

**Wolfgang Potthast**

Stoßübertragung über das Knie und  
muskuläre Gelenkkopplung

**Doktorarbeit / Dissertation**

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2005 Diplom.de  
ISBN: 9783832488369

**Wolfgang Potthast**

**Stoßübertragung über das Knie und muskuläre  
Gelenkkopplung**



---

Wolfgang Potthast

# **Stoßübertragung über das Knie und muskuläre Gelenkkopplung**

Dissertation / Doktorarbeit  
Deutsche Sporthochschule Köln  
Fachbereich Medizin- und Naturwissenschaften  
Abgabe März 2005



Diplomica GmbH ———  
Hermannstal 119k ———  
22119 Hamburg ———

Fon: 040 / 655 99 20 ———  
Fax: 040 / 655 99 222 ———

agentur@diplom.de ———  
www.diplom.de ———

ID 8836

Potthast, Wolfgang: Stoßübertragung über das Knie und muskuläre Gelenkkopplung

Hamburg: Diplomica GmbH, 2005

Zugl.: Deutsche Sporthochschule Köln, Dissertation / Doktorarbeit, 2005

---

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH

<http://www.diplom.de>, Hamburg 2005

Printed in Germany

## Lebenslauf

Wolfgang Potthast, geboren am 18.03.1967 in Möhnese-Körbecke

1973-1977	Besuch der Katholischen Grundschule Möhnese
1977-1986	Besuch des Archigymnasiums Soest
1986	Allgemeine Hochschulreife
1987-89	Physikstudium an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität zu Bonn
seit 1990	Sportstudium an der Deutschen Sporthochschule Köln und Physikstudium an der Universität zu Köln
seit Oktober 1998	Studentische Hilfskraft im Institut für Leichtathletik und Turnen
seit Mai 1999	Diplomsportlehrer, Wissenschaftliche Hilfskraft im Institut für Leichtathletik und Turnen
Juni 2000	Erste Staatsprüfung für das Lehramt für die Sekundarstufe II in Sport und Physik
seit August 2000	Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Wissenschaftliche Hilfskraft im Institut für Biomechanik
seit WS 1999	Promotionsstudium

## Kongressbeiträge

- 1999 Plantar pressure distribution on sliding on tennis clay courts. Footwear Biomechanics. Canmore, Kanada
- 2000 Mechanical load and soccer specific sprints. International Society of Biomechanics in Sports. Honkong, China
- 2001 Comparison of linear and non linear soccer specific sprinting abilities. European College of Sport Sciences. Köln
- Mechanical load in soccer specific sprints. European College of Sport Sciences. Köln
- Dynamische Berechnung von Scher- und Kompressionskräften in Abhängigkeit vom L5/S1-Winkel. Deutsche Gesellschaft für Biomechanik. Freiburg
- Dynamic calculation of shear and compression forces depending on L5/S1 angle. International Society of Biomechanics. Zürich
- 2002 The effect of a damping element in tennis rackets. International Society of Biomechanics in Sports. Caceres, Spanien
- Natural frequency of femur bone and bonepin. Worldcongress of Biomechanics. Calgary, Kanada
- 2003 Relationship between ground reaction force and acceleration at tibia and femur during heel toe running. Footwear Biomechanics. Queenstown, Neuseeland
- Axial shock transmission from tibia to femur during running. International Society of Biomechanics. Dunedin, Neuseeland
- 2004 Einfluss des Schuhwerks auf die Beanspruchung von unterer Extremität und Wirbelsäule. Golf und Orthopädie. Köln
- Individual diagnostic of loading and functional capacity for specific prevention in professional football. First International Football Medicine Congress. München



