

Gollhofer A, Granacher U, Taube W, Melnyk M, Gruber M

## Bewegungskontrolle und Verletzungsprophylaxe

### *Motor control and injury prevention*

Institut für Sport und Sportwissenschaft, Albert-Ludwigs Universität Freiburg

#### Zusammenfassung

Die Unfallforschung hat in den letzten Jahren immer wieder auf die komplexen Zusammenhänge bei der Suche nach den Ursachen von Sportverletzungen hingewiesen. Extrinsische, ebenso wie intrinsische Faktoren bestimmen das Unfallgeschehen im Sport.

Im vorliegenden Beitrag wird auf die Frage eingegangen, wie motorische Koordination die Bewegungskontrolle bestimmt und wie durch sensomotorische Trainingsinterventionen die Mechanismen des Unfallgeschehens verbessert werden können.

Neuere Studien belegen, dass die physiologischen Anpassungen in der neuromuskulären Ansteuerung hochgradig spezifisch sind und direkt von der Trainingsart bestimmt sind. Für das sensomotorische Training konnte nicht nur eine veränderte koordinative Ansteuerung nach Training nachgewiesen werden; anhand großer Stichproben wurde auch eindeutig der verletzungsreduzierende Effekt dieser Trainingsform nachgewiesen.

**Schlüsselwörter:** Motorische Kontrolle, Verletzungsprävention, Sensorisches System

#### Summary

The complex structure of the mechanisms of sports-related injuries has been addressed in several studies. Extrinsic and intrinsic factors have been identified to determine the actual cause of sports injuries. The present paper is focused on the interaction of motor control and coordinative function in sports. It has been shown that the adaptations of the neuromuscular system following sensorimotor training are highly specific and closely associated with alterations in motor control of the lower limb muscles. Evidence is provided from recent studies demonstrating that sensorimotor training interventions are highly effective in the reduction of injury incidence.

**Keywords:** motor control, injury prevention, sensory system

#### Einleitung

Folgt man großen statistischen Erhebungen, so entstehen in Deutschland 70 % aller Sportverletzungen in Ballsportarten, obwohl dort nur ca. 30 % aller sportlichen Aktivitäten angesiedelt sind (11). Internationalen Studien zur Folge betreffen die häufigsten Verletzungen den Muskel- und Bandapparat (18). In der Literatur werden viele mögliche Gründe für die Entstehung von Verletzungen im Sport diskutiert. Tatsächlich scheinen bei jeder Verletzung sowohl extrinsische (außerhalb des Körpers gelegene), als auch intrinsische (körperbezogene) Faktoren eine Rolle zu spielen (3, 15, 16).

Die zunehmende Zahl von Verletzungen der unteren Extremitäten wurde in den vergangenen Jahren dennoch immer wieder auf mangelhafte konditionelle Voraussetzungen der Sportler, oder auf gewaltsame Einwirkungen von gegnerischen Aktivitäten im Sportspiel zurückgeführt. Dass dieser Ansatz offensichtlich zu kurz greift, zeigen übereinstimmend

Untersuchungen über Verletzungshäufigkeiten des vorderen Kreuzbandes (VKB) aus den Sportsportarten. Es konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass ungefähr zwei Drittel aller VKB-Verletzungen in Situationen ohne gegnerischen Kontakt entstehen (10). Gerade diese Verletzungen haben langfristige Konsequenzen, da alarmierenden Zahlen aus der Unfallforschung zu Folge ungefähr die Hälfte aller VKB-Patienten 10 Jahre nach der Verletzung an Arthrose leiden, unabhängig von der Art der medizinischen Nachversorgung (19).

Eine Vermeidung dieser Verletzungstypen kann z.B. durch eine dynamische motorische Kontrolle und eine situativ-adäquate Einstellung von Gelenkpositionen erzielt werden. Dabei hängt die Kontrolle der Gelenksteifigkeit („Stiffness“) primär von koordinativen Aspekten bei der motorischen Ansteuerung ab (7). Die Integration der sensorischen Rückmeldungen aus den Propriozeptoren der Muskeln, Bänder und Sehnen bilden die Basis für eine „sensomotorische Kontrolle“ der unteren Extremität während sportlicher Bewegungen.

Im vorliegenden Beitrag soll der Frage nachgegangen werden, welcher Zusammenhang zwischen Verletzungshäufigkeit und Bewegungskontrolle vor dem Hintergrund evidenzbasierter Publikationen hergestellt werden kann.

