

Biomechanische und trainingswissenschaftliche Studien  
zur menschlichen Bewegung

Markus Tilp

Kumulative Habilitationsschrift

Eingereicht an der  
Karl-Franzens-Universität Graz

Februar, 2009

<b>Vorwort</b>	4
<b>Einleitung</b>	6
<b>Abschnitt I: Bewegung innerhalb des Muskels: Muskelfaser(bündel).</b>	13
[1] Tilp, M., Steib, S., Schappacher-Tilp, G., Herzog, W. (2008). Residual force enhancement in maximal voluntary contractions of human dorsi flexors. Proceedings of the North American Congress on Biomechanics, Ann Arbour, MI (US). <a href="http://www.x-cdtech.com/nacob/abstracts/40.pdf">http://www.x-cdtech.com/nacob/abstracts/40.pdf</a> [NDI New Investigator - Post Doctoral Award, Finalist]	13
[2] Tilp, M., Steib, S., Herzog, W. (2009). Force-time history effects in voluntary contractions of human tibialis anterior. <i>European Journal of Applied Physiology</i> , akzeptiert am 27. 1. 2009	17
[3] Tilp, M., Steib, S., Schappacher-Tilp, G., Herzog, W. (2009). Changes in fascicle lengths and pennation angles give no explanation for residual force enhancement or depression during voluntary contractions in human tibialis anterior. <i>Journal of Applied Biomechanics</i> , eingereicht.	33
<b>Abschnitt II: Biomechanische Modellierung von Bewegung des Muskel-Skelett-Systems zur Trainings- planung und –steuerung.</b>	50
[4] Siebert, T., Sust, M., Thaller, S., Tilp, M., Wagner, H. (2007). An improved method to determine neuromuscular properties using force laws – from single muscle to applications in human movements. <i>Human Movement Science</i> , 26, 320 - 341.	50
[5] Tilp, M., Wagner, H., Sust, M., Thaller, S., Blickhan, R. (2006). Modellierung vertikaler Sprünge auf der Basis individuell gemessener Muskeleigenschaften zur Prognose von Trainingseffekten. In: Wohlgefahrt & Michel (Hrsg), <i>Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft, 153 – Beiträge zur Speziellen Trainingswissenschaft Leichtathletik</i> , 86-94.	77
[6] Thaller, S., Tilp, M. (2004). Bewertung von gemessenen isometrischen Kraftkurven. <i>Spectrum der Sportwissenschaften</i> 16, 1, 68-84.	89

<b>Abschnitt III: Biomechanische Aspekte der Bewegung in ausgewählten Sportarten bzw. bei sportlichen Techniken.</b>	105
[7] Tilp, M., Lacheiner, I. (2002). Biomechanik des Schneesports. In: DSV Lehrbriefe, <i>Schriftenreihe des Deutschen Skiverbandes 5</i> , Planegg, 172-179.	105
[8] Tilp, M., (2004). Biomechanische Aspekte des Volleyballspiels – Sprung, Schlag und Ballflugbahn. In: K. Zentgraf & K. Langolf (Hrsg.) <i>Sportwissenschaft und Sportpraxis 139, Volleyball – europaweit</i> . 99 – 114.	121
[9] Wagner, H., Tilp, M., von Duvillard Serge P., Müller, E. (2009). General jumping ability in experienced volleyball players and its influence on volleyball spike jumps. <i>International Journal of Sports Medicine</i> , eingereicht.	143
[10] Tilp, M., Wagner, H., Müller, E. (2008). Differences in 3D kinematics between volleyball and beach volleyball spike movements, <i>Sports Biomechanics, 7(3)</i> , 386-397.	156
<b>Abschnitt IV: Methoden und Ergebnisse der Erfassung sportlicher Bewegung - Strukturanalysen als Grundlage zur Trainingsplanung am Beispiel Beach Volleyball.</b>	172
[11] Mauthner, T., Koch, C., Tilp, M., Bischof, H. (2007). Visual Tracking of Athletes in Beach Volleyball Using a Single Camera. <i>Journal of Computer Science in Sports, 6(2)</i> , 21-35.	172
[12] Tilp, M., Koch, C., Stifter, S., Ruppert, G.S. (2006). Digital game analysis in beach volleyball. <i>International Journal of Performance Analysis in Sport, 6(1)</i> , 140-148.	190
[13] Tilp, M., Koch, C., Stifter, S. (2005). Digital unterstützte Spielanalyse im internationalen Spitzen-Beachvolleyball-Nachwuchsbereich (U18/U21), <i>Leistungssport, 35/6</i> , 18-21.	201
[14] Koch, C., Tilp, M. (2009). Beach Volleyball techniques and tactics: A comparison of male and female playing characteristics. <i>Kinesiology – International Journal of Fundamental and Applied Kinesiology</i> , eingereicht.	220
<b>Anhang</b>	234
<b>Publikationsliste</b>	235
<b>Lebenslauf</b>	239