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Stoßübertragung</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Stoßförmige Belastung und Verletzungen</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 Stoßweiterleitung</b> .....	<b>10</b>
2.2.1 Bodenreaktionskraft als Inputsignal.....	10
2.2.2 Zur Messmethodik der Stoßübertragung.....	12
2.2.3 Weiterleitung von Stößen über das Muskelskelettsystem.....	15
<b>3 Problemstellung</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 Stoßweiterleitung externer Impacts</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2 Ziel der Studie</b> .....	<b>31</b>
<b>4 Stoßübertragung über das Kniegelenk</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1 Untersuchungsdesign</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2 Merkmalsstichprobe</b> .....	<b>34</b>
<b>4.3 Messmethodik</b> .....	<b>36</b>
<b>4.4 Versuchsdurchführung</b> .....	<b>48</b>
<b>4.5 Personenstichprobe</b> .....	<b>53</b>
<b>4.6 Statistische Verfahren</b> .....	<b>54</b>
<b>5 Ergebnisse</b> .....	<b>55</b>
<b>5.1 Falleliminationen</b> .....	<b>55</b>
<b>5.2 Zusammenhang zwischen Muskelaktivität und Knie winkelparametern</b> .....	<b>56</b>
<b>5.3 Stoßparameter und deren Veränderung in den Versuchsbedingungen</b> .....	<b>59</b>
5.3.1 Kraft.....	60
5.3.2 Beschleunigung.....	63
5.3.3 Relationen der Stoßüberträge.....	70
<b>5.4 Kompression und Scherung</b> .....	<b>74</b>
<b>6 Diskussion</b> .....	<b>78</b>
<b>6.1 Zur Methode</b> .....	<b>78</b>
<b>6.2 Unabhängige Variablen: Muskelaktivität und Gelenkwinkel</b> .....	<b>80</b>
6.2.1 Muskelaktivität.....	80
6.2.2 Knie winkel.....	81
<b>6.3 Abhängige Variablen: Kraft und Beschleunigung</b> .....	<b>82</b>
6.3.1 Kraft.....	82
6.3.2 Beschleunigung.....	84
<b>6.4 Stoßübertrag und Relativbewegung</b> .....	<b>89</b>
6.4.1 Stoßübertragung.....	89
6.4.2 Kompression und Scherung.....	95
6.4.3 Zusammenhang zwischen Stoßübertrag und Kompression.....	98
<b>6.5 Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>100</b>
<b>7 Zusammenfassung</b> .....	<b>103</b>
<b>8 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>106</b>
<b>9 Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>115</b>
<b>10 Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>117</b>
<b>11 Anhang</b> .....	<b>118</b>

# 1 Einleitung

Giovanni Alfonso Borelli (1608 – 1679) wird häufig als Vater der Biomechanik bezeichnet. In seiner Arbeit „*De motu animalium*“ (posthum 1680-81), „Über die Bewegung der Tiere“, widmete er sich u. a. dem Studium mechanischer Stöße, die in die untere Extremität eingeleitet werden. Er erklärte beispielsweise, dass beim Menschen der Aufprall nach einem Sprung die Füße verletzen, brechen oder dislozieren könnte. Zur Vermeidung dieser Unbequemlichkeit, beschreibt Borelli weiter, strecke man zunächst vor der Landung nach einem Sprung die Gelenke, um zuerst nur mit den Zehenspitzen den Boden zu berühren und dann die gestreckten Beine nach und nach zu beugen und so nahezu den gesamten Impuls des Falls aufzusaugen. Beim Treppensteigen im Dunkeln, so erläuterte Borelli weiterhin, erwarte man mitunter am Ende der Treppe noch eine weitere Stufe, was zu besonders heftigem Auftreffen des Fußes und zu großen Erschütterungen des Beines und des gesamten Körpers führe. Bereits Borelli beschäftigte sich also mit dem Zustandekommen und der Wirkung externer Stöße auf die untere Extremität und auch damit, wie diese weitergeleitet oder abgeschwächt werden können. Detailliert hat er in dem Zusammenhang auch die weichen Knorpel zwischen den Wirbelkörpern als Puffer beschrieben, welche die Knochen vor Abnutzung schützen, ähnlich wie die halbmondförmigen harten Knorpel im Knie, die das *Femur* von der *Tibia* trennen, als Polster zwischen den Knochen dienen.

Nach wie vor stehen stoßförmige Belastungen, wie sie z.B. beim Gang oder Lauf entstehen, im Interesse biomechanischer Forschung. Ihre Wirkung wird kontrovers diskutiert. Natürlich können hochintensive Stoßbelastungen, wie sie mitunter in Unfallsituationen auftreten, zu akuten Verletzungen führen. Doch auch moderaterer repetitiv einwirkende Stöße werden mit Überlastungserscheinungen wie Kopfschmerz, verschiedenen Formen von Rückenbeschwerden oder mit dem Lockern von Endoprothesen in Verbindung gebracht. Die Ursachen von degenerativen Gelenkserkrankungen, insbesondere Arthrose, oder von Ermüdungsbrüchen, vor allem der *Tibia*, werden ebenfalls mit solchen Belastungsformen assoziiert (Whittle, 1999). Ergebnisse aktueller Analysen dagegen zeigen auch, dass mit den mechanischen Stimuli, die Stoßbelastungen auf biologische Strukturen darstellen, biopositive Adaptationsvorgänge ausgelöst werden können. Die Dichten und Massen der entsprechend beanspruchten Knochen erhöhen sich beson-