## Modelle zur Erforschung präventiver Maßnahmen

Abbildung 1 skizziert die prinzipielle Vorgehensweise zur Bestimmung der Wirksamkeit von Interventionen. Dieses Modell basiert auf einem thematischen Vorschlag von Mechelens aus dem Jahre 1992.

Dieses Modell basiert auf der Annahme, dass durch epidemiologische Erhebungen die Zahl und der Schweregrad der beobachteten Sportverletzungen festgestellt werden muss,

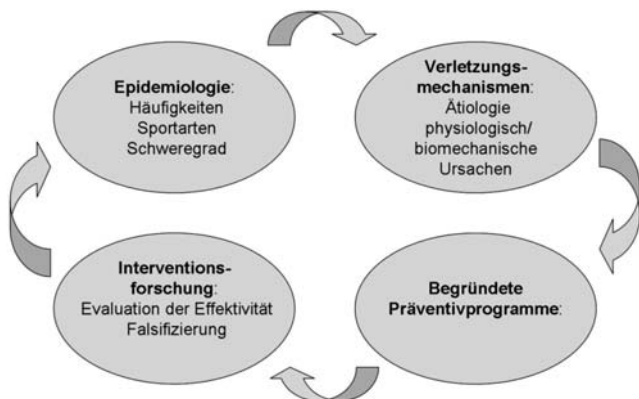


Abbildung 1: Strategie für die evidenzbasierte Erforschung der Sportverletzungen: Auf der Basis der epidemiologischen Statistiken muss der Mechanismus der Verletzungsabläufe zusammen mit den limitierenden Faktoren erforscht werden. Erst darauf sind Präventivprogramme zu begründen, die in der Interventionsforschung auf ihre Effektivität hin überprüft werden müssen.

um einen Ausgangspunkt für Forschungen über die Ätiologie und die Mechanismen der sportbezogenen Verletzungsmuster zu erhalten. Wichtig ist in einem zweiten Schritt eine grundsätzliche Erforschung der physiologischen und biomechanischen Ursachen der Verletzungsmechanismen, da ohne diesen Kenntnisstand keine begründeten präventiven Interventionsstrategien entwickelt werden können. Die Prüfung der zu entwickelnden Präventivprogramme mit Hilfe von kontrollierten Interventionsstudien muss Aussagen über deren Wirksamkeit im Sinne einer tatsächlichen Reduktion der Verletzungen im Sport liefern. Eine permanente Überprüfung der relevanten Faktoren sichert die dynamische Anpassung an die Realität.

Die Qualität dieses Modells hängt entscheidend von der Auswahl bzw. einer validen Konstruktion der relevanten Risikofaktoren ab. Es gilt zu unterscheiden, weshalb sich in spezifischen Sportarten manche Verletzungsbilder häufiger wiederholen als in anderen Disziplinen. Große epidemiolo-

gische Studien können hierzu wichtige Erkenntnisse liefern. Andererseits müssen nach diesem Modell auf der individuellen Ebene detaillierte Fragen beantwortet werden, um Toleranz- bzw. Beanspruchungsgrenzen zu definieren. (Weshalb verletzt sich ein konkreter Sportler gerade in dieser spezifischen Situation? Welche Ursachen waren für welche Strukturen seines Bewegungsapparates limitierend? Welche Strukturen lassen sich überhaupt durch Interventionen trainieren oder anpassen?)

Auf der Basis des von Meuwisse (1994) und Bahr/Krosshaug (2005) vorgeschlagenen Modells (Abb. 2) kann die Verletzungswahrscheinlichkeit der Wirksamkeit von externalen und internalen Faktoren zugeordnet werden. Die komplexe Interaktion von externalen und internalen Risikofaktoren, die das Zustandekommen eines definierten Verletzungsbildes erklären, ist systematisch jedoch äußerst kompliziert zu erforschen. Nur mit Hilfe multivariater Untersuchungsansätze sind einzelne Interaktionen in diesem Modellansatz zu untersuchen.

## Koordination und Bewegungskontrolle

Die Bedeutung der motorischen Koordination als intrinsischer Faktor wurde in den letzten Jahren verstärkt untersucht (2, 14, 21). In zahlreichen experimentellen Studien wurden propriozeptive und sensomotorische Eigenschaften von Personengruppen mit besonderem Risikoprofil (Kinder, Jugendliche, Senioren, Einfluß der Ermüdung) analysiert, um daraus Aussagen über Verletzungswahrscheinlichkeiten generieren zu können (2, 10, 12). Diese Befunde wurden systematisch in Interventionsstudien umgesetzt, um die jeweilige Wirksamkeit zu prüfen (20, 25).