# Vorwort

Die vorgelegte Sammelpublikation besteht aus Arbeiten zu verschiedenen Themen, die sich allesamt mit biomechanischen und trainingswissenschaftlichen Aspekten der, größtenteils sportlichen, Bewegung auseinandersetzen. Da die menschliche Bewegung auf verschiedenen strukturellen Ebenen untersucht werden kann, spannt sich der Bogen der Arbeiten von Publikationen über Muskelfaserbündel über die Bewegung von Teilstrukturen des Körpers bis hin zu Strukturanalysen innerhalb von Sportlerpopulationen.

Die kumulative Arbeit zeigt einen Einblick in meine bisherige Forschungsarbeit und besteht aus 14 Arbeiten, von denen 10 bereits veröffentlicht, 1 akzeptiert und 3 bei internationalen Zeitschriften eingereicht sind.

Die vorgelegten Einzelarbeiten erschienen in verschiedenen Zeitschriften oder Sammelbänden, die unterschiedliche Formatierungsvorgaben bzw. Zitierregeln verwenden. Zur besseren Lesbarkeit wurde die Formatierung der Arbeiten von mir vereinheitlicht, ohne inhaltliche Veränderungen oder Änderungen der Zitierungen vorzunehmen. Da die verschiedenen Zeitschriften oder Sammelbände auch unterschiedliches Publikum, vom Trainer in Ausbildung bis hin zum Wissenschaftler in Spezialdisziplinen, ansprechen, ist die Wortwahl der verschiedenen Arbeiten der jeweiligen Zielgruppe angepasst.

Die Entwicklung der hier vorgelegten Arbeit ist mit der Hilfe mehrerer Personen verbunden, denen ich hiermit meinen Dank aussprechen möchte.

O. Univ. Prof. Dr. Martin Sust war als Doktorvater immer eng mit meinem wissenschaftlichen Werdegang verbunden und ist sicherlich hauptverantwortlich für den Weg, den ich in den letzten Jahren eingeschlagen habe. Seine wissenschaftlichen Ratschläge waren stets eine große Hilfe und die gemeinsamen Gespräche über den Wert der Wissenschaft über alle Maße inspirierend.

Ao. Univ. Prof. Dr. Sigrid Thaller war stets ein wichtiger Ansprechpartner sowohl für wissenschaftliche Fragen als auch den großen und kleinen Sorgen des Lebens. Meine

Kollegin fand immer Zeit für meine Anliegen und alle gemeinsamen wissenschaftlichen Arbeiten und privaten Unternehmungen sind mit freudigen Erinnerungen verbunden.

Prof. Dr. Walter Herzog ermöglichte mir auf unkomplizierte Weise den einjährigen Aufenthalt in seinem Labor in Calgary, Kanada. Die Aufnahme in seiner Forschungsgruppe war ein einmaliges Erlebnis und seine wissenschaftliche Arbeitsweise wird für mich immer vorbildhaft sein.