ders dann, wenn der mechanische Stimulus durch hohe Anstiegsraten gekennzeichnet und darüber hinaus in seiner Richtung alltäglichen Beanspruchungen unähnlich ist (Mosley, 2000). Die Reaktion von Knorpel auf Stoßbelastungen ist weniger gut verstanden. Man geht davon aus, dass sie in moderatem Maße auftretend materialverbessernd wirken, bei höherer Intensität jedoch Knorpelschäden hervorrufen können (Nigg, 1995).

Eine zentrale Stellung in der biomechanischen Forschung nimmt die Vorbeugung vor Verletzungen ein. Dazu gehört auch die Schaffung geeigneter Belastungssituationen, um z.B. im Sport Überbeanspruchungsprozesse zu vermeiden oder um in der Rehabilitation und Prävention biopositive Adaptationsvorgänge auszulösen. Diese Abläufe sind von lokalen strukturinternen Belastungen abhängig, die durch extern eingeleitete Stöße hervorgerufen werden können. In diesem Zusammenhang ist deshalb ein detailliertes Verständnis der Weiterleitung dieser Belastungen oder darüber, wie sie vom biologischen System abgeschwächt werden, notwendig. Im Bezug auf die Stoßweiterleitung über den gesamten Körper sind Änderungen der Gelenkwinkel, in Erweiterung Borellis qualitativen Beobachtungen, inzwischen auch quantitativ untersucht (McMahon *et al.*, 1987, Lafortune *et al.*, 1996b). In Kadaverstudien wurde die stoßverändernde Wirkung von gelenkinternen und von periartikulären Strukturen studiert (Radin & Paul, 1970; Hoshino & Wallace, 1987).

Nicht detailliert untersucht wurde bisher, wie Stöße beim Übertrag über einzelne Gelenke dann verändert werden, wenn den lebenden Organismus kennzeichnende Faktoren, wie z.B. die Muskelaktivität, wirksam bleiben.

Die vorliegende Arbeit geht der Frage nach, ob und wie der Stoßübertrag über das menschliche vitale Kniegelenk durch veränderte Muskelaktivierung bei unterschiedlichen Gelenkwinkeln moduliert wird. Dazu wird ein experimentelles Design gewählt, in dem unter standardisierten Bedingungen diese beiden Parameter systematisch variiert werden.

## 2 Stoßübertragung

Die skelettäre Weiterleitung von in die untere Extremität eingeleiteten stoßförmigen Belastungen ist der zentrale Forschungsgegenstand der vorgestellten Arbeit. Im folgenden Abschnitt wird anhand grundlegender und themenspezifischer Publikationen der aktuelle Forschungsstand dokumentiert, um aus identifizierten Erkenntnislücken zu bearbeitende Probleme abzuleiten. Hierzu wird zunächst der Zusammenhang zwischen gang- bzw. laufinduzierten stoßförmigen Belastungen sowie typischen Verletzungen und Schäden anhand ausgewählter Veröffentlichungen bearbeitet, was zur Betrachtung von speziellen Überlegungen und Studien zur Stoßübertragung führt.

### 2.1 Stoßförmige Belastung und Verletzungen

Die Vielzahl von Veröffentlichungen, die sich mit Laufverletzungen beschäftigen, kann hier nicht erschöpfend behandelt werden. Es sei diesbezüglich auf die Arbeiten von Bahlsen (1988), Kersting (1997), McClay (2000) und Nigg *et al.* (1995) verwiesen, die ausführlichere zusammenfassende Überblicke bieten.