## Sensomotorisches Training und Anpassung

Gruber/Gollhofer (2004) erbrachten den Nachweis, dass

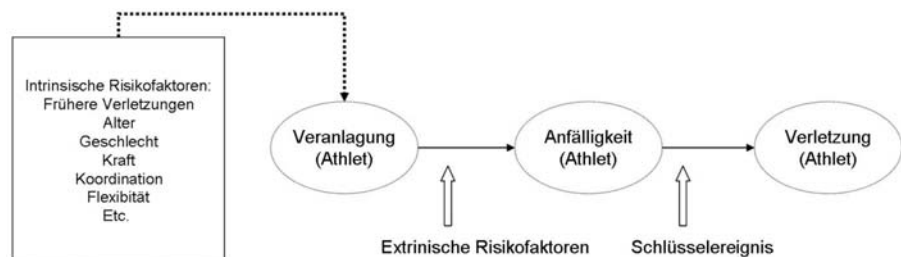


Abbildung 2: Zusammenwirken intrinsischer und extrinsischer Risikofaktoren, die unter Bezug auf eine spezifische Situation (Schlüsselereignis) zu einer Sportverletzung führen können (mod. nach Bahr & Krosshaug 2005).

bei gesunden Versuchspersonen nach einem sensomotorischen Training vor allem die Schnellkraftfähigkeiten unter Willkürkontraktionen verbessert sind. Sie beobachteten signifikante Verbesserungen der Explosivkraft nach sensomotorischem Training. Interessanterweise waren die Verbesserungen im Kraftanstiegsverhalten eng mit einer deutlichen Erhöhung der Aktivierungsamplituden zu Beginn der muskulären Aktion assoziiert (1, 9, 5). Gollhofer

(2003) interpretierte die trainingsbedingten Veränderungen in der neuromuskulären Kontrolle mit Anpassungsmechanismen, die sich nach sensomotorischem Training vorwiegend auf spinaler Ebene einstellen. Der Nachweis über eine Beitrag von spinalen Bahnen bei willkürlichen Kontraktionen wurde auf der Grundlage von Einzelableitungen am Motoneuron von Macefield et al. (1991) erbracht. Die Autoren konnten zeigen, dass deafferentierte Motoneurone mit deutlich reduzierten Frequenzen aktiviert wurden. Meunier & Pierrot-Deseilligny 1989) zeigten darüber hinaus, dass zu Beginn einer isometrischen Kontraktion eine deutlich größere Erregbarkeit spinaler Bahnen herrscht als danach. Aus dieser Arbeit lässt sich schließen, dass spinale Beiträge für die Entwicklung der Explosivkraft eine größere Rolle spielen sollten als für die Entwicklung der Maximalkraft.

## Spezifität der Anpassungsmechanismen

Granacher et al. (2006) konnten im Rahmen einer kontrollierten Längsschnittstudie mit Senioren Verbesserungen im Kraft- und Aktivierungsverhalten beobachten. Nach einem 12wöchigen Training zeigten nicht nur Personen (n=15), die ein klassisches Schnellkrafttraining durchgeführt hatten, signifikante Verbesserung im Explosivkraft- und Aktivierungsverhalten, sondern auch Personen (n=15), die ausschließlich ein sensomotorisches Training absolvierten. Kontrollpersonen hingegen zeigten keine Anpassungen.

Die Autoren untersuchten neben der isometrischen Kraftentfaltung auch lokomotorische und posturale Gleichgewichtsfähigkeiten. Sie interessierten sich für die Frage, wie sich das jeweilige Training auf die kompensatorischen Ausgleichsbewegungen beim Stolpern und auf die Standstabilität im Sinne einer Verbesserung der posturalen Kontrollmechanismen auswirkt. Es zeigte sich, dass nur die sensomotorisch trainierten Versuchspersonen eine Verbesserung in den funktionellen Reflexantworten bei Stolperbewegungen zeigten, die krafttrainierten Versuchspersonen hingegen nicht. Die Verbesserungen in der funktionellen Reflexsteuerung waren mechanisch mit einer erhöhten Gelenksteifigkeit (Gelenk stiffness) assoziiert (Abb. 3). Aus funktioneller Sicht sind derartige Befunde bedeutsam, da sie zeigen, dass die trainingsbedingten Anpassungen sehr spezifisch sind. Es kann also keineswegs der Schluss gezogen werden, dass Kraft- und Aktivierungsfähigkeiten, die durch ein forciertes Krafttraining nachgewiesen werden können, im Sinne einer wirksamen Verletzungsprävention umsetzbar sind. Es ist aus diesen Gründen zu hinterfragen, ob reine Kräftigungsprogramme, wie z.B. in präventiven Sturzprophylaxeprogrammen angewandt, einen nachweisbaren Effekt bewirken können.