Stellvertretend für alle MitarbeiterInnen und DiplomandInnen der letzten Jahre möchte ich Fr. Mag. Christina Koch danken, ohne deren gewissenhafte Hilfe einige der vorgelegten Arbeiten nicht durchführbar gewesen wären. Gerade die Arbeit mit wissbegierigen Jungwissenschaftlern stellte immer den Höhepunkt meiner Tätigkeit am Institut für Sportwissenschaft Graz dar.

Ebenfalls danken möchte ich meiner Familie, meiner Mutter Sieglinde, meinem zu früh verstorbenen Vater Erich sen. sowie meinem Bruder Erich Tilp jun., die mir immer den Freiraum gegeben haben, mich weiter zu entwickeln. Ihre Unterstützung hat mich auch in schwierigen Zeiten immer an mich glauben lassen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Frau Gudrun, die mich sowohl seelisch als auch fachlich bei meiner Arbeit auf außergewöhnliche Weise unterstützt hat. Sie war immer der wichtigste Gesprächspartner in der Vorbereitung von Vorträgen und Aufsätzen, bei der sie Ausdauer und Verständnis zeigte. Ihre Offenheit und außergewöhnliche Begabung für die Wissenschaft hat es ebenfalls ermöglicht, den Forschungsaufenthalt in Kanada gemeinsam zu erleben.

# Einleitung

Auch in Zeiten der Bewegungsarmut ist Bewegung immer noch untrennbar mit dem menschlichen Alltag verbunden und stellt somit einen wichtigen Teil des menschlichen Lebens dar. Ihr Entstehen und die Möglichkeit ihrer Vervollkommnung (wie z.B. im Sport oder der Kunst) waren schon immer von großem Interesse. So entstanden Bewegungs- und Trainingslehren, die im 20. Jahrhundert verfeinert wurden und sich zu Wissenschaften entwickelten. Auf molekularer Ebene entsteht muskuläre Aktivität und damit menschliche Bewegung durch die Umwandlung von chemischer Energie, die durch die Verstoffwechslung von Nährstoffen gewonnen wird, in mechanische Energie durch die Interaktion der kontraktilen Proteine Aktin und Myosin. Diese Basisbewegung wird durch hierarchische Strukturen über Muskelfasern, Muskeln und Sehnen auf das Skelett übertragen, wo sie schließlich von außen mit freiem Auge beobachtbar wird. Die Koordination einer Vielzahl von Muskeln formt schließlich die Gesamtbewegung des Menschen. Treten mehrere Personen, wie z.B. Sporttreibende, in Interaktion, muss auch diese Bewegung koordiniert werden, um ein übergeordnetes Ziel zu erreichen. Bewegung ist somit ein Phänomen, das sich auf unterschiedlichen strukturellen Ebenen manifestiert. Um Bewegung in ihrer Gesamtheit zu erfassen, bietet sich eine interdisziplinäre Vorgangsweise unter Einbeziehung der Basiswissenschaften an.

Möchte man durch gezielte Interventionen, z.B. in Form eines sportlichen Trainings, systematische Veränderungen der Bewegung erreichen, so setzt dies Wissen über Zusammenhänge verschiedener Teilbewegungen voraus. Aus diesem Grund habe ich mich in den letzten Jahren mit der Bewegung und deren Vervollkommnung auf verschiedenen Ebenen und mit verschiedenen Methoden auseinandergesetzt. Die Ergebnisse meiner Forschungstätigkeit sind in dieser Arbeit zusammengefasst.

Die Abschnitte der vorgelegten Arbeit sind hierarchisch nach untersuchter Strukturebene bzw. ebenfalls nach den angewandten Forschungsmethoden gegliedert, woraus sich teilweise Überlappungen ergeben. Abschnitt I besteht aus Arbeiten über Strukturen im Inneren des Muskels [1, 2, 3], die im Rahmen eines FWF-Erwin-Schrödinger-Stipendiums (J2683) an der University of Calgary entstanden sind. Der eher theorieorientierte Abschnitt II

