

Hermann Schwameder**Biomechanische Forschung im Skisprung – ein Überblick**

BIOMECHANICS RESEARCH IN SKI JUMPING – AN OVERVIEW

*Zusammenfassung*¹

Dieser Beitrag gibt einen Überblick zur biomechanischen Forschung im Skispringen mit besonderer Berücksichtigung der Veröffentlichungen zwischen 1991 und 2006, die sich mit leistungsbestimmenden Faktoren, speziellen Technik- und Konditionstrainingsformen, Aerodynamik und Sicherheit beschäftigen. Im ersten Teil werden die einzelnen Phasen des Skisprungs (Anlauf, Absprung, erste Flugphase, stabile Flugphase und Landung) hinsichtlich der biomechanischen und der funktionellen Grundlagen beschrieben. Die wichtigsten und am häufigsten benutzten Methoden im Skispringen (Kinematik, Bodenreaktionskraftmessungen, Aktivierungsmuster von Muskeln, Aerodynamik) werden im zweiten Teil zusammenfassend dargestellt. Im dritten Teil stehen die Arbeiten und Forschungsergebnisse im Vordergrund, die nach der Etablierung der V-Technik (1991) veröffentlicht worden sind. Der letzte Abschnitt liefert Themenvorschläge für die künftige biomechanische Forschung im Skispringen wie z. B. Absprung und erste Flugphase und das Verhältnis von vertikaler Abfluggeschwindigkeit und vorwärts gerichtetem Drehimpuls, optimale Koordinationsmuster zur Ausnutzung der individuellen Fähigkeiten des Athleten, Entwicklung von kinematischen und dynamischen Feedbacksystemen bei Schanzensprüngen, Vergleiche zwischen Imitations- und Schanzensprüngen sowie Effekt der Modifikation der Ausrüstung zur Leistungs- und Sicherheitssteigerung.

Schlagworte: Skispringen – Absprung – Aerodynamik

Abstract

The paper provides a review of biomechanics research in ski jumping with a specific focus on publications presented between 1991 and 2006 with respect to performance enhancement, limiting factors of the take-off, specific training and conditioning, aerodynamics, and safety. The first section presents a brief description of ski jumping phases (in-run, take-off, early flight, stable flight, and landing) regarding the biomechanical and functional fundamentals. The most important and frequently used biomechanical methods in ski jumping (kinematics, ground reaction force analyses, muscle activation patterns, aerodynamics) are summarised in the second section. The third section focuses upon ski jumping articles and research findings published after the establishment of the V-technique in 1991 as the introduction of this technique has had a substantial influence upon performance enhancement, ski jumping regulations and the construction of hill profiles. The final section proposes topics for future research

¹ Dieser Beitrag ist in englischer Originalfassung erschienen:

Schwameder, H. (2008). Biomechanics research in ski jumping – 1991-2006. *Sports Biomechanics*, 7, 114-136. [reprinted by permission of the publisher Taylor & Francis Ltd, <http://www.informaworld.com>]

in the biomechanics of ski jumping: take-off and early flight with respect to the relative roles of vertical velocity and forward somersaulting angular momentum; optimal jumping patterns utilizing the capabilities of individual athletes; development of kinematic and kinetic feedback systems for hill jumps; comparisons of simulated and hill jumps; effect of equipment modifications on performance and safety enhancement.

Key words: ski jumping – take-off – aerodynamics

0 Einleitung

Skispringen ist eine sowohl für Athleten als auch für Zuschauer(innen) höchst attraktive Sportart. Wie in anderen Sportarten gibt es auch im Skisprung bezüglich Bewegungstechnik (Arm-, Körper- und Skihaltungen), Material (Ski, Bindung und Anzüge) und Wettkampfbregeln ständig neue Entwicklungen und Verbesserungen. Eine der bedeutendsten Veränderungen hat das Skispringen durch die Entwicklung der V-Technik Anfang der 1990er-Jahre erfahren. Durch verbesserte Trainingsmethoden, spezifische Leistungsdiagnostik und biomechanische Untersuchungen sind weiterhin Verbesserungen im Bereich der Leistungs- und Sicherheitsaspekte zu erwarten.

Skispringen, das hauptsächlich als Wettkampfsport betrieben wird, ist an große Aufwendungen hinsichtlich Organisation und Infrastruktur (Schanzenanlage mit Sessellift bzw. Aufzug) gebunden. Dadurch ist die Anzahl der Sprünge während eines Schanzentrainings stark limitiert. Außerdem besteht während des Fluges und der Landung ein hohes Sturz- und Verletzungsrisiko. Diese Faktoren erklären vermutlich die relativ lange Geschichte der biomechanischen Forschung, die sich wesentlich auf die Aspekte leistungssteigernde und leistungslimitierende Faktoren des Absprungs, spezielle Koordinations-, Technik- und Konditionstrainingsformen, Aerodynamik und Sicherheit bezieht. Es sollte erwähnt werden, dass auf Grund des Wettkampfcharakters der Sportart nur wenige biomechanische Studien publiziert werden. Daher dürfte das Verständnis und Wissen über die Biomechanik des Skispringens in einschlägigen Forschungsgruppen – verglichen mit der Information aus der Literatur – erheblich größer sein.

Ein früher publizierter Überblick (Schwameder & Müller, 2001a) fasst die Hauptaspekte und Ergebnisse der biomechanischen Forschung des Skispringens bis zum Ende des zwanzigsten Jahrhunderts zusammen. Die vorliegende Arbeit berücksichtigt hauptsächlich wissenschaftliche Veröffentlichungen zwischen 1991 und 2006. Im ersten Teil werden die einzelnen Phasen des Skisprungs detailliert beschrieben und aus biomechanischer Sicht erklärt. Die biomechanischen Forschungsmethoden des Skispringens werden im zweiten Teil zusammenfassend dargestellt. Im dritten Teil liegt das Augenmerk auf den Arbeiten und Forschungsergebnissen, die nach der Etablierung der V-Technik (1991) veröffentlicht worden sind, da die Einführung dieser Technik die Leistungsentwicklung, die Wettkampfbestimmungen und die Konstruktion der Skisprungschancen erheblich beeinflusst hat. Der letzte Abschnitt liefert Ausblicke für die künftige biomechanische Forschung im Skisprung.

1 Bewegungsphasen des Skisprungs

Der Bewegungsablauf des Skisprungs kann in die folgenden sechs Phasen gegliedert werden: Anlauf, Absprung, erste Flugphase, stabile Flugphase, Landungsvorbereitung und Landung. Jede dieser Phasen hat eine spezielle Funktion und bedingt die Voraussetzungen für die jeweils nachfolgende Phase. Ein optimales Zusammenwirken der Bewegungsphasen führt zur Verbesserung sowohl der Sprunglänge als auch der technischen Qualität der Sprünge.

1.1 Anlauf

Der Anlauf erfolgt anfänglich in einem geraden Abschnitt, der im Bereich des Übergangsbogens („Radius“) in einen gekrümmten Teil übergeht. Der Schanzentisch, der den letzten Teil des Anlaufs bildet, ist gerade und ca. 10° nach unten geneigt.

Unmittelbar nach Abstoß vom Balken nimmt der Springer eine Hockposition ein. Während des Anlaufs versucht der Springer möglichst viel Geschwindigkeit aufzunehmen und die besten Bedingungen für den Absprung zu schaffen. Die Hockposition muss tief genug sein, um durch einen möglichst geringen Luftwiderstand eine maximale horizontale Geschwindigkeit für den anschließenden Flug zu erreichen. Andererseits muss die Position hoch genug sein, um eine schnelle Beinstreckung während des Absprungs zu ermöglichen.

Die senkrecht zur Anlaufspur gerichteten Kräfte während des geraden und des gekrümmten Abschnitts des Anlaufs – ohne Berücksichtigung der aerodynamischen Kräfte – sind in Abb. 1 und durch die Gleichung (1) dargestellt. Während des geraden Abschnitts ist dies die Normale der Gewichtskraft zur Anlaufspur [$F_N(t)$]. Wenn der Skispringer den Übergangsbogen durchfährt, erhöht sich diese um die Komponente der Zentrifugalkraft [$F_C(t)$].

$$(1) \quad F_{NC}(t) = F_N(t) + F_C(t) = m \cdot g \cdot \cos \varphi(t) + \frac{m \cdot v^2(t)}{r(t)}$$

1.2 Absprung

Der Absprung wird als die wichtigste, aber auch schwierigste Phase des Skispringens betrachtet, da innerhalb sehr kurzer Zeit die Anfangsbedingungen für den anschließenden Flug geschaffen werden müssen. Ein Skispringer führt die Absprungbewegung innerhalb von ca. 300 ms aus. Selbst für erfahrene Skispringer ist dies eine Herausforderung, vor allem wenn man berücksichtigt, dass der Absprung bei einer Anlaufgeschwindigkeit von bis zu 25 m/s durchgeführt werden muss. Erwartungsgemäß wird der Absprung in der biomechanischen Fachliteratur zum Skispringen breit thematisiert.

Der Absprung ist durch eine explosive Beinstreckung charakterisiert, die etwa beim Übergang zwischen dem „Radius“ und dem Schanzentisch beginnt. Die Hauptfunktionen dieser Phase sind die Erhöhung des Körperschwerpunkts und das Erreichen

eines vorwärtsgerichteten Drehimpulses. Diese beiden Faktoren bestimmen, zusammen mit der Aerodynamik, die Anfangsbedingungen für den Flug.

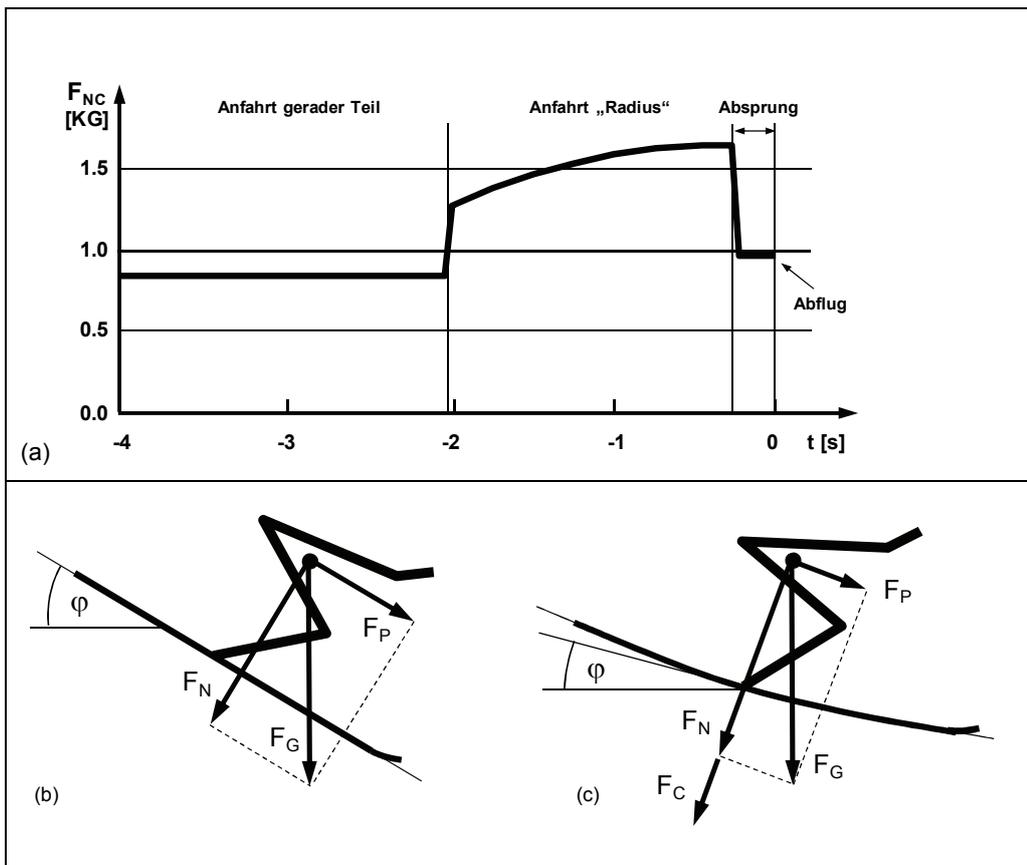


Abb. 1: (a) Kräfte normal zur Anlaufspur als Funktion der Zeit ohne Absprungbewegung basierend auf Gleichung (1) ($F_{NC}(t)$). Aerodynamische Kräfte und Reibung sind nicht berücksichtigt; φ (Neigung des Anlaufs), v (Geschwindigkeit) und r (Radius des Übergangsbogens) werden mit plausiblen Größen angenommen. (b) Kraftkomponenten während des Anlaufs im geraden Teil. F_G = Gewicht des Ski-Skispringer-Systems, F_P = Komponente parallel zur Anlaufspur, F_N = Komponente normal zur Anlaufspur. (c) Kraftkomponenten während der Anfahrt im Übergangsbogen, F_C = Zentrifugalkraft

Das Ausmaß und die Richtung der vom Skispringer erzeugten Absprungkräfte sind von entscheidender Bedeutung. Die Änderung des vertikalen Impulses und folglich die Änderung der vertikalen Geschwindigkeit ist proportional zu den Vertikalkräften, die während des Absprungs erzeugt werden. Da die vertikale Position und die Geschwindigkeit des Skispringers am Ende des Absprungs einen entscheidenden

Einfluss auf die Anfangsbedingungen des Flugs haben, sollten die senkrecht auf den Absprungtisch gerichteten Absprungkräfte maximiert werden. Dies kann durch eine möglichst schnelle Bein Streckung erreicht werden.