## Spinale und/oder supraspinale Einflüsse

In der Literatur wurde in den letzten Jahren häufiger spekuliert, ob die neuromuskulären Qualitäten für posturales Gleichgewicht im Sinne einer verletzungspräventiven Wirkung durch spinale oder durch supraspinale Zentren beeinflusst sind (4, 6).

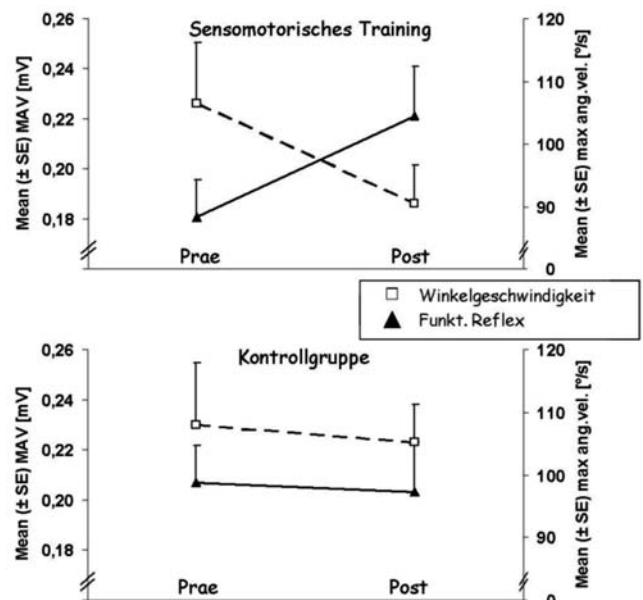


Abbildung 3: Mittelwert und St. ab. der mittleren Amplitude (MAV) der funktionellen Reflexbeiträge (m. tibialis) und der maximalen Winkelgeschwindigkeiten im Sprunggelenk. Beachte, nach sensomotorischem Training sind die funktionellen Aktivierungsanteile signifikant erhöht, während gleichzeitig die Steifigkeit im Sprunggelenk auf Grund reduzierter Winkelgeschwindigkeiten signifikant erhöht ist.

Eine sehr naheliegende Argumentationskette ging davon aus, dass die posturale Kontrolle wesentlich durch das sensomotorische System vermittelt wird, wobei hauptsächlich die Qualitäten der propriozeptiven Sensoren in der Peripherie angesprochen sind. Unter dieser Annahme sollte eine Trainingswirkung primär auf das afferente System ausgerichtet sein, um eine verletzungspräventive Wirkung über reflektorische Kontrollmechanismen auf spinaler Ebene zu erreichen (7).

Neuere Untersuchungstechniken, die in den letzten Jahren entwickelt und auch im nichtklinischen Umfeld einsetzbar wurden, versprechen weitergehende Antworten auf die Fragen der relevanten motorischen Regulationsebenen.

Durch differenzierte und vor allem stimuluskontrollierte Anwendung der H-Reflex-Technik können zumindest für einige Muskeln der unteren Extremität die Erregbarkeitskurven des H-Reflexes auf Motoneuronen-Ebene bei einfachen Bewegungsaufgaben untersucht werden. Mit Hilfe der transcraniellen Magnetstimulation (TMS) ist ein weiteres methodisches Instrumentarium hinzugekommen, welches Aussagen über die Beteiligung des motorischen Kortex bei einfachen Bewegungen möglich werden lässt: Durch magnetische Stimulation motorischer Neurone im Motorkortex kann die Beteiligung schneller kortikospinaler Bahnen bei der Bewältigung der Bewegungsaufgabe ermittelt werden (2, 22).