befasst sich mit der Modellierung des Muskel-Skelett-Systems zur Simulation von (sportlichen) Bewegungen. Inhaltlich behandeln die Arbeiten theoretische Überlegungen zur Muskelmodellierung, die Bestimmung von Muskeleigenschaften bis hin zur damit möglichen Trainingsplanung und –steuerung [4, 5]. Zusätzlich enthält der Abschnitt eine Methodikarbeit zur Bewertung isometrischer Kraftkurven [6]. Der dritte Abschnitt bezieht sich auf die Ebene des menschlichen Körpers und umfasst Arbeiten über biomechanische Grundlagen ausgewählter Sportarten [7, 8] bzw. ausgewählter sportlicher Techniken [9, 10]. Die Arbeiten zur Methodik [11] und Anwendung [12, 13, 14] im Bereich der Sportspielanalyse im Abschnitt IV entstammen einem vom Autor geleiteten FWF-Projekt (P18600-N15) zur computerunterstützten automatisierten Analyse von Sportspielen. Die Ergebnisse gehen über das Individuum hinaus und geben u. a. Aufschluss über die Spielstrukturen verschiedener Sportlerpopulationen am Beispiel Beach Volleyball.

Im Folgenden werden die Inhalte der einzelnen Abschnitte detaillierter dargestellt.

### **Abschnitt I: Bewegung innerhalb des Muskels: Muskelfaser(bündel).**

Die Muskulatur ist der Motor der menschlichen und somit auch der sportlichen Bewegung. Ihre Funktionsweise ist schon seit Jahrhunderten (z.B. Galen (129-201), L. Da Vinci (1452-1519), Vesalius (1514-1564), G. A. Borelli (1608-79)) von besonderem Interesse für Wissenschaftler (Nigg & Herzog, 2007).

Umso überraschender ist es, dass es erst Mitte des letzten Jahrhundert A.F. Huxley & Niedergerke (1954) und zeitgleich H. Huxley & Hanson (1954) gelungen ist, ihre grundlegende Funktionsweise zu enträtseln. Die Modellvorstellung der Muskelkontraktion von A.F. Huxley (1957) ist mit verhältnismäßig geringen Anpassungen (z.B. Rayment et al, 1993) noch immer Standard der Muskelphysiologie.

Ein Phänomen, das ebenfalls schon seit den Fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts bekannt ist, ist die Kraftpotenzierung/verringering (engl.: „residual force enhancement“, „residual force depression“) eines isometrisch angespannten Muskels durch eine induzierte Dehnung oder Verkürzung. Nach einer solchen Dehnung/Verkürzung der aktivierten Muskulatur treten höhere/niedrigere Kräfte auf, als aufgrund der isometrischen Kraft-Längen-Beziehung

des Muskels zu erwarten wären. Aufgrund von voreiliger Fehlinterpretation der Ursachen blieb dieses Phänomen für mehrere Jahrzehnte unbeobachtet, bis es um die Jahrtausendwende wieder in das Zentrum der Muskelforschung gelangte (Herzog, 2004) und auf den wichtigsten strukturellen Ebenen der Muskulatur nachgewiesen wurde.

Die in diesem Abschnitt vorgelegten Arbeiten [1, 2, 3] beschäftigen sich mit den Eigenschaften dieser Kraftpotenzierung/verringering bei willkürlichen menschlichen Bewegungen sowie des möglichen Einflusses der Muskelarchitektur auf dieses Phänomen. Es konnte gezeigt werden, dass bei willentlichen Kontraktionen die Längen der Muskelfaserbündel sowie deren Fiederungswinkel als Ursache für Kraftpotenzierung/verringering auszuschließen sind.