Während des Absprungs muss der Skispringer aber auch einen vorwärtsgerichteten Drehimpuls erzeugen, um den durch die Luftkräfte auf das System Springer-Ski erzeugten rückwärtsgerichteten Drehimpuls während der ersten Flugphase zu kompensieren. Infolgedessen passiert der Vektor der Bodenreaktionskraft während des Absprungs den Körperschwerpunkt (KSP) posterior (Abb. 2). Diese Kraft setzt sich aus den normal und tangential (Reibung) gerichteten Bodenreaktionskomponenten zusammen. Die Reibungskraft zwischen Ski und Spur ist auf Grund des geringen Reibungskoeffizienten allerdings sehr klein.

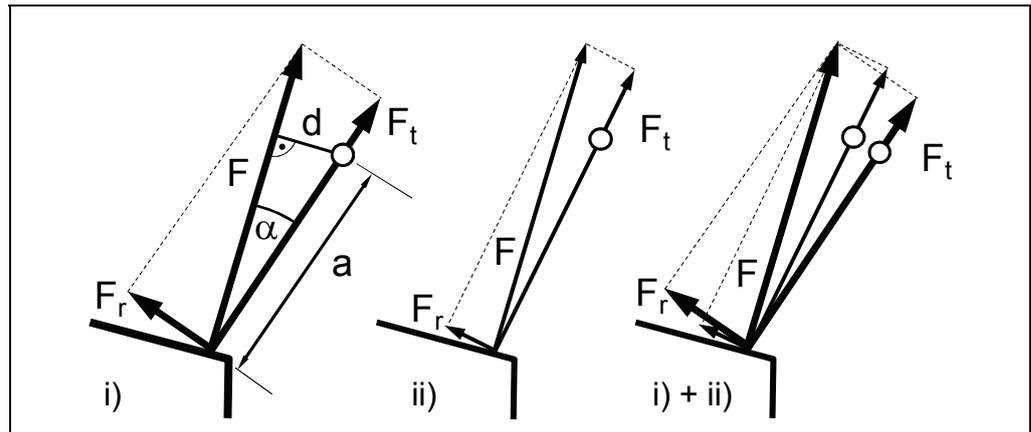


Abb. 2: Resultierende Kraft (F) und Kraftkomponenten (F_t = tangentielle Komponente, F_r = rotatorische Komponente) während des Absprungs mit unterschiedlichen relativen Positionen des Körperschwerpunkts (KSP). a = Momentarm von F_r relativ zum KSP, d = Momentarm von F relativ zum KSP

Die resultierende Bodenreaktionskraft kann in eine translatorische Komponente durch den KSP (F_t) und eine normal dazu gerichtete rotatorische Komponente (F_r) zerlegt werden (2), (3). α ist definiert als der Winkel zwischen der resultierenden Kraft F und der translatorischen Komponente F_t (Abb. 2).

$$(2) \quad F_t(t) = F(t) \cdot \cos \alpha(t)$$

$$(3) \quad F_r(t) = F(t) \cdot \sin \alpha(t)$$

Die Kraft F_t bestimmt die Änderung des Impulses (Δp) und erhöht somit die vertikale Geschwindigkeit des KSP während des Absprungs (4). Die Kraft F_r mal dem Momentarm a bezüglich des KSP (ist identisch mit F mal Momentarm d) bestimmt die Änderung des Drehimpulses (ΔL) während des Absprungs (5).

$$(4) \quad \Delta p = \int F_t(t) dt$$

$$(5) \quad \Delta L = \int (F_r(t) \cdot a(t)) dt = \int (F(t) \cdot d(t)) dt$$

Einfache geometrische Überlegungen verdeutlichen, dass die Änderung der Körperschwerpunktposition bezüglich des resultierenden Bodenreaktionskraftvektors wesentlich mehr Einfluss auf die Größe der Rotationskomponente (F_r) als auf die translatorische Komponente (F_t) hat (Abb. 2). Diese Tatsache verdeutlicht einerseits die hohe Sensitivität der Absprungbewegung auf den anschließenden Flug und andererseits die hohen koordinativen Anforderungen an den Skispringer für den Absprung. Diese Zusammenhänge sind in der Literatur bislang weder systematisch noch hinreichend genau diskutiert worden. Auf Grund ihrer Bedeutung auf die Leistung im Skispringen ist es notwendig, diese Aspekte sowohl theoretisch als auch experimentell zu untersuchen.

1.3 Erste Flugphase

Die erste Flugphase bildet den Übergang vom Absprung zur stabilen Flugphase. Unmittelbar nach dem Abflug hebt der Skispringer durch Dorsalflexion der Sprunggelenke die Skispitzen allmählich und kontinuierlich an, so dass der Luftstrom auf eine kleinere Skioberfläche einwirkt. Zusammen mit dem Luftwiderstand auf den Körper des Skispringers erzeugt der Luftwiderstand auf die Ski einen rückwärtsgerichteten Drehimpuls. Diesen muss der Skispringer während des Absprungs durch einen vorwärtsgerichteten Drehimpuls ausgleichen (Schwameder & Müller, 1995) (Abb. 3).

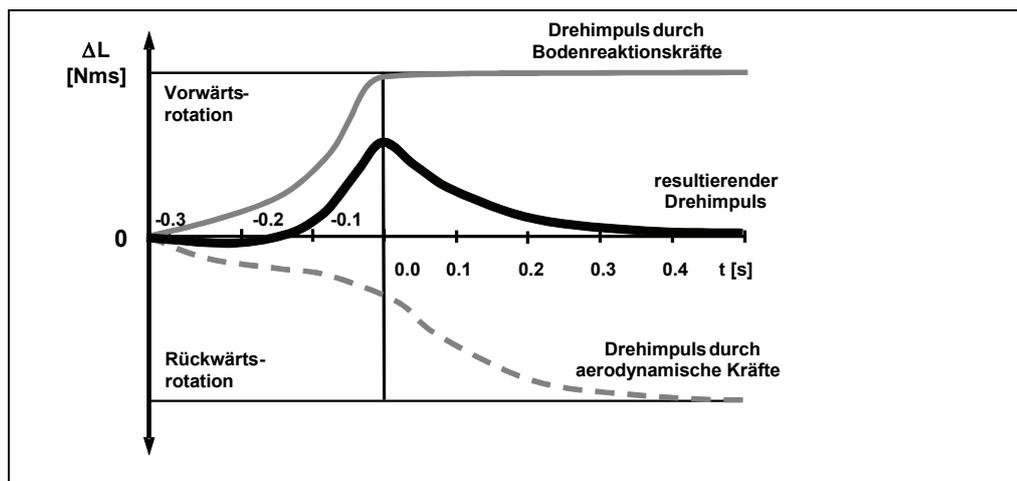


Abb. 3: Schematische Beschreibung des Drehimpulses auf das Springer-Ski-System während des Absprungs (negative Zeit) und des Fluges (positive Zeit). Die Abschätzung des Drehimpulses durch die Bodenreaktionskräfte basiert auf den Daten von Schwameder & Müller (1995).

Die Herausforderung an den Skispringer ist in dieser Phase das möglichst schnelle Erreichen der stabilen Flugphase. Gemeinsam mit dem Absprung wird die erste Flugphase als die kritischste Phase bezüglich der Sprungweite angesehen (Arndt et al., 1995; Schwameder & Müller, 1995; Schwameder et al., 2005; Virmavirta et al., 2005).

1.4 Stabiler Flug

Aus biomechanischer Sicht wird diese Phase durch die Schwerkraft, den aerodynamischen Auftrieb und den Luftwiderstand bestimmt. Das Ziel des Athleten ist das Erreichen eines optimalen Auftrieb-Luftwiderstand-Verhältnisses bei gleichzeitiger Erhaltung eines stabilen Springer-Ski-Systems. Eine stabile Flugposition ist erreicht, wenn der am Ende des Absprungs vorwärtsgerichtete Drehimpuls den während der ersten Flugphase auftretenden rückwärtsgerichteten Drehimpuls vollständig kompensiert hat. Den stabilen Flug möglichst schnell zu erreichen ist eine große Herausforderung an den Skispringer und ist entscheidend für einen erfolgreichen Sprung.

1.5 Landungsvorbereitung und Landung

Die beiden letzten Bewegungsphasen sollen einen sauberen Übergang vom Flug zum Aufsetzen ermöglichen. Um große Flugweiten zu erreichen, versuchen Skispringer die Landungsvorbereitung so lang und so weit wie möglich herauszuschieben. Diese Strategie kann jedoch zu einer unsicheren und unsauberen Landung führen, was weder für die Bewertung noch für die Sicherheit förderlich ist. Wird die Landung nicht in einer Schrittstellung („Telemark-Landung“) durchgeführt, gibt es Abzüge in den Haltungsnoten.

2 Biomechanische Untersuchungsmethoden

Biomechanische Untersuchungen im Skispringen gehen bis in die Mitte der 1920er-Jahre zurück, als Straumann (1926, 1927) mit Hilfe von Flugkurvenberechnungen und Windkanalmessungen versucht hat, optimale Flughaltungen zu bestimmen. Inzwischen stehen hoch komplexe Methoden zur Verfügung, um Kinematik, Dynamik, Aktivierungsmuster der Muskulatur und Aerodynamik im Skispringen zu untersuchen (Tab. 1 u. 2). Diese Methoden sind für die Untersuchungen sowohl von Schanzensprüngen (Training und Wettkampf) als auch von Imitationssprüngen verwendet worden.

2.1 Kinematik

Bei der Untersuchung von biomechanischen Aspekten des Skispringens sind am häufigsten kinematische Analysen durchgeführt worden, wobei von Schanzensprüngen wesentlich mehr Ergebnisse vorliegen als von Imitationssprüngen. Frühe Studien verwenden überwiegend zweidimensionale Methoden für die Beschreibung der Bewegung in der Sagittalebene (Baumann, 1979; Hochmuth, 1964; Jost, 1994; Komi, Nelson & Pulli, 1974a, 1974b; Sasaki et al., 1997; Schmölzer & Müller, 2002, 2005; Vaverka et al., 1997). Synchronisierte und feste Kameras werden senkrecht zur Flugkurve aufgestellt, sodass ein bestimmter Abschnitt des Absprungs oder des

Flugs betrachtet werden kann (z. B. Komi et al., 1974a, 1974b; Schmölzer & Müller, 2005). Jüngere Studien liefern dreidimensionale kinematische Daten (Arndt et al., 1995; Schwameder & Müller, 1995; Schwameder et al., 2005; Virmavirta et al., 2005). Schwenken, Neigen und in manchen Fällen auch Zoomen der Kameras sind hier nötig, um einen hinreichend großen Bildausschnitt des Skispringers zu erhalten. Zur Bestimmung der dreidimensionalen Ortkoordinaten von Objektpunkten aus den Videodaten werden entweder Stative mit elektronischen Winkelmessern (Virmavirta et al., 2005) verwendet oder es wird eine spezielle Software unter Verwendung der Positionen von Referenzmarkern (Schwameder & Müller, 1995; Schwameder et al., 2005) eingesetzt. Der große Bewegungsumfang im Skispringen stellt an kinematische Untersuchungen von Schanzensprüngen eine besondere Herausforderung dar.