Nach einer Studie von Clement *et al.* (1981) traten bei 1650 untersuchten Läufern insbesondere Tendinitiden und Faszienreizungen an Knie und Unterschenkel sowie Ansatzreizungen der Fußflexoren (über 30% aller Verletzungen) auf. Knorpelschäden am Femoropatellargelenk (25%) sowie Überlastungssyndrome des Vorfußes und Tibiastressfrakturen (je 3%) werden weiterhin genannt. Neben anderen Gründen wie exzessiver Pronation, hoher Anzahl an Laufkilometern oder weniger spezifizierten Trainingsfehlern werden Stoßkräfte oder exzessive Stoßkräfte beim Laufen als wesentlicher Faktor für das Entstehen solcher lauftypischen Verletzungen angeführt (Clement *et al.*, 1981; Cook *et al.*, 1990, James *et al.*, 1978; van Mechelen, 1992). Vielfach handelt es sich bei der Analyse solcher Beschwerden jedoch um befragungsgestützte retrospektive Studien, die Verletzungsmechanismen letztlich nicht aufklären und strenge Ursache-Wirkungs-Relationen nicht herstellen können. Deskriptive biomechanische Studien, die beim Lauf auftretende Bodenreaktionskräfte mit hinreichender Genauigkeit untersuchten (Cavanagh & Lafortune, 1980; Munro *et al.*, 1987), stützten zunächst die Vorstellung des Schädigungspotentials hoher Stoßkräfte bzw. hoher Kraftanstiegsraten.

Auch bei anderen Aktivitäten wie z.B. dem Gang findet sich in der Literatur eine Zuschreibung von Verletzungs- oder Schädigungsgefahr zu Stößen oder mechanischen Schocks (Johnson, 1990; Wosk & Voloshin, 1981). Ergebnisse aus Untersuchungen zur Wirkung von Stoßkräften beim Gang wurden ähnlich wie beim Lauf interpretiert. In Untersuchungen an Pflegepersonal mit gleichverteilten Schmerzcharakteristika im Eingangstest fanden Tooms *et al.* (1987) im Nachtest dann vermehrt auftretende Schmerzen bei Mitgliedern der Kontrollgruppe ohne Einlagenversorgung, während die mit viskoelastischen Schuheinlagen versorgte Experimentalgruppe über weniger Schmerzen klagte. Die Autoren schlossen daraus auf eine therapeutische und prophylaktische Wirkung der Einlagen, da die wiederholt eingeleiteten Stoßkräfte des Ganges reduziert würden.

In zwei unabhängig voneinander durchgeführten Studien an Rekruten fanden Schwellnus *et al.* (1990) sowie Simkin und Mitarbeiter (1989) nach neun- bis vierzehnwöchigem Militärtraining in den Gruppen, die eingangs mit als stoßabsorbierend bezeichneten Einlegesohlen ausgestattet wurden, signifikant weniger Überlastungsverletzungen insgesamt und speziell eine reduzierte Häufigkeit an Stressfrakturen der unteren Extremität. Die Gruppe um Simkin differenzierte zusätzlich, dass bei Soldaten aus der Experimentalgruppe mit hohem Fußgewölbe weniger *femorale* Frakturen zu verzeichnen waren und bei Soldaten mit flachem Gewölbe weniger Frakturen an den *Metatarsalia*. In beiden Studien wurde intuitiv mit der Verwendung von weichen oder viskösen Einlagen eine Stoßreduktion verbunden. Die Reduktion der Verletzungshäufigkeit wurde auf diese Stoßreduktion zurückgeführt. Simkin *et al.* schlossen weiterhin, dass flache Fußgewölbe eine bessere stoßreduzierende Wirkung haben und die Verwendung der Einlage das Defizit in der Stoßreduktion des hohen Gewölbes ausgleichen kann. In keinem der Fälle wurden biomechanische Parameter zur Quantifizierung des Stoßes oder anderer Veränderungen durch die Einlagenverwendung erhoben, so dass ein Ursache-Wirkungs-Zusammenhang hieraus nicht zwangsläufig abgeleitet werden kann.

Die wesentliche Basis für die Schlussfolgerungen der vorgenannten Studien stellte eine Reihe von Tierexperimenten dar, in denen *in vitro* und *in vivo* Extremitäten gezielt stoßförmiger Belastung ausgesetzt wurden. Radin und Paul (1971) setzten die *Artt. metacarpophalangeae* einer Gruppe von Rindern *in vitro* sinusförmigen Belastungen aus. Die Gelenke einer zweiten Gruppe wurden zusätzlich durch eine überlagerte stoßförmige Kraftspitze beansprucht. Im Gegensatz zur