## **Abschnitt II: Biomechanischen Modellierung von Bewegung des Muskel-Skelett-Systems zur Trainingsplanung und –steuerung.**

Ein Modell ist ein Abbild der Natur und kann durch seine vereinfachte Darstellung der Realität zu neuen Erkenntnissen führen. Auch in der Sportwissenschaft findet man unterschiedlichste Arten und Anwendungsbereiche der Modellbildung (Perl, Lames & Glitsch, 2002, S 9). Eine mögliche Gliederung von Modellen in der Sportwissenschaft ist die folgende:

- Gegenständliche Modelle
- Statistische Modelle
- Kausale Modelle

Gegenständliche Modelle (z.B. Holzmodelle von Sportlern) haben aufgrund ihrer Anschaulichkeit hohen pädagogischen Wert. Statistische Modelle lassen wichtige Aussagen über ganze Populationen bzw. Beziehungen zwischen bewegungsrelevanten Variablen zu. Kausale Modelle, wie in diesem Abschnitt vorgestellt, geben Informationen über den ursächlichen Zusammenhang zwischen Modellvariablen und Ergebnissen der Modellrechnung. In der Bewegungswissenschaft gibt es eine Vielzahl kausaler Modelle, die den menschlichen Körper oder Teile des Körpers beschreiben. Eine besondere



Herausforderung bei kausalen Modellen ist es, individuelle Eingangsparameter für die Modellrechnung zu bestimmen. Erst die Bestimmung von individuellen Eingangsparametern ermöglicht die Simulation personenspezifischer (sportlicher) Bewegungen und deren Nutzung zur Trainingsplanung und –steuerung. Insbesondere ermöglicht die Bestimmung von personenspezifischen Eigenschaftsparametern auch die Simulation von Bewegungen, die von der Ursprungsbewegung verschieden sind. Die Arbeit [4], die unter der Federführung des Autors (Corresponding Author) entstanden ist, stellt eine Zusammenfassung der Forschungsarbeit mehrerer Forschungsgruppen (Universitäten Graz, Jena, Münster) zu diesem Thema dar. Die weiteren Arbeiten befassen sich mit der Anwendungsmöglichkeit des vorgestellten biomechanischen Modells in der Sportpraxis [5], sowie der verbesserten Bewertung individueller isometrischen Kraftkurven [6].

### **Abschnitt III: Biomechanische Aspekte der Bewegung in ausgewählten Sportarten bzw. bei sportlichen Techniken.**

Die sportliche Bewegung ist physikalischen Gesetzen unterworfen. Überlegungen zum mechanischen Hintergrund sportlicher Bewegung sind die Grundlagen zur Einsicht in die Möglichkeiten bzw. Einschränkungen von spezifischen Bewegungen bzw. sportlichen Techniken: „Sport biomechanics is the science of sport (athletic) movement“ (Zatsiorsky, 2000, S xi). Dies hat unmittelbare Auswirkung auf Training und Wettkampf. Die Arbeiten [7] und [8] sind als Hilfestellungen für angehende oder praktizierende Trainer gedacht, sportliche Bewegungen aus mechanischer Sicht zu verstehen. Die grundlegenden Techniken der jeweiligen Sportarten (Schneesportarten, Volleyball) wurden aus mechanischer Sicht beschrieben und erklärt und zeigen den Einfluss der Physik auf die Bewegungen auf.

Einen spezifischeren Blick auf einzelne (Sprung)techniken zeigen die Arbeiten [9] und [10]. Während die generelle Sprungfähigkeit von Athleten einer Sportart und deren Einfluss auf die sportartspezifische Sprungfähigkeit in [9] untersucht wird, beschäftigt sich [10] mit dem Einfluss von Bewegungsbedingungen (in dieser speziellen Arbeit die Sportplatzbeläge Hallenboden oder Sand) auf die sportliche Bewegung.

#### **Abschnitt IV: Methoden und Ergebnisse der Erfassung sportlicher Bewegung - Strukturanalysen als Grundlage zur Trainingsplanung am Beispiel Beach Volleyball.**