Tab. 1: Die in den referenzierten Publikationen verwendeten biomechanischen Methoden im Skisprung (2D = 2D Kinematik, 3D = 3D Kinematik, aK = andere kinematische Methoden, KP = Kraftmessplatte, DS = Druckmesssohlen, MD = mobiles dynamisches System, EM = Elektromyografie, WK = Windkanal, MCS = Modellierung und Computersimulation, aM = andere Methoden, Te = Testvorrichtungen, Leistungsdiagnostik, SW = Schanzensprünge – Wettkampf, ST = Schanzensprünge – Training, Lab = Imitationssprünge im Labor, ÜS = Übersichtsartikel)

Autor(en)	Jahr	2D	3D	aK	KP	DS	MD	EM	WK	MCS	aM	Te	SW	ST	Lab	ÜS
Arndt et al.	1995		♦										♦			
Baumann	1979	♦											♦			
Bogdanov et al.	1981							♦							♦	
Bogdanov et al.	1982							♦							♦	
Bruhn et al.	2002				♦							♦			♦	
Campbell	1980	♦											♦			
Denoth et al.	1987	♦								♦			♦			
Dillman et al.	1980				♦							♦			♦	
Dzelalija et al.	2003									♦						
Ettema et al.	2005									♦						
Fayet et al.	1993									♦						
Franz & Hoffmann	1990															♦
Gasser	1979	♦														
Gisler et al.	1977	♦														
Grozin	1971													♦		
Hahn et al.	2005											♦				
Hemmann et al.	1982	♦								♦						
Hildebrand & Mahnke	2003															♦
Hochmuth	1954	♦			♦									♦	♦	
Hochmuth	58/59	♦			♦										♦	
Hochmuth	1959	♦								♦						
Hochmuth	1964	♦			♦					♦					♦	
Hoff et al.	2001				♦							♦			♦	
Hubbard et al.	1989	♦								♦						
Janura et al.	1999	♦											♦			
Jin et al.	1995								♦	♦						
Jost	1994	♦											♦			
Kaps et al.	1997		♦			♦				♦				♦		
Klauck	1989															♦
Komi et al.	1974a	♦											♦			
Komi et al.	1974b	♦											♦			
Komi & Virmavirta	1997															♦
König	1952	♦								♦			♦			
Luhtanen et al.	1987	♦											♦			
Lustenberger	1987			♦												

Autor(en)	Jahr	2D	3D	aK	KP	DS	MD	EM	WK	MCS	aM	Te	SW	ST	Lab	ÜS
Mahnke & Mross	1975			♦												
Mahnke	1990								♦	♦						
Mahnke & Hochmuth	1990						♦		♦	♦					♦	
Mahnke & Mross	1995	♦											♦			
Mross	1981	♦											♦	♦		
Mross & Lehmann	1986				♦										♦	
Mross & Hofmann	1988	♦											♦	♦		
Müller W. et al.	1995	♦							♦	♦			♦			
Müller W. et al.	1996	♦							♦	♦			♦			
Müller W.	1997	♦							♦	♦			♦			
Müller E. & Schwameder	2003															♦
Müller W. et al.	2006										♦		♦			
Munzert et al.	1993			♦	♦							♦			♦	
Pedotti & Rodano	1987				♦										♦	
Remizov	1984									♦						
Sasaki H et al.	2005				♦							♦			♦	
Sasaki & Tsunoda	1988	♦												♦	♦	
Sasaki et al.	1989	♦											♦			
Sasaki et al.	1990	♦											♦		♦	
Sasaki et al.	1993a	♦			♦					♦					♦	
Sasaki et al.	1993b	♦			♦					♦					♦	
Sasaki et al.	1995	♦						♦							♦	
Sasaki et al.	1997	♦								♦			♦			
Sasaki et al.	2001	♦								♦			♦			
Sasaki et al.	2005	♦								♦			♦			
Schmölzer & Müller	2002	♦								♦			♦			
Schmölzer & Müller	2005	♦								♦			♦			
Schwameder	1993		♦											♦		
Schwameder	1994		♦			♦				♦				♦		
Schwameder & Müller	1995		♦			♦								♦		
Schwameder et al.	1997	♦			♦										♦	
Schwameder & Müller	2000	♦			♦							♦			♦	
Schwameder & Müller	2001a															♦
Schwameder & Müller	2001b															♦
Schwameder & Müller	2003															♦
Schwameder et al.	2005		♦										♦			
Segesser et al.	1981				♦									♦		
Seo et al.	2001								♦	♦						
Sobotka & Kastner	1977				♦									♦		
Straumann	1926								♦	♦						
Straumann	1927								♦	♦						
Straumann	1955	♦											♦			
Straumann	1957	♦							♦				♦			
Tani & Iuchi	1971								♦	♦						
Tveit & Pedersen	1981						♦							♦	♦	
Vaverka	1981	♦											♦			
Vaverka	1987	♦			♦								♦		♦	♦
Vaverka & Zhanel	1989	♦											♦			
Vaverka et al.	1993				♦								♦		♦	

Autor(en)	Jahr	2D	3D	aK	KP	DS	MD	EM	WK	MCS	aM	Te	SW	ST	Lab	ÜS
Vaverka et al.	1997	◆											◆			
Virmavirta	1999	◆				◆		◆					◆		◆	
Virmavirta	2000															◆
Virmavirta & Komi	1989				◆											
Virmavirta & Komi	1991				◆			◆						◆		
Virmavirta & Komi	1993a				◆									◆		
Virmavirta & Komi	1993b				◆								◆			
Virmavirta & Komi	1994				◆								◆			
Virmavirta & Komi	2000					◆								◆		
Virmavirta & Komi	2001a	◆				◆		◆							◆	
Virmavirta & Komi	2001b															◆
Virmavirta & Komi	2001c					◆		◆						◆	◆	
Virmavirta et al.	2001a					◆		◆						◆		
Virmavirta et al.	2001b	◆			◆			◆	◆						◆	
Virmavirta et al.	2003		◆										◆			
Virmavirta et al.	2005		◆										◆			
Ward-Smith & Clements	1982	◆							◆	◆						
Ward-Smith & Clements	1983	◆							◆	◆						
Watanabe et al.	1972	◆											◆			
Watanabe & Kawahara	1971	◆			◆										◆	
Watanabe	1983								◆	◆						
Watanabe & Watanabe	1993								◆	◆						
Yamanobe & Watanabe	1999				◆								◆			
Yeadon	1989											◆				

Tab. 2: Absolute und relative Häufigkeiten der in den referenzierten Artikeln verwendeten biomechanischen Methoden (siehe Tab. 1).

	n	%	cumul. %
Kinematik, Schanze, Wettkampf	21	15.0	
Kinematik, Schanze, Training	21	15.0	
Kinematik, Imitationssprünge	7	5.0	35.0
Bodenreaktionskraftanalyse, Schanze, Wettkampf	7	5.0	
Bodenreaktionskraftanalyse, Schanze, Training	13	9.3	
Bodenreaktionskraftanalyse, Imitationssprünge	18	12.8	27.1
Elektromyographie, Schanze, Training	4	2.9	
Elektromyographie, Imitationssprünge	5	3.6	6.5
Modellierung und Computersimulation	9	6.4	
Aerodynamik, Windkanal, Flugposition	24	17.1	23.5
Andere (z. B. Kraftanalyse, Gleichgewicht)	11	7.9	7.9
Summe	140	100.0	100.0

Es liegen ungefähr gleich viele kinematische Studien von Trainings- und Wettkampfsprüngen vor (Tab. 2). Die Datenerfassung während der Trainings sprünge lässt sich bezüglich Organisation, Vorbereitung und Aufzeichnung besser kontrollieren und weist daher höhere Reliabilität auf. Die größere Validität erreicht man allerdings bei Aufnahmen von Sprüngen im Wettkampf.

Zur Kinematik von Imitationssprüngen liegen nur sehr wenige Publikationen vor und diese beschäftigen sich ausschließlich mit zweidimensionalen Analysen (Sasaki & Tsunoda, 1988; Sasaki et al., 1990; Schwameder et al., 1997).

2.2 Bodenreaktionskraft-Analysen

Im Gegensatz zu kinematischen Studien liegen bezüglich der Untersuchung von Bodenreaktionskräften wesentlich mehr Ergebnisse von Imitationssprüngen als von Schanzensprüngen vor, was durch die unterschiedlich komplexe Messmethodik begründet ist. Je nach Ziel der Studie (z. B. Vergleiche mit Schanzensprüngen, Leistungsdiagnostik und Grundlagenforschung) variieren die Methoden der Datenaufnahmen und der Datenanalyse.

Auf Grund technischer Schwierigkeiten bei Messungen der Bodenreaktionskräfte von Schanzensprüngen ist die Anzahl der Publikationen in diesem Bereich limitiert. Die gebräuchlichste Methode bei diesen Messungen ist die über in den Schanzentisch integrierte Kraftmessplatten (Segesser et al., 1981; Vaverka, 1987; Vaverka et al., 1993; Virnavirta & Komi, 1989, 1991, 1993a, 1993b; Wagner, 2004). Der große Vorteil dieser Methodik liegt in der Möglichkeit der rückwirkungsfreien Kraftmessung, d.h. der Springer wird in den Bewegungsabläufen durch die Messung nicht beeinflusst. Deshalb kann sie auch im Wettkampf angewendet werden. Die Anwendung ist allerdings auf den letzten Teil des Anlaufs und den Absprung (~ 10 m) begrenzt. Bisher liegen nur Daten von vertikalen Kraftmessungen vor. Kürzlich sind etliche Schanzen mit dreidimensional messenden Kraftmessplatten unterhalb der Spur im Bereich des Schanzentisches ausgerüstet worden. Mit diesem neuen System kann man die drei Komponenten der Bodenreaktionskraft und somit das Ausmaß und die Richtung der resultierenden Kraft für den linken und den rechten Ski getrennt messen. Ergebnisse aus Studien mit diesem System liegen bislang nicht vor.

In den Ski oder den Sprungschuh eingebaute Messsensoren sind eine weitere Möglichkeit, um die Bodenreaktionskräfte bei Schanzensprüngen zu messen. Der große Vorteil dieses mobilen Systems ist die Aufzeichnung des gesamten Sprungs vom Anlauf bis zur Landung. Allerdings kann dieses nicht während eines Wettkampfs eingesetzt werden. Tveit und Pedersen (1981) sind die Ersten, die diese Methodik verwenden. Ein präziseres und besser differenzierendes System mit zwei Druckmesssohlen (85 Sensoren, Pedar, Novel) wird von Schwameder und Müller (1995) verwendet. Ein anderes Messsystem der Kraftverteilung mit 16 Drucksensoren (Paromed) wird von Virnavirta und Komi (2000, 2001c) vorgestellt und in einigen Studien angewendet.

Kaps et al. (1997) nutzen einen invers-dynamischen Ansatz, um die Bodenreaktionskräfte (errechnet aus kinematischen Daten) mit gleichzeitig durch Pedar-Sohlen gemessenen Absprungkräften bei Schanzensprüngen zu vergleichen. Das Ergebnis weist eine hohe Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den errechneten Kräften auf (weniger als 5 % Unterschied, wenn man den aerodynamischen Auftrieb berücksichtigt), was die Abschätzung von Bodenreaktionskräften aus kinematischen Daten rechtfertigt.

2.3 Muskelaktivierungen

Es liegen nur wenige elektromyografische Studien (EMG) zu Schanzen- und zu Imitationssprüngen vor (Tab. 2). Bei Schanzensprüngen muss die Versuchsperson die EMG-Speichereinheit während der gesamten Bewegungen mitführen. Das kann besonders während des Anlaufs und des Flugs problematisch sein. Diese Schwierigkeiten stellen sich bei Studien zur Erfassung der Muskelaktivität bei Imitationsprüngen nicht. EMG-Studien sind auf grundlegende Beschreibungen der Muskelaktivität und der Koordinationsmuster während des Gesamtsprungs und auf Vergleiche zwischen Schanzen- und Imitationssprüngen beschränkt (Virmavirta & Komi, 2001c; Virmavirta et al., 2001a).

