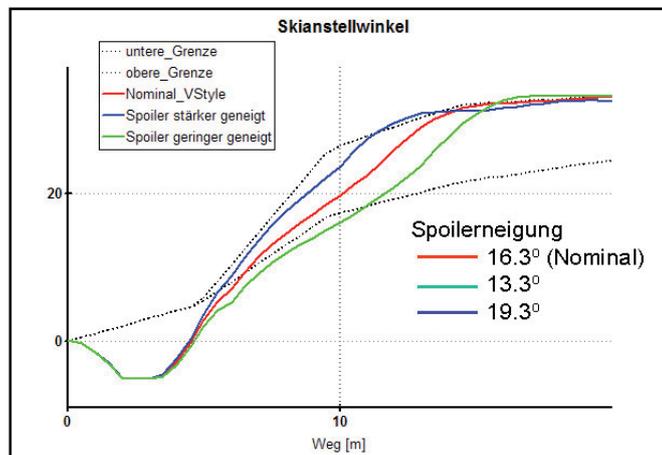


Abb. 2. Verlauf des Skianstellwinkels für verschiedene Neigungen Spoilers

Materialtechnische Analysen

Im Verlauf der Projektbearbeitung zeigte sich, dass nicht nur das Simulationsmodell sowie die daraus abgeleiteten Ergebnisse für die Trainingswissenschaftlerinnen/-wissenschaftler und Trainerinnen/Trainer von Bedeutung sind, sondern darüber hinaus die materialtechnischen Analysen zur Bereitstellung von Modellparametern interessante Aussagen liefern.

Die Analyse von Sprungskiern mit der in dem Projekt entwickelten Methode liefert mechanische Kenngrößen, auf deren Grundlage Skier objektiv bewertet und damit auch verglichen werden können. Es wurden ca. 50 Skier analysiert. Die Ergebnisse wurden in einer Skidatenbank erfasst, die online den Trainerinnen und Trainern zur Verfügung steht. Mit Hilfe einer browsergestützten Bedienoberfläche können die Daten ausgewählter Skier angezeigt und verglichen werden. Die Skinanalyse wurde genutzt, um für Sportlerinnen und Sportler die geeigneten Sprungskier auszuwählen.

Auf der Fichtelbergschanze in Oberwiesenthal wurden Untersuchungen mit Druckmesssohlen im Sprungschuh durchgeführt. Die Messungen dienten zunächst der Validierung des Simulationsmodells, lieferten darüber hinaus aber auch wichtige Hinweise für Trainerinnen und Trainer. Insbesondere die Messungen für den Kontakt zwischen Wade und Spoiler lieferten erstmalig Aussagen über die Größe der wirkenden Kräfte.

Auf Anregung der Trainerinnen und Trainer wurde die Methode der Druckmessungen im Sprungschuh auch eingesetzt, um zu untersuchen, inwieweit Imitations Sprünge mit realen Schanzensprüngen vergleichbar sind.

Diskussion

Mit dem Simulationsmodell JUMPICUS steht ein geeignetes Werkzeug für die Analyse von Skisprüngen zur Verfügung. Es liefert Erkenntnisse über biomechanische Phänomene des Skisprungs, gestattet eine objektive, quantitative Bewertung von Skisprüngen und dient auch als Basis für Untersuchungen zu Veränderungen des Bewegungsablaufes.

JUMPICUS wird am IAT von Trainingswissenschaftlern genutzt. Die Ergebnisse der materialtechnischen Analysen stehen Trainerinnen und Trainern in der Skidatenbank zur Verfügung und wurden im Trainersymposium vorgestellt (Hermsdorf, 2008).

Literatur

- alaska 6.0 *Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme*, Benutzerhandbuch, Institut für Mechatronik e. V. , Chemnitz, 2009.
- Dynamicus, *Biomechanisches Menschmodell*, Benutzerhandbuch, Institut für Mechatronik e. V. , Chemnitz, 2009.
- Hermsdorf, H., Hildebrand, F., Hofmann, Norman, H. & Müller, S. (2008). JUMPICUS – Computer Simulation in Ski Jumping. In M. Estivalet & P. Brisson (Eds.), *The Engineering of sport*, 7 (1), (pp. 491-497). Paris: Springer Verlag France.
- Hermsdorf, H. & Hofmann, N. (2008). *Simulative und experimentelle Untersuchungen im Skisprung*, Vortrag auf dem Trainersymposium des DSV, Bad Blankenburg, 25./26. Juni 2008.
- Hofmann, N., Hermsdorf, H. & Enderlein, V. (2009). *Simulative Unterstützung des Trainingsprozesses*, Vortrag anlässlich des 19. Sportwissenschaftlichen Hochschultages der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft, 16.-18.9. 2009, Münster.
- Hofmann, N., Hermsdorf, H. & Enderlein, V. (2009). Simulative Unterstützung des Trainingsprozesses, in Krüger, Neuber, Brach & Reinhart (Hrsg.), *Bildungspotenziale im Sport* (Abstracts des 19. Sportwissenschaftlichen Hochschultags der dvs, dvs-Band 191, S. 278). Hamburg: Czwalina Verlag.
- Hofmann, N., Hermsdorf, H., Enderlein, V. & Müller, S. (2009). *JUMPICUS/Trainer-Simulation im Training*, Vortrag anlässlich der 11. Frühjahrsschule „Informations- und Kommunikationstechnologien in der angewandten Trainingswissenschaft“ am IAT Leipzig, 22./23.4.2009.
- Müller, S. (2008). Untersuchungen zur Effektivierung der der Absprungbewegung im Skispringen. *Leipziger Sportwissenschaftliche Beiträge*, 49 (1), 129-135.