Das Ziel der quantitativen Sportspielanalyse ist die möglichst vollständige Erfassung und Beschreibung der sportlichen Leistung in den Team- bzw. Spportsportarten. Die Ergebnisse, die Aufschlüsse über den Erfolg oder Misserfolg im Wettkampf geben, stellen eine Basis für die Wettkampfvorbereitung und Trainingsplanung dar. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Sportspielanalyse durch den Einsatz von Computern, digitalen Videosystemen und Datenbanken stark weiterentwickelt. Fortschritte im Bereich der Bilderkennung und Videoanalyse geben Hoffnung, dass die Qualität der Analysen noch weiter verbessert werden kann und einige Aufgaben teilautomatisiert durchgeführt werden können. Die Aktualität der Spportsportanalyse wird durch die Publikation von wissenschaftlichen Handbücher zu diesem Thema (z.B. Hughes & Franks, 2004; Hughes & Franks, 2008; Carling, Reilly & Williams, 2008) untermauert, die in den letzten Jahren erschienen sind.

In Kooperation mit dem Institut für Maschinelles Sehen an der TU Graz und dem Institut für Informationssysteme & Informationsmanagement des JOANNEUM RESEARCH Graz wurde ein FWF-Projekt zur Sportspielanalyse im Bereich des Beach Volleyball durchgeführt. Eine Auswahl an Ergebnissen dieser Kooperation ist in diesem Abschnitt dargestellt.

Die Arbeiten [11] und [12] beschreiben größtenteils methodische Entwicklungen, die im Rahmen des Projekts entstanden sind. Neben der Nutzung von Datenbanken verbunden mit digitalen Videosystemen, versprechen vor allen Dingen moderne Tracking- und Bildanalyseverfahren Fortschritte in der Sportspielanalyse. Den Abschluss bilden die Arbeiten [13] und [14], die Untersuchungen zur Strukturanalysen von jugendlichen und erwachsenen Athleten darlegen. In diesen Arbeiten konnten z.B. technische Verbesserungsmöglichkeiten bei Jugendlichen bzw. Unterschiede im Spiel der Frauen und Männer im Weltklassebereich identifiziert werden.

Viele der vorgestellten Ergebnisse wurden ebenfalls auf nationalen und internationalen wissenschaftlichen Kongressen vorgestellt und diskutiert. Zusätzlich zu den hier enthaltenen Arbeiten entstand noch eine große Anzahl von Beiträgen in wissenschaftlichen Konferenz- und Symposiumsbänden bzw. in Trainerzeitschriften (siehe Publikationsverzeichnis im Anhang). Weitere internationale Zeitschriftenpublikationen sind im Stadium der Bearbeitung.

Graz, Februar 2009

# Literatur

- Carling, C., Reilly, T. & Williams, A.M. (2008) Performance Assessment for Field Sports: Physiological, Psychological and Match Notational Assessment in Practice, Taylor & Francis.
- Herzog, W. (2004) History dependence of skeletal muscle force production: Implications for movement control. *Human movement science* 23, 591–604.
- Hughes, M. & Franks, I. (2004) Notational Analysis of Sport. Routledge, London.
- Hughes, M. & Franks, I. (2008) The Essentials of Performance Analysis. Routledge, New York.
- Huxley, H.E. & Hanson, J. (1954) Changes in the Cross-striations of muscle during contraction and stretch and their structural interpretation. *Nature* 173, 973-976.
- Huxley, A.F. (1957) Muscle structure and theories of contraction. *Progress in biophysics and biophysical chemistry*, 255-318.
- Huxley, A.F. & Niedergerke, R. (1954) Structural changes in muscle during contraction. *Nature* 173, 971-973.
- Nigg, B. & Herzog, W. (2007) Biomechanics of the musculo-skeletal system. 3rd edition, Wiley & Sons, Chichester, England.
- Perl, J., Lames, M. & Glitsch, U. (2002) Modellbildung in der Sportwissenschaft. Beiträge zur Lehre und Forschung im Sport 132. Verlag Hofmann, Schorndorf.
- Rayment, I, Holden, H.M., Whittaker, M., Yohn, C.B., Lorenz, M. Holmes, K.C. & Milligan, R.A. (1993) Structure of the actin-myosin complex and its implications for muscle contraction. *Science*, 26158-65.
- Zatsiorsky, V. (2000) Biomechanics in Sport. Blackwell Science, Oxford.