2.4 Aerodynamik

Messungen im Windkanal, aerodynamische Überlegungen, Körperposition relativ zum Ski und Anfangsbedingungen für den Flug werden eingesetzt, um das Verhältnis von Auftrieb und Luftwiderstand zu optimieren und die Sprungweite zu maximieren. Mit Hilfe von Computersimulationen, basierend auf Windkanaldaten sowie experimentell bestimmten ballistischen und aerodynamischen Parametern, wird eine Optimierung der Flugkurven angestrebt (Hubbard et al., 1989; Müller, 1997; Sasaki et al., 2001; Schmölzer & Müller, 2005).

2.5 Weitere Methoden

Über 92 % der hier aufgezeigten wissenschaftlichen Publikationen verwenden die oben beschriebenen Untersuchungsmethoden. Die restlichen Artikel beschäftigen sich mit speziellen Skisprungthemen (beispielsweise Kraft- und Explosivkraftdiagnostik, Gleichgewicht, anthropometrische Merkmale) unter Verwendung anderer biomechanischer Methoden, die aber hier nicht weiter besprochen werden sollen.

3 Forschungsergebnisse

Das folgende Kapitel bezieht sich schwerpunktmäßig auf Forschungsbeiträge zur Biomechanik des Skisprungs zwischen 1991 und 2006, auch wenn vereinzelt auf ältere Beiträge verwiesen wird.

3.1 Untersuchung von Schanzensprüngen

Aufgrund der großen räumlichen Distanzen bei Schanzensprüngen sind mobile Messsysteme erforderlich, wenn der gesamte Sprung untersucht werden soll. Eine

ausführliche biomechanische Beschreibung von Schanzensprüngen bezüglich Kraft, Druckverteilung und Muskelaktivierungsmuster veröffentlichen VirmaVirta und Komi (1991, 2000) (Abb. 4).

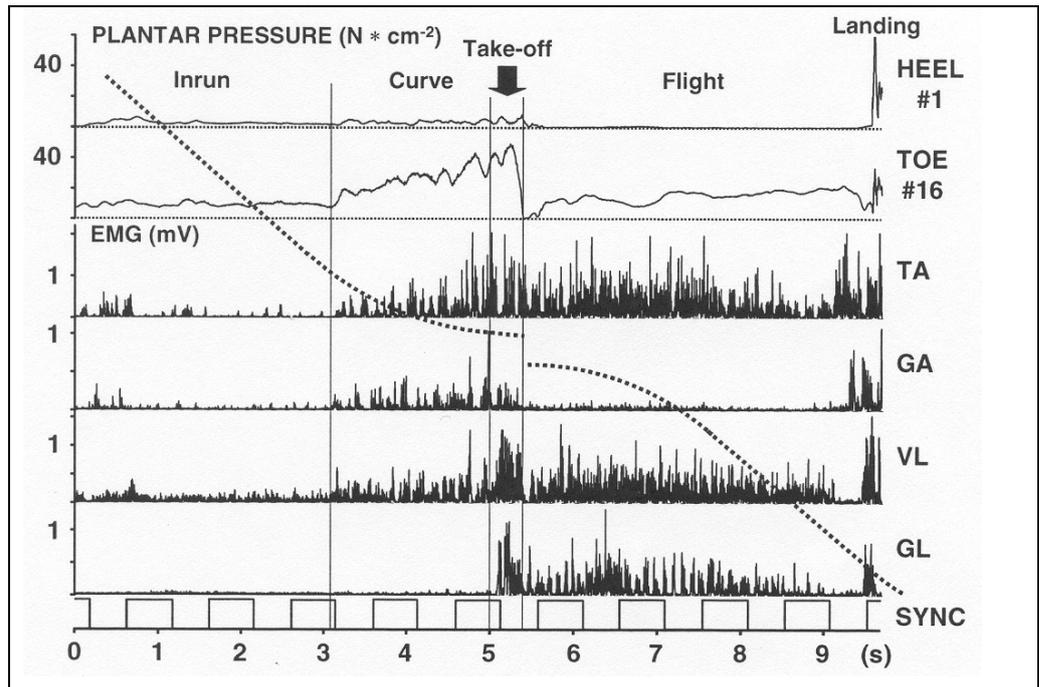


Abb. 4: Vorfuß- und Fersendruck und EMG bei einem Schanzensprung (mit freundlicher Genehmigung von VirmaVirta & Komi, 2000). TA = tibialis anterior, GA = gastrocnemius, VL = vastus lateralis, GL = gluteus maximus. [Copyright © 2000 Human Kinetics. This figure originally appeared in the Journal of Applied Biomechanics, Vol. 16, No. 3, August 2000, p. 322. Used with the permission of Human Kinetics.]

Besonders gut zu beobachten sind hier: der Anstieg des Drucks und der Aktivität von m. tibialis anterior, m. gastrocnemius und m. vastus lateralis während der Anfahrt im ‚Radius‘, die Vorverlagerung des Kraftangriffspunktes im zweiten Teil der Anfahrt und während des Absprungs, die hohe Aktivierung der Bein Streckmuskulatur während des Absprungs und die zunehmende Aktivität von m. tibialis anterior, m. vastus lateralis und m. gluteus maximus während des Flugs.

Schwameder und Müller (1995) veröffentlichen eine detaillierte Beschreibung der Bodenreaktionskräfte (gesamt und ausgewählte Teilkräfte) vom Anlauf bis zur Landung von 22 Schanzensprüngen (Abb. 5). Die Kraftverteilung zwischen Vorfuß und Ferse ist im geraden Teil des Anlaufs weitgehend ausgeglichen. Im ‚Radius‘ und beim Absprung wird eine deutliche Kraftzunahme im Vorfuß beobachtet. Bei der Landung erreichen die Bodenreaktionskräfte Höchstwerte bis zum vierfachen Körpergewicht.

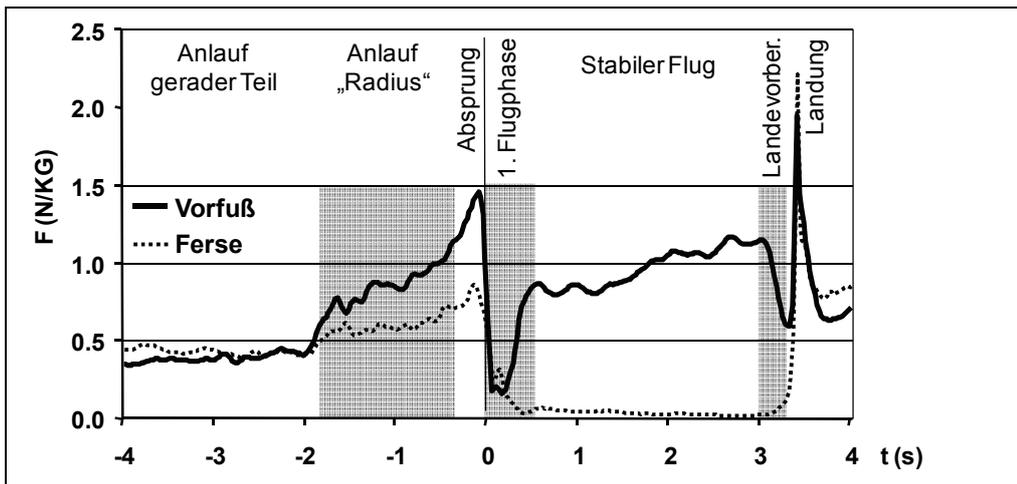


Abb. 5: Bodenreaktionskräfte am Vorfuß und an der Ferse als Funktion der Zeit bei Schanzensprüngen (Mittelwerte, $n = 22$) [modifiziert nach Schwameder & Müller, 1995]

3.2 Anlauf

Zum Anlauf gibt es in den letzten 15 Jahren kaum biomechanische Untersuchungen. Ältere Publikationen zu dieser Phase liegen von Mross (1981), Mross und Hoffmann (1988) und Vaverka und Zhanel (1989) vor. Erwähnenswert sind Schanzen- und Windkanaldaten von Virmavirta et al. (2001b), aus denen Auftriebs- und Luftwiderstandswerte bestimmbar sind. Aus diesen Angaben können Luftwiderstand (100-200 N) und Auftriebskräfte (15-40 N) für den Anlauf abgeschätzt werden.

Der Einfluss der Anlaufposition auf Absprungparameter wird von Schwameder et al. (1997) bei Imitationssprüngen auf einer Kraftmessplatte untersucht. Eine tiefe Anlaufposition steigert die Absprungdauer und verringert signifikant die Explosivkraft im Vergleich zur neutralen Position. Eine hohe Anfahrposition verringert die Absprungdauer und steigert die Explosivkraft. Die vertikale Absprunggeschwindigkeit wird durch die Anlaufposition nicht signifikant beeinflusst.

Ettema et al. (2005) untersuchen mit Hilfe von Mehrkörpersimulationen die Momente in den Gelenken der unteren Extremitäten, die zur Aufrechterhaltung der Anlaufposition notwendig sind. Die Vorbereitung für die anschließende Absprungbewegung wird in der Simulation jedoch nicht berücksichtigt, sodass die Übertragung auf die Praxis stark eingeschränkt ist.

Die Druckverteilung zwischen Vorfuß und Ferse während des Anlaufs wird von Virmavirta und Komi (2000) bei drei Weltklasse-Skispringern untersucht. Die Ergebnisse zeigen hohe inter-individuelle und vergleichsweise sehr geringe intra-individuelle Variabilitäten auf.

EMG-Analysen der Beinmuskulatur zeigen im geraden Teil des Anlaufs geringe Muskelaktivität auf, während im Übergangsbogen die Aktivität der Unterschenkelmuskulatur erheblich ansteigt (Virmavirta & Komi, 1991, 2000). Verschiedene Studien (Virmavirta & Komi, 2000; Virmavirta et al., 2001a) weisen nach, dass während der Fahrt durch den ‚Radius‘ die Anforderung, den Körper in einer zentralen Position zu halten, wesentlich höher ist als im geraden Teil des Anlaufs. Das kann auf die erhöhten Belastungen auf Grund der Zentrifugalkraft und den permanenten Wechsel der Bewegungsrichtung im Übergangsbogen zurückgeführt werden (Abb. 1).

Ähnliche Ergebnisse liefern Studien mit EMG- und Sohlendruckmessungen von Sprüngen an unterschiedlich großen Schanzen (Virmavirta et al., 2001a). Signifikant geringere Muskelaktivität im m. vastus lateralis und geringerer Fußsohlendruck ist auf großen Schanzen festzustellen.

3.3 Absprung

Virmavirta und Komi (1993b) verwenden in den Schanzentisch integrierte Kraftmessplatten, um die Bodenreaktionskräfte bei Weltklasse- und bei Nachwuchsspringern im Wettkampf zu bestimmen. Die Maximalkräfte der Nachwuchsspringer sind signifikant geringer und werden signifikant später erreicht als bei den Weltklasespringern. Des Weiteren vergleichen Virmavirta & Komi (1994) die Maximalwerte des Siegers des Wettkampfs mit jenen der Springer auf den Plätzen 2 bis 9. Sie beobachten, dass der Kraftverlauf des Siegers durch einen Kraftanstieg gegen Ende des Absprungs charakterisiert ist. Darüber hinaus schließen die Autoren, dass das Messsystem geeignet ist, um geringe Unterschiede der individuellen Absprungtechnik zu registrieren (Virmavirta & Komi, 1993a).

Um die Verteilung der Drehmomente, der Leistung und der Energie auf die Strukturen um das Hüft- und das Kniegelenk während des Absprungs abschätzen zu können, erfassen Sasaki et al. (1997) kinematische Daten unter Wettkampfbedingungen und analysieren sie mit Hilfe eines invers-dynamischen Ansatzes. Drei unterschiedliche Absprungtechniken können auf Grund der spezifischen Muster der produzierten Gelenkkraft beobachtet werden. Außerdem spielen die Hüft- und die Kniegelenke bei der Leistungs- und Krafterzeugung jeder Sprungtechnik eine wichtige Rolle.

Die Druckverteilung an der Fußsohle und die EMG-Aktivität bei Absprungbewegungen auf verschiedenen großen Schanzen werden von Virmavirta et al. (2001a) untersucht. Die beobachteten Unterschiede sind plausibel und können durch die unterschiedlichen Schanzengrößen erklärt werden. Das Timing der Bewegung hängt allerdings nicht von der Schanzengröße ab. Die Autoren schließen daraus, dass Skisprungtraining auf kleinen Schanzen keinen negativen Effekt auf das Bewegungsmuster für größere Schanzen hat und spezielles Absprungtraining mit niedriger Geschwindigkeit ebenfalls hilfreich sein kann.

Mit demselben Untersuchungsdesign werden drei Weltklasse-Skispringer untersucht, um individuelle Unterschiede der Druckverteilung anterior-posterior während des Absprungs zu bestimmen. Es werden große inter- und sehr geringe intra-individuelle Unterschiede beobachtet (Virmavirta & Komi, 2000).

Die Variabilitäten während des Absprungs werden von Vaverka et al. (1997) systematisch untersucht. Die größte Variabilität findet man für die Rumpfposition und die anterior-posteriore Position des KSP. Des Weiteren können während des Absprungs personenspezifische Variabilitäten beobachtet werden.

3.4 Schanzensprünge versus Imitationssprünge

Die Anzahl der Trainingssprünge auf Schanzen ist wegen des hohen organisatorischen Aufwands erheblich begrenzt. Deshalb werden immer häufiger simulierte Absprünge, sogenannte Imitationssprünge zum spezifischen Techniktraining herangezogen. Die Reibung mit dem Untergrund und die aerodynamischen Kräfte unterscheiden sich allerdings wesentlich zwischen Schanzen- und Imitationssprüngen. Deshalb werden mehrere Versuche unternommen, die Absprungmuster in den beiden Bedingungen vergleichend zu untersuchen. Die erste vergleichende kinetische Analyse wird von Tveit und Pedersen (1981) vorgestellt, wobei die Sprungski mit kleinen Kraftmessdosen unter den Fersen und den Ballen bestückt werden. Dabei werden signifikant höhere Bodenreaktionskräfte bei Imitationssprüngen und unterschiedliche Kraftverteilungen beobachtet.

Vaverka et al. (1993) zeigen mit Hilfe von kinematischen Messungen, dass bei Schanzensprüngen durchschnittlich nur 72 % der Geschwindigkeit bei Imitationssprüngen erreicht werden. Basierend auf der hohen Korrelation zwischen den Geschwindigkeiten unter Real- und Laborbedingungen ($r = 0,89$) erachten die Autoren jedoch Imitationssprünge als einen validen Indikator für die Absprungfähigkeiten von Skispringern.

Eine vergleichende Analyse des Drucks in bestimmten Bereichen des Fußes und der Aktivität von *m. tibialis anterior*, *m. gastrocnemius*, *m. vastus lateralis*, *m. biceps femoris* und *m. gluteus maximus* zwischen Schanzen- und Imitationssprüngen wird von Virmavirta und Komi (2001c) vorgelegt. Die Daten beziehen sich auf den Anlauf und den Absprung, der in Abschnitten von 100 ms differenziert wird. In allen Phasen differieren der Fußsohlendruck und das Muskelaktivierungsmuster signifikant zwischen Schanzen- und Imitationssprüngen. Die größten Unterschiede zeigen sich vor dem Absprung, was auf die unterschiedlichen Zentrifugal-, Reibungs- und aerodynamischen Kräfte zurückgeführt wird. Zur effektiven Kraftaktivierung während des Absprungs scheint eine gleichmäßige Druckverteilung zwischen Vorfuß und Ferse vorteilhaft zu sein, da auf diese Weise die Hüft- und Kniestreckmuskulatur während des Absprungs optimal eingesetzt werden kann.

Der Hauptunterschied zwischen Schanzen- und Imitationssprüngen liegt in der Dauer des Absprungs. Diese schwankt bei Schanzensprüngen zwischen 250 und 300 ms, während sie bei Imitationssprüngen bis zu 500 ms betragen kann. Die unterschiedliche Dauer kann durch die Vorbereitung des Absprungs bei Imitationssprüngen (über 50 ms), die unvollständige Kniestreckung bei Schanzensprüngen (65-80 ms), den aerodynamischen Auftrieb bei Schanzensprüngen (30-60 ms) und das unterschiedliche Schuhwerk (Trainings- vs. Sprungschuhe, 20 ms) erklärt werden.

Der Einfluss von Windbedingungen auf die Absprungdynamik bei Imitationssprüngen wird von Virnavirta et al. (2001b) untersucht. Absprungdauer, Maximalkraft und Absprungimpuls dienen als Kriteriumsvariablen. Weltklasse-Springer führen Imitationssprünge in einem Windkanal mit 27 bis 33 m/s Gegenwind genauso gut durch wie Sprünge unter windstillen Bedingungen. Unter Windbedingungen verkürzt sich die Absprungdauer signifikant (bis zu 14 %), während Maximalkraft und Impuls unverändert bleiben. Die Ergebnisse werden durch den unterstützenden Auftrieb beim Absprung unter Windbedingungen erklärt. Darauf lassen sich auch die Erhöhung der Explosivkraft und in Folge die dynamische Struktur bei Imitationssprüngen unter Windbedingungen zurückführen. Imitationssprünge im Windkanal erreichen durch Hinzunahme der Aerodynamik ein höheres Maß an Trainingsspezifität.

Der differierende Einfluss von Sprung- und Trainingsschuhen auf dynamische Trainingsparameter und die Muskelaktivität bei Imitationssprüngen wird von Schwameder et al. (1997) untersucht. Die begrenzte Plantarflexion bei Absprüngen mit Sprungschuhen vermindert die Abfluggeschwindigkeit um 4 - 5 %. Eine vergleichende EMG-Analyse des m. gastrocnemius unterstützt diese Feststellung. Deshalb empfehlen die Autoren, zur Steigerung der Trainingsspezifität bei Imitationssprüngen ausschließlich Sprungschuhe zu verwenden. Ähnliche Ergebnisse werden von Virnavirta und Komi (2001a) publiziert. Die Autoren folgern weiter, dass die Steifigkeit der Sprungschuhe möglicherweise eine Verlagerung des Druckpunktes nach vorne bewirkt und somit einen effektiven vertikalen Krafteinsatz limitiert. Dies ist zu berücksichtigen, wenn Schanzen- und Imitationssprünge miteinander verglichen werden.

Auf Grund der limitierten Anzahl von Sprüngen beim Schanzentraining ist es sinnvoll, das Techniktraining durch Imitationssprünge zu ergänzen. Möglicher negativer Transfer zwischen Imitations- und Schanzensprüngen sollte durch Kontrolle der Bewegungsmuster (insbesondere in Richtung anterior-posterior) bei Imitationssprüngen minimiert werden (Virnavirta & Komi, 2001c).

3.5 Absprung in Verbindung mit der ersten Flugphase

Die umfangreichste Untersuchung des Absprungs und der ersten Flugphase in der V-Technik wird von Schwameder und Müller (1995) an Hand dreidimensionaler kinematischer Untersuchungen und Druckverteilungsmessungen durchgeführt. Eine multivariate statistische Analyse zeigt, dass die Sprungweite am stärksten mit einer Kombination aus hoher vertikaler Abfluggeschwindigkeit, hoher Kniewinkelgeschwindigkeit, großem vorwärtsgerichteten Drehimpuls während des Absprungs und einem kleinen Winkel zwischen Körper und Ski nach 20 m Flug korreliert ($r = 0,89$). Darüber hinaus zeigt sich eine signifikante Korrelation ($r = 0,61$) zwischen vertikaler Abfluggeschwindigkeit und Sprungweite, wodurch sich die vertikale Absprunggeschwindigkeit als ein wesentlicher limitierender Faktor im Skisprung erweist. Diese Erkenntnis wird durch die Tatsache gestützt, dass sich zwischen Weltklasse- und Nachwuchsspringern signifikante Unterschiede in der vertikalen Abfluggeschwindigkeit zeigen.

Eine unter Wettkampfbedingungen durchgeführte kinematische Untersuchung (Arndt et al., 1995) zeigt, dass eine Kombination aus einer starken Vorwärtsneigung des Oberkörpers, des Unterkörpers und der Ski nach 17 m Flug sowie einem großen Öffnungswinkel der Ski und der Beine nach 17 m Flug am höchsten mit der Sprungweite korreliert ($r = 0,92$). Vergleichsweise gering sind die Korrelationen zwischen der Sprungweite und rein ballistischen Parametern, die die Position und die Geschwindigkeit des Körperschwerpunkts beschreiben ($r = 0,30$).

Virmavirta et al. (2005) veröffentlichen die Ergebnisse einer kinematischen Studie, die bei den Olympischen Spielen 2002 durchgeführt worden ist. Auch hier wird der Vorteil einer schnellen Einnahme der Flugposition bestätigt. Die Sprungweiten korrelieren signifikant mit einem kleinen Körper-Ski-Winkel und einem großen Skianstellwinkel. Letzteres wird der geringen Luftdichte am Untersuchungsort zugeschrieben. Spezifische Analysen innerhalb der Studien deuten jedoch darauf hin, dass es individuell optimale Lösungen für die Realisierung des Übergangs vom Absprung in die erste Flugphase gibt.

Die Ergebnisse von Virmavirta et al. (2005) decken sich weitgehend mit den Ergebnissen einer weiteren kinematischen Untersuchung während der Olympischen Spiele 2002 (Schwameder et al., 2005). Die besten Prädiktoren für eine große Sprungweite sind eine kompakte Flugposition und eine starke Vorwärtsneigung des Körpers bezüglich der Flugkurve gegen Ende des frühen Flugs (1,0 s). Diese Einzel-Korrelationen sind allerdings gering und können nicht mehr als 26 % der Variation der Sprungweite erklären. Die Korrelation erhöht sich wesentlich, wenn ballistische Variablen (Segment- und Skiwinkel nach 1,0 s Flug) hinzugenommen werden. Basierend auf einer multivariaten Korrelation können 71 % der Variation der Sprungweite durch eine Kombination von ballistischen (Position und Geschwindigkeit des Körperschwerpunkts) und aerodynamischen Parametern zum Zeitpunkt 1,0 s nach dem Absprung erklärt werden. Da die ballistischen Variablen beim Absprung die Sprungweite nicht signifikant beeinflussen, müssen die Geschwindigkeitskomponenten während der ersten Flugphase durch aerodynamische Komponenten beeinflusst sein. Dies deutet darauf hin, dass das rasche Einnehmen einer kompakten Flugposition (Vorwärtsneigung und kleiner Körper-Ski-Winkel) eine Zunahme der Sprungweite durch eine Verringerung der Fallgeschwindigkeit (negativ vertikale Geschwindigkeit) des Körperschwerpunkts auf Grund der Steigerung des aerodynamischen Auftriebs während der ersten Flugphase mit sich bringt. Die geringen bivariaten Korrelationen zwischen den Variablen und der Leistung deuten an, dass es unterschiedliche Optimallösungen für einzelne Springer geben dürfte.

Mittels eines invers-dynamischen Ansatzes, basierend auf kinematischen Daten von zwei Springern von einem Wettkampf, berechnen Sasaki et al. (2005) Kräfte auf den Körperschwerpunkt sowie Sprung-, Knie- und Hüftgelenkmomente und Drehmomente auf die Ski während des Absprungs und in der ersten Flugphase. Obwohl die Studie auf den Daten von zwei Probanden basiert, erhöhen die Ergebnisse das Verständnis darüber, wie und in welchem Ausmaß einzelne Springer die Gelenkmomente während der untersuchten Phasen produzieren.

3.6 Stabiler Flug

Weltklasse-Skispringer schaffen es, den stabilen Flug innerhalb 0,5 s nach dem Absprung einzunehmen (Schwameder et al., 2005; Virmavirta et al., 2005). Sowohl Wettkampfergebnisse als auch Forschungsarbeiten zeigen zweifelsfrei einen aerodynamischen Vorteil der V-Technik gegenüber der zuvor verwendeten Flugtechnik mit paralleler Skiführung auf. Bei der V-Technik werden die Ski unmittelbar nach dem Absprung in eine V-Position gebracht. Diese Technik ermöglicht eine stärker ausgeprägte Vorwärtsneigung des Körpers bezüglich der Bewegungsrichtung sowie einen kleineren Winkel zwischen Körper des Springers und den Skiern. Daraus resultiert ein verbessertes Auftriebs-Luftwiderstands-Verhältnis ohne Verlust der Flugstabilität (Müller et al., 1996). Windkanalmessungen, Computersimulationen und experimentelle Feldstudien bestätigen diese Beobachtungen (Arndt et al., 1995; Jin et al., 1995; Mahnke & Hochmuth, 1990; Schwameder & Müller, 1995; Schwameder et al., 2005; Virmavirta et al., 2005).

Etlche Studien beschäftigen sich mit Variablen, die die Sprungweite beeinflussen. Jin et al. (1995) weisen mit Hilfe von Computersimulationen, in die Daten von Windkanalmessungen mit paralleler Skiführung und zwei verschiedenen V-Positionen einfließen, deutlich den Vorteil der V-Technik in Bezug auf die Sprungweite nach. Die besten Leistungen können entweder mit der „flachen V-Technik“ oder mit einem Wechsel von der „flachen V-Technik“ in die V-Technik nach 1.6 s Flug erwartet werden. Darüber hinaus steigert eine anfänglich vorwärtsgerichtete Winkelgeschwindigkeit die Sprungweite.

Unter Verwendung eines Holzmodells im Windkanal untersuchen Watanabe und Watanabe (1993) aerodynamische Kräfte und das Kippmoment als Funktion des Skianstellwinkels und des Körper-Ski-Winkels. Sie beobachten, dass eine Verringerung des Körper-Ski-Winkels die Sprungweite auf Grund einer Reduzierung der Wirbelströme über dem Rücken des Springers erhöht.

Jost (1994) zeigt die Unterschiede in der Kinematik zwischen paralleler Skiführung und V-Technik basierend auf kinematischen Daten aus einem Wettkampf auf. Die Körperposition ist bei der V-Technik stärker in Richtung Horizontale geneigt, der Körper-Ski-Winkel ist kleiner und der Hüftwinkel größer. Selbst mit geringerer Körperschwerpunkthöhe erreichen die Springer deutlich größere Sprungweiten.

Um den Effekt der aerodynamischen Kraft während des stabilen Flugs zu verdeutlichen, sammeln Sasaki et al. (2001) kinematische Daten von 10 Weltklasse-Springern während des Wettkampfs, die als Eingangswerte für ein Computermodell dienen. Sie folgern, dass die mathematischen Modelle die empirisch beobachteten Auftriebs- und Luftwiderstandskräfte, den ständigen Wechsel der aerodynamischen Kräfte während des Flugs und die individual-spezifischen aerodynamischen Kräfte während des stabilen Flugs sehr gut abzuschätzen in der Lage sind.

Um die Unterschiede der Flugpositionen einzelner Skispringer, die Wiederholbarkeit individueller Flugstile und den Einfluss der Luftdichte bei verschiedenen Flugstilen zu erforschen, führen Schmölder und Müller (2002) eine kinematische Feldstudie bei den Olympischen Spielen 2002 durch. Große inter-individuelle und geringe intra-

individuelle Unterschiede werden beobachtet. Darüber hinaus werden die Daten als Eingabewerte für Computersimulationen verwendet, um den Einfluss des Body-Mass-Index des Athleten auf die Sprunglänge zu untersuchen. Die Simulationen zeigen, dass leichte Athleten eine stärker ausgeprägte Vorwärtsneigung einnehmen können, ohne dabei die Stabilität zu verlieren, und folglich ihre Sprungweite erhöhen können. Die empirischen Ergebnisse decken sich weitgehend mit früheren Veröffentlichungen im Zusammenhang mit Schanzenkonstruktion (Maßnahmen zur Beeinflussung der Aerodynamik und der Flugkurve), Ausrüstung, Regelwerk, Fairness, Sicherheit und Gesundheit (Müller, 1997; Müller et al., 1995, 1996; Müller et al., 2006; Schmölzer & Müller, 2002).

Interessante Ergebnisse hinsichtlich Flugposition, Aerodynamik und von Windkanalexperimenten, die sich allerdings auf Flugtechniken mit paralleler Skiführung beziehen, liegen von Straumann (1926), Hochmuth (1954), Tani und Iuchi (1971), Baumann (1979), Ward-Smith und Clements (1982), Watanabe (1983), Remizov (1984), Denoth et al. (1987), Hubbard et al. (1989), Mahnke (1990) und Mahnke und Hochmuth (1990) vor.

3.7 Landevorbereitung

Trotz der Bedeutung des Bodeneffekts (Änderung des aerodynamischen Auftriebs auf nahe über dem Boden fliegende Objekte) auf die aerodynamischen Bedingungen während des letzten Teils des Flugs, also der Landevorbereitung, liegen nur wenige empirische Studien zu dieser Phase vor (Ward-Smith & Clements, 1982). In einem Windkanalexperiment weisen Seo et al. (2001) einen erheblichen positiven Einfluss des Bodeneffekts sowohl auf die Sprungweite als auch auf die Landestabilität nach.

3.8 Landung

Einige wenige biomechanische Studien beschäftigen sich mit der Landung im Skispringen (Hochmuth, 1999; Ranta & van Hetzen, 1999). Schwameder und Müller (1995) und Virnavirta und Komi (2000) messen mit Hilfe von Druckmesssohlen die Bodenreaktionskräfte während der Landung. Je nach Landetechnik werden Höchstbelastungen des 1.5- bis 3-fachen Körpergewichts gemessen. Auf der Grundlage von theoretischen Betrachtungen, kinematischen Daten der Landephase und experimentellen Studien bezüglich der elastischen Durchbiegung der Sprungski während der Landung behandelt Hochmuth (1999) den Umfang des Energieverlusts an den Skiern und beim Skispringer bei unterschiedlichen Landetechniken. Die Ergebnisse werden verwendet, um sich mit der Telemarklandung hinsichtlich funktioneller und sicherheitstechnischer Aspekte kritisch auseinanderzusetzen.

3.9 Leistungsdiagnostik

Eine umfangreiche Übersicht zu leistungsbestimmenden Faktoren für den Absprung wird von Komi und Virnavirta (1997) vorgelegt. Sie umfasst neuromuskuläre Aspekte, Muskelmechanik, Koordinationsmuster sowie reine mechanische und aerodynamische Aspekte. Die Autoren ordnen diese Variablen der Explosivität des Absprungs zu und betrachten den möglichen Einfluss der anfänglichen Plantarflexion, der

Muskelkoordinationsmuster, der Winkelgeschwindigkeit im Hüftwinkel, der Muskelfaserzusammensetzung und der Aerodynamik auf die Absprungbewegung.

In einer Studie (Schwameder et al., 1997) wird nachgewiesen, dass die Körperposition vor dem Absprung einen signifikanten Effekt auf die Kraftentfaltung während des Absprungs aufweist. Im Allgemeinen korreliert eine hohe Kraftentfaltung bei kleinen Kniewinkeln positiv mit der resultierenden Absprunggeschwindigkeit (Schwameder & Müller, 2000).

Spezielle Leistungsindikatoren werden sowohl für Nachwuchs- als auch für Weltklassespringer identifiziert. Dynamometrische Tests werden verwendet, um die vertikale Absprunggeschwindigkeit, die dynamische Maximalkraft, die Explosivkraft sowie Sprungdauer und -richtung sowohl bei vertikalen Sprüngen als auch bei Imitationssprüngen zu messen (Bruhn et al., 2002; Hoff et al., 2001; Sasaki et al., 2005; Schwameder et al., 1997). Darüber hinaus liegen Untersuchungsergebnisse über das spezifische Kraftvermögen unter isometrischen (Schwameder & Müller, 2000) und isokinetischen (Hahn et al., 2005) Bedingungen vor.

4 Forschungsperspektiven

Der große räumliche Bewegungsumfang im Skispringen bedingt bedeutende Herausforderungen für biomechanische Untersuchungen, insbesondere bei Messungen während eines Wettkampfs. Bislang können unter Wettkampfbedingungen nur kinematische Daten über den gesamten Bewegungsablauf und Bodenreaktionskräfte während des Absprungs erfasst werden. Dennoch hat die Biomechanik des Skisprungs zweifelsohne wesentlich dazu beigetragen, relevante mechanische und biologische Aspekte abzuklären, die Leistung insgesamt zu steigern und Ausrüstungsbestimmungen bezüglich Leistungssteigerung und Sicherheit zu verbessern.

Viele Studien zeigen deutlich, dass sich jede Phase des Skisprungs wesentlich auf die folgende Phase auswirkt und sich eine hohe Leistung nur durch eine feine Abstimmung des Springer-Ski-Systems in jeder dieser Sequenzen ergibt. Der Absprung ist bezüglich der resultierenden Leistung die wichtigste Phase im Skispringen. Dessen Bedeutung hat durch Beschränkungen im Bereich der Flugbedingungen, basierend auf Regeländerungen hinsichtlich Material und Körpergewicht, zusätzlich zugenommen. Obwohl die vertikale Abfluggeschwindigkeit für große Sprungweiten vorteilhaft ist, muss sie nicht notwendigerweise maximiert werden, da die Erzeugung eines vorwärtsgerichteten Drehimpulses während des Absprungs von ähnlich wichtiger Bedeutung sein dürfte. Es ist bislang noch nicht klar, ob der entsprechende Drehimpuls maximiert oder optimiert werden soll. Viele Studien befürworten das Konzept, die stabile Flugposition so schnell wie möglich einzunehmen, was nur durch eine Feinabstimmung der Drehimpulse während des Absprungs und der ersten Flugphase erreicht werden kann.

Für die Flugphase müssen Aspekte bezüglich Leistung, Fairness, Sicherheit und Gesundheit in Betracht gezogen werden. Das Regelwerk hinsichtlich Materialeigenschaften (Ski, Bindung, Anzug) und Materialabstimmung sollte unter Berücksichtigung der Anthropometrie der Athleten so festgelegt werden, dass für alle Springer

faire Bedingungen gegeben sind, gleichzeitig die Sicherheit der Athleten garantiert ist und spannende Wettkämpfe sowohl für die Athleten als auch für die Zuschauer(innen) geboten werden können.

Basierend auf bereits vorliegenden biomechanischen Untersuchungen und unter Berücksichtigung der Kernpunkte des Skispringens sollten sich künftige biomechanische Studien mit folgenden Fragestellungen beschäftigen:

- Klärung der Beziehung zwischen Absprung und erster Flugphase sowie der Bedeutung von vertikaler Abfluggeschwindigkeit und vorwärtsgerichtetem Drehimpuls in diesen Phasen. Theoretische Betrachtungen sollten durch empirische Untersuchungen, die im Absprungtisch implementierte dreidimensionale Kraftmessplatten und Synchronaufnahmen von High-Speed-Kameras verwenden, ergänzt bzw. geprüft werden.
- Ermittlung optimaler Koordinationsmuster unter Berücksichtigung der individuellen Möglichkeiten der Athleten.
- Analyse von Stabilität und Variabilität der Bewegungsmuster zur Verbesserung der Bewegungssteuerung und -kontrolle.
- Entwicklung von Kurzzeit-Feedbacksystemen bezüglich Kinematik und Bodenreaktionskräften bei Schanzensprüngen.
- Vertiefende Vergleiche zwischen Schanzen- und Imitationssprüngen hinsichtlich Kinematik, Dynamik und Muskelaktivierung.
- Analysen von Gelenkbelastungen während des Absprungs und der Landung bei Schanzen- und Imitationssprüngen.
- Beurteilung des Effekts von Ausrüstungsveränderungen auf die Flugphase zur Verbesserung der Sicherheit.
- Grundlagenuntersuchungen für die Konstruktion von Sprungschanzen mit dem Ziel, die Sicherheit der Springer zu gewährleisten, das Verletzungsrisiko zu verringern und die Spannung für die Zuschauer(innen) beim Wettkampf zu wahren.

Weitere Steigerungen von Leistung und Sicherheit im Skispringen können durch verbesserte Trainingsmethoden, Technik- und Leistungsdiagnostik sowie biomechanische Untersuchungen erreicht werden.

Literatur

- Arndt, A., Brüggemann, G. P., Virnavirta, M., & Komi, P. V. (1995). Techniques used by Olympic ski jumpers in the transition from takeoff to early flight. *Journal of Applied Biomechanics*, 11, 224-237.
- Baumann, W. (1979). The biomechanical study of ski jumping. *Proceedings of the International Symposium of Science in Skiing* (pp. 70-95). Japan: Zao.
- Bogdanov, O., Jakovlev, N., Smetankin, A. & Chimic, O. (1981). Elektromyographische Aufzeichnung der Simultanübung "Absprung" von der Skisprungschanze (Russian). *Theorie und Praxis der Körperkultur*, 44, 25-27.

- Bogdanov, O., Jakovlev, N., Smetankin, A. & Chimic, O. (1982). Elektromyographische Aufzeichnung der Muskelaktivität junger Skispringer beim Absprung und Möglichkeit einer gezielten Korrektur (Russian). *Theorie und Praxis der Körperkultur*, 45, 35-38.
- Bruhn, S., Schwirtz, A. & Gollhofer, A. (2002). Diagnose von Kraft- und Sprungkraftparametern zur Trainingssteuerung im Skisprung. *Leistungssport*, 32, 34-37.
- Campbell, K. (1980). Biomechanical analysis of take-off technique in ski-jumping. *Journal of the United States Ski Coaches Association*, 3, 35-41.
- Denoth, J., Luethi, S., & Gasser, H. (1987). Methodological problems in optimization of the flight phase in ski-jumping. *International Journal of Sport Biomechanics*, 3, 404-418.
- Dillman, C., Campbell, K., & Gormley, J. (1980). Force-platform testing of ski jumpers. *Journal of the United States Ski Coaches Association*, 3, 35-38.
- Dzelalija, M., Rausvijevic, N., & Jost, B. (2003). Relationship between jump length and the position angle in ski jumping. *Kinesiologia Slovenica*, 9, 70-79.
- Ettema, G. J., Braten, S., & Bobbert, M. F. (2005). Dynamics of the in-run in ski jumping: a simulation study. *Journal of Applied Biomechanics*, 21, 247-259.
- Fayet, M., Maifreddy, L., Argaud, C., & Lagors, F. (1993). Optimization of the take off phase in ski jumping. *Book of Abstracts, XIVth Congress of the International Society of Biomechanics* (pp. 398-399). Paris.
- Franz, B. & Hoffmann, H. (1990). *Zu Untersuchungen der komplexen Leistung der Biomechanik, Kraft, Technik und Aerodynamik im Skispringen aus der Sicht der internationalen Literatur*. Leipzig.
- Gasser, H. (1979). *Skisprunganalyse Oberstdorf 1979. Forschungsbericht für die FIS in Zusammenarbeit mit dem Biomechanischen Labor der ETH Zürich*. Zürich.
- Gisler, E., Nigg, B. & Waser, J. (1977). Biomechanische Untersuchungen im Skispringen. In F. Fetz (Hrsg.), *Biomechanik des Schilaufts* (S. 98-107). Innsbruck.
- Hahn, D., Schwirtz, A., Huber, A., & Bösl, P. (2005). Discipline-specific biomechanical diagnosis concept in ski jumping. In E. Müller, D. Bacharach, R. Klika, S. Lindinger, & H. Schwameder (Eds.), *Science and Skiing III* (pp. 349-359). Oxford: Meyer & Meyer Sport.
- Hemmman, K., Hildebrand, F. & Mahnke, R. (1982). Kennzeichnung von Leistungsreserven für die Flughaltung im Skispringen. *Theorie und Praxis Leistungssport*, 20, 98-112.
- Hildebrand, F. & Mahnke, R. (2003). Erkenntnisse aus der Modellierung des Skisprungs. *Zeitschrift für angewandte Trainingswissenschaft*, 10(2), 113-131.
- Hochmuth, G. (1954). Die Bedeutung der Bewegungsmechanik auf die Steigerung der sportlichen Leistung. *Theorie und Praxis der Körperkultur*, 3, 814-840.
- Hochmuth, G. (1958/59). Untersuchungen über den Einfluß der Absprungbewegung auf die Sprungweite beim Skispringen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Körperkultur*, 1, 29-59.
- Hochmuth, G. (1959). Die zweckmäßigste Absprungtechnik beim Skispringen. *Theorie und Praxis der Körperkultur*, 8, 505-518.
- Hochmuth, G. (1964). *Untersuchungen über die zweckmäßigste Körper- und Skihaltung im Verlauf des Fluges beim Skispringen*. Habilitationsschrift, Leipzig.
- Hochmuth, G. (1999). Telemark Landing. *FIS Bulletin*, 137, 29-43.
- Hoff, J., Berdahl, G. O., & Braten, S. (2001). Jumping height development and body weight considerations in ski jumping. In E. Müller, H. Schwameder, C. Raschner, S. Lindinger, & E. Kornexl (Eds.), *Science and Skiing II* (pp. 403-412). Hamburg: Kovac.

- Hubbard, M., Hibbard, R., Yeadon, M., & Komor, A. (1989). A multisegmental dynamic model of ski jumping. *International Journal of Sport Biomechanics*, 5, 258-274.
- Janura, M., Lehnert, M., Elfmark, M., & Vaverka, F. (1999). A comparison of the take-off and the transition phase of the ski jumping between the group of the ski jumpers and the competitors in Nordic combined. *Gymnica*, 29 (2), 7-12.
- Jin, H., Shimizu, S., Watanuki, T., Kubota, H., & Kobayashi, K. (1995). Desirable gliding styles and techniques in ski jumping. *Journal of Applied Biomechanics*, 11, 460-474.
- Jost, B. (1994). Differences in some kinematic flight parameters between the classical and the new so called "V" technique in ski jumping. *Kineziologija*, 26, 18-21.
- Kaps, P., Schwameder, H., & Engstler, C. (1997). Inverse dynamic analysis of take-off in ski jumping. In E. Müller, H. Schwameder, E. Kornexl, & C. Raschner (Eds.), *Science and Skiing* (pp. 72-87). London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: E&FN Spon.
- Klauck, J. (1989). Skispringen. In K. Willimczik (Hrsg.), *Biomechanik der Sportarten* (S. 363-376). Reinbek. Rororo.
- Komi, P. V., Nelson, R., & Pulli, M. (1974a). *Biomechanics of Skijumping*. Jyväskylä.
- Komi, P. V., Nelson, R. & Pulli, M. (1974b). Biomechanik des Skisprungs (Biomechanics of ski jumping). *Leistungssport*, 4, 431-450.
- Komi, P. V., & Virmavirta, M. (1997). 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, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: E&FN Spon.
- König, H. (1952). *Theorie des Skispringens angewandt auf die Flugschanze in Oberstdorf. Fortschritt der Uhrentechnik durch Forschung – Vom Skispringen zum Skiflug. Festschrift für R. Straumann* (S. 235-253). Stuttgart.
- Luhtanen, P., Pulli, M., & Komi, P. (1987). A relative model of human movement with special reference to ski jumping. In B. Jonsson (Ed.), *Biomechanics X-B, Vol 6B* (pp. 1145-1149). Baltimore: University Park Press.
- Lustenberger, K. (1987). Messung der Absprunghöhe beim Skispringen. In Schweizerischer Ski-Verband (Hrsg.), *Trainer-Bulletin* (S. 88-100). Bern.
- Mahnke, R. (1990). Die Anwendung der Computersimulation im Skispringen zur Ermittlung zweckmäßiger Flughaltungen. *Training und Wettkampf*, 28, 148-165.
- Mahnke, R. & Mross, M. (1975). Anfahrts-geschwindigkeit und Festlegung der Anlauf-länge im Skispringen. *Theorie und Praxis der Körperkultur*, 24, 67-71.
- Mahnke, R. & Hochmuth, G. (1990). Neue Erkenntnisse zur Luftkraftwirkung beim Skispringen. *Research Report from ‚Forschungsinstitut für Körperkultur und Sport‘*. Leipzig.
- Mahnke, R. & Mross, M. (1995). Analyse zur sportlichen Technik im Skispringen bei den Olympischen Spielen 1994 in Lillehammer und deren Entwicklung im Zeitraum von 1991 bis 1994. In IAT (Hrsg.), *Schriftenreihe zur angewandten Trainingswissenschaft, Bd. 3*, 8-28.
- Mross, H. (1981). Der Einfluß unterschiedlicher Haltungsfehler auf die Anfahrts-geschwindigkeit im Skisprung. *Theorie und Praxis Leistungssport*, 19, 49-65.
- Mross, H. & Lehmann, L. (1986). Ergebnisse von Untersuchungen zur Erhöhung der Qualität der Imitationsübungen im Skisprung. *Theorie und Praxis Leistungssport*, 24, 67-74.
- Mross, H. & Hoffmann, H. (1988). Zur Verbesserung der Anfahrts-haltung als Voraussetzung für die Erhöhung der Anfahrts-geschwindigkeit im Skisprung. *Theorie und Praxis Leistungssport*, 26, 16-25.

- Müller, E., & Schwameder, H. (2003). Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. *Journal of Sports Sciences*, *21*, 679-692.
- Müller, W. (1997). Biomechanics of ski jumping – scientific jumping hill design. In E. Müller, H. Schwameder, E. Kornexl, & C. Raschner (Eds.), *Science and Skiing* (pp. 36-48). London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: E&FN Spon.
- Müller, W., Platzer, D., & Schmölzer, B. (1995). Scientific approach to ski safety. *Nature*, *375*, 455.
- Müller, W., Platzer, D., & Schmölzer, B. (1996). Dynamics of human flight on skis: improvements in safety and fairness in ski jumping. *Journal of Biomechanics*, *29*, 1061-1068.
- Müller, W., Groschl, W., Müller, R., & Sudi, K. (2006). Under weight in ski jumping: The solution of the problem. *International Journal of Sports Medicine*, *27*, 926-934.
- Munzert, J., Scharfenberg, A., Neumaier, A., Mickler, W. & Mester, J. (1993). Simulation der Aufstehbewegung im Skisprung. In R. Dauts & K. Blischke (Hrsg.), *Aufmerksamkeit und Automatisierung in der Sportmotorik* (S. 284-291). St. Augustin: Academia.
- Pedotti, A., & Rodano, R. (1987). Evaluation of biomechanical motor patterns in ski jumpers during simulation of takeoff. In B. Jonsson (Ed.), *Biomechanics X-B* (pp. 679-684). Baltimore: University Park Press.
- Ranta, M., & van Hetzen, R. (1999). *Landing in ski jumping. An expert report for the FIS Technical Board*.
- Remizov, L. (1984). Biomechanics of optimal flight in ski-jumping. *Journal of Biomechanics*, *17*, 167-171.
- Sasaki, H., Tsunoda, K., Hoshino, H., Maeda, K., Koike, T., & Sasaki, T. (2005). Physical characteristics of Japanese female ski jumpers. In E. Müller, D. Bacharach, R. Klika, S. Lindinger, & H. Schwameder (Eds.), *Science and Skiing III* (pp. 360-366). Oxford: Meyer & Meyer Sport.
- Sasaki, T., & Tsunoda, K. (1988). Analytical study of take-off action in ski jumping. *Hokkaido Journal of Physical Education*, *23*, 13-19.
- Sasaki, T., Tsunoda, K., & Nishizono, H. (1989). Video analysis of takeoff actions in ski jumping – Finding parameters for predicting flight length. In R. Gregor, R. Zernicke, & W. Whiting (Eds.), *Proceedings of the XIth International Congress of Biomechanics* (p. 202). Los Angeles.
- Sasaki, T., Yagi, H., & Tsunoda, K. (1990). Kinematical study of take-off actions in ski jumping – Video analysis in the take-off actions and postures of ready position. *Hokkaido Journal of Physical Education*, *25*, 19-28.
- Sasaki, T., Tsunoda, K., & Uchida, E. (1993a). The effect of segment power in ski jumping. *Book of Abstracts, XIVth Congress of the International Society of Biomechanics* (pp. 1186-1187). Paris.
- Sasaki, T., Tsunoda, K., & Uchida, E. (1993b). The effect of segment power in Japanese junior ski jumpers. *Proceedings of the 36th ICHPER World Congress* (pp. 122-127). Yokohama.
- Sasaki, T., Tsunoda, K., & Uchida, E. (1995). The relation of muscle activity and joint power during ski jumping take off. In K. Häkinen, K. Keskinen, P. Komi, & A. Meri (Eds.), *Book of Abstracts, XVth Congress of the International Society of Biomechanics* (pp. 800-801). Jyväskylä.
- Sasaki, T., Tsunoda, K., Uchida, E., Hoshino, H., & Ono, M. (1997). Joint power production in take-off action during ski jumping. In E. Müller, H. Schwameder, E. Kornexl, & C. Raschner (Eds.), *Science and Skiing* (pp. 309-319). London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: E&FN Spon.

- Sasaki, T., Tsunoda, K., Hoshino, H., & Ono, M. (2001). Aerodynamic force during flight phase in ski jumping. In E. Müller, H. Schwameder, C. Raschner, S. Lindinger, & E. Kornexl (Eds.), *Science and Skiing II* (pp. 115-128). Hamburg: Kovac.
- Sasaki, T., Tsunoda, K., & Koike, T. (2005). Kinetic analysis of ski jumping in the period of transition area. In E. Müller, D. Bacharach, R. Klika, S. Lindinger, & H. Schwameder (Eds.), *Science and Skiing III* (pp. 367-380). Oxford: Meyer & Meyer Sport.
- Schmölzer, B., & Müller, W. (2002). The importance of being light: aerodynamic forces and weight in ski jumping. *Journal of Biomechanics*, 35, 1059-1069.
- Schmölzer, B., & Müller, W. (2005). Individual flight styles in ski jumping: results obtained during Olympic Games competitions. *Journal of Biomechanics*, 38, 1055-1065.
- Schwameder, H. (1993). Dreidimensionale biokinematische Bewegungsanalyse der Absprung- und ersten Flugphase im Skispringen. In E. Kornexl & W. Nachbauer (Hrsg.), *Symposiumsbericht 25 Jahre Sportwissenschaften in Innsbruck* (S. 379-401). Innsbruck.
- Schwameder, H. (1994). *Biomechanische Beschreibung und Analyse der V-Technik im Skispringen*. Unveröff. Diss., Universität Salzburg.
- Schwameder, H. & Müller, E. (1995). Biomechanische Beschreibung und Analyse der V-Technik im Skispringen. *Spectrum der Sportwissenschaften*, 7(1), 5-36.
- Schwameder, H., Müller, E., Raschner, C., & Brunner, F. (1997). Aspects of technique-specific strength training in ski jumping. In E. Müller, H. Schwameder, E. Kornexl, & C. Raschner (Eds.), *Science and Skiing* (pp. 309-319). London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: E&FN Spon.
- Schwameder, H. & Müller, E. (2000). Biomechanische Grundlagen und Aspekte zu trainings-spezifischen Konzepten im Skispringen. In E. Müller, S. Lindinger, C. Raschner & H. Schwameder (Hrsg.), *Skilaut und Wissenschaft* (Fachschriftenreihe des Österreichischen Skiverbandes, Heft 1/15, S. 65-91). Trainerakademie 2000 in Rif, Innsbruck.
- Schwameder, H., & Müller, E. (2001a). Biomechanics in ski-jumping: a review. *European Journal of Sport Science*, 1, 1. (electronic journal available at <http://205.198.253.183/ejss/>).
- Schwameder, H., & Müller, E. (2001b). Biomechanics in ski-jumping – A review. In E. Müller, M. Dimitriou, & P. V. Komi (Eds.), *Abstract book of the IOC Medical Commission Symposium 'Current Issues on Biomechanics of Ski-jumping'* (pp. 42-57). Salzburg.
- Schwameder, H., & Müller, E. (2003). Biomechanics on performance enhancement in ski-jumping. In E. Müller, H. Schwameder, G. Zallinger, & V. Fastenbauer (Eds.), *Abstract Book of the 8. Annual Congress of the European College of Sport Science* (p. 194). Salzburg.
- Schwameder, H., Müller, E., Lindenhofer, E., DeMonte, G., Potthast, W., Brüggemann, P., Virmavirta, M., Isolehto, H., & Komi, P. (2005). Kinematic characteristics of the early flight phase in ski-jumping. In E. Müller, D. Bacharach, R. Klika, S. Lindinger, & H. Schwameder (Eds.), *Science and Skiing III* (pp. 381-391). Oxford: Meyer & Meyer Sport.
- Segesser, A., Neukomm, P., Nigg, B., Ruegg, P., & Troxler, G. (1981). Force measuring system for the take-off in ski jumping. In A. Morecki, K. Fidelus, K. Kedzior, & A. Wit (Eds.), *Biomechanics VII-B* (pp. 478-482). Baltimore: University Park Press.
- Seo, K., Watanabe, I., Igarashi, M., Kumura, S., & Murakami, M. (2001). Aerodynamic study for the ground effect of ski jumping. In J. Blackwell (Ed.), *Proceedings of Oral Sessions. XIX International Symposium on Biomechanics in Sports* (pp.128-130). San Francisco: University of San Francisco.
- Sobotka, R. & Kastner, J. (1977). Registrierung des Kraftimpulses beim Skiabsprung. In F. Fetz (Hrsg.), *Biomechanik des Schilauts* (S. 90-97). Innsbruck.

- Straumann, R. (1926). Vom Skiweitsprung und seiner Mechanik (Teil 1). In Jahrbuch des Schweizerischen Ski-Verbandes (Hrsg.), *Ski* (S. 6-22). Bern.
- Straumann, R. (1927). Vom Skiweitsprung und seiner Mechanik (Teil 2). In Jahrbuch des Schweizerischen Ski-Verbandes (Hrsg.), *Ski* (S. 34-64). Bern.
- Straumann, R. (1955). Vom Skisprung zum Skiflug. *Sport*, 63, 7-8.
- Straumann, R. (1957). Der moderne Skisprung. *Sport*, 152, 21-24.
- Tani, I., & Iuchi, M. (1971). Flight-mechanical investigation of ski jumping. In K. Kinoshita (Ed.), *Scientific Study of Skiing in Japan* (pp. 33-52). Tokyo.
- Tveit, P., & Pedersen, P. O. (1981). Forces in the take-off in ski jumping. In A. Morecki, K. Fidelus, K. Kedzior, and A. Wit (Eds.), *Biomechanics VII-B* (pp. 472-477). Baltimore: University Park Press.
- Vaverka, F. (1981). Abhängigkeit der Sprungweite von der Anlaufgeschwindigkeit bei Skispringern (in Czech). *Trener*, 25, 502-506.
- Vaverka, F. (1987). *The biomechanics of ski jumping (in Czech)*. Olomouc.
- Vaverka, F., & Zhanel, J. (1989). Ski jumper's approach body position – biomechanical aspect. *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis Facultas Paedagogica Gymnica XIX* (pp. 117-204). Olomouc.
- Vaverka, F., Janura, M., Salinger, J., & Brichta, J. (1993). Comparison of the take-off measured under laboratory and jumping hill conditions. *Book of Abstracts, XIVth Congress of the International Society of Biomechanics* (pp. 1406-1407). Paris.
- Vaverka, F., Janura, M., Elfmark, M., Salinger, J., & McPherson, M. (1997). Inter- and intra-individual variability of the ski-jumper's take-off. In E. Müller, H. Schwameder, E. Kornexl, & C. Raschner (Eds.), *Science and Skiing* (pp. 61-71). London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: E&FN Spon.
- Virmavirta, M. (1999). Biomechanics of ski jumping take-off. In H. Kyröläinen, J. Avela, & T. Takala (Eds.), *Limiting factors of human neuromuscular performance* (pp. 113-114). Jyväskylä.
- Virmavirta, M. (2000). Limiting factors in ski-jumping take-off. In *PhD thesis*. Jyväskylä: University of Jyväskylä.
- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (1989). The takeoff forces in ski jumping. *International Journal of Sport Biomechanics*, 5, 248-257.
- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (1991). Electromyographic analysis of muscle activation during ski jumping performance. *International Journal of Sport Biomechanics*, 7, 175-182.
- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (1993a). Measurement of take-off forces in ski jumping, Part I. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 3, 229-236.
- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (1993b). Measurement of take-off forces in ski jumping, Part II. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 3, 237-243.
- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (1994). Takeoff analysis of a champion ski jumper. *Coaching and Sport Science Journal*, 1, 23-27.
- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (2000). Plantar pressures during ski jumping take-off. *Journal of Applied Biomechanics*, 16, 320-326.
- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (2001a). Ski jumping boots limit effective take-off in ski jumping. *Journal of Sports Sciences*, 19, 961-968.
- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (2001b). Factors influencing the 'explosiveness' of ski jumping take-off. In E. Müller, H. Schwameder, C. Raschner, S. Lindinger, & E. Kornexl (Eds.), *Science and Skiing II* (pp. 14-29). Hamburg: Kovac.

- Virmavirta, M., & Komi, P. V. (2001c). Plantar pressure and EMG activity of simulated and actual ski jumping take-off. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sport*, 11, 310-314.
- Virmavirta, M., Perttunen, J., & Komi, P. V. (2001a). EMG activities and plantar pressures during ski jumping take-off on three different sized hills. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11, 141-147.
- Virmavirta, M., Kivekäs, J., & Komi, P. V. (2001b). Take-off aerodynamics in ski jumping. *Journal of Biomechanics*, 34, 465-470.
- Virmavirta, M., Isolehto, J., Komi, P. V., Brüggemann, G. P., Potthast, W., De Monte, G., Müller, E., & Schwameder, H. (2003). Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition. In E. Müller, H. Schwameder, G. Zallinger, & V. Fastenbauer (Eds.), *Abstract Book of the 8. Annual Congress of the European College of Sport Science* (p. 365). Salzburg.
- Virmavirta, M., Isolehto, J., Komi, P. V., Brüggemann, G. P., Müller, E., & Schwameder, H. (2005). Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition. *Journal of Biomechanics*, 38, 2157-2163.
- Wagner, K. (2004). Beitrag der Sportinformatik zur Trainingssteuerung – Stand und Entwicklungstendenzen am IAT. *Zeitschrift für Angewandte Trainingswissenschaft*, 11, 40-53.
- Ward-Smith, A., & Clements, D. (1982). Experimental determination of the aerodynamic characteristics of ski jumpers. *Aeronautical Journal*, 86, 384-391.
- Ward-Smith, A., & Clements, D. (1983). Numerical evaluation of the flight mechanics and trajectory of a ski-jumper. *Acta Applicandae Mathematicae*, 301-314.
- Watanabe, T., & Kawahara, Y. (1971). Analysis of take-off in ski jumping by force vs time curve and tracergram. In *Scientific Study of Skiing in Japan (Paper in Japanese)*, 93-97.
- Watanabe, T., Kasaya, A., & Kawahara, Y. (1972). Kinematic studies on ski jumping. *Proceedings of the International Congress of Winter Sports Medicine* (pp. 98-105). Sapporo.
- Watanabe, K. (1983). Aerodynamic investigation of arm position during the flight phase in ski jumping. In H. Matsui, & K. Kobayashi (Eds.), *Biomechanics VIII-B* (pp. 856-860). Champaign.
- Watanabe, K., & Watanabe, I. (1993). Aerodynamics of ski jumping: effect of "V-style" to distance. *Book of Abstracts, XIVth Congress of the International Society of Biomechanics* (pp. 1452-1453). Paris.
- Yamanobe, K., & Watanabe, K. (1999). Measurement of take-off forces in ski jumping competition. *Japanese Journal of Biomechanics in Sports and Exercise*, 3, 277-286.
- Yeadon, M. (1989). A method for obtaining three-dimensional data on ski jumping using pan and tilt cameras. *International Journal of Sport Biomechanics*, 5, 238-247.