Taube et al. (2006) haben in einer interessanten Arbeit festgestellt, dass unter posturalen Gleichgewichtsbedingungen das im Elektromyogramm des M. Soleus beobachtete dreiphasige Reflexmuster durch gezielte TMS beeinflussbar ist. Während die frühe Reflexkomponente („short-latency-reflex“, SLR) nicht moduliert werden konnte, beobachteten die Autoren für die späten Antworten („long-latency-reflex“,

LLR) deutlich erhöhte Reflexamplituden. Damit wurde erstmals der experimentelle Nachweis erbracht, dass die späten, ca. 100 ms nach posturaler Gleichgewichtsreaktion beobachteten Muskelaktivierungen unter kortikospinaler Kontrolle stehen.

In weitergehenden Experimenten untersuchten die Autoren die Frage, ob ein mehrwöchiges sensomotorisches Training eine Veränderung in der reflektorischen Ansteuerung bewirkt. Die Untersuchungen zeigten, dass nach dem Training signifikante Veränderungen in den späteren Reflexkomponenten bei posturaler Gleichgewichtsreaktion nachgewiesen werden können: Die vor dem Training unter willkürmotorischer Kontrolle (kortikospinaler Bahnung) erhöhten Reflexantworten waren nach dem sensomotorischen Training signifikant reduziert. Als eine Erklärungsvariante schlagen die Autoren vor, dass durch das sensomotorische Training eine Verlagerung der motorischen Kontrolle auf „hierarchisch-niedere“ Kontrollebenen angenommen werden kann. Funktionell bedeutet eine Verlagerung der Bewegungssteuerung auf subkortikale Ebenen ein Freisetzen von kapazitiven Ressourcen für den Motorkortex.

Diese Anpassungen sind unter funktioneller Beurteilung von eminenter Bedeutung: Durch das sensomotorische Training wird nicht primär das spinale Reflexverhalten im Sinne einer höheren propriozeptiven Aktivität verbessert. Das posturale Training führt vielmehr zu einer verbesserten motorischen Kontrolle der gelenkumgreifenden Muskulatur an Sprung- und Kniegelenken, die durch höhere, supraspinale Zentren gesteuert wird.

## Auswirkungen von verbesserter motorischer Kontrolle auf die Verletzungszahlen

Alle bisherigen Untersuchungen über die Anpassungsmechanismen an Training, insbesondere an Kraft- und an Sensomotoriktraining können nicht den schlussendlichen Beweis liefern, dass sich durch die Intervention eine Reduktion der Verletzungszahlen ergibt. Gerade dieser Beweis wird (siehe Abb. 1) als wichtigster Baustein im Sinne einer geschlossenen Argumentation angesehen.

Randomisierte, kontrollierte Studien, die verletzungsreduzierende Effekte von spezifischen Interventionen für eine bestimmte Sportart nachweisen können, wurden jedoch bislang nur vereinzelt vorgestellt.

Olsen et al. (2005) untersuchten insgesamt 120 Handballmannschaften mit mehr als 1 800 Spielern über eine Spielzeit. Sie konnten signifikante Reduktionen der Verletzungsraten in der Interventionsgruppe (n=958), die ein Balancetraining absolvierten, nachweisen. Im Vergleich zur Kontrollgruppe (n=879) konnten die Autoren eine durchschnittliche Senkung der Verletzungsraten von 50 % berichten, unabhängig von der Art der Verletzung und relativ unabhängig davon, ob es sich um trainings- oder wettkampfbedingte Verletzungen handelte.

Aus der niederländischen Studie von Verhagen et al. (2004) ist bekannt, dass sensomotorisches Training auch im Bereich des Volleyballsports höchst effizient ist. Die Autoren verfolgten über eine gesamte Volleyballsaison bei 116 männlichen und weiblichen Teams die Frage, ob sich durch ein zusätzliches sensomotorisches Training (Interventionsgruppe n=641) eine signifikante Beeinflussung der Verletzungsraten ergibt. Gegenüber der randomisiert eingerichteten Kontrollgruppe (n=486) reduzierten sich die Verletzungszahlen deutlich. Während die Kontrollgruppe noch über 1,8 Verletzungen pro 1000 Spielstunden lag, sank dieser Wert auf 1,4 bei der Trainingsgruppe. Betrachtet man isoliert die Verletzungsraten des Sprunggelenkkomplexes, war nahezu eine Halbierung der Verletzungsraten nach sensomotorischem Training zu beobachten (0,9 versus 0,5 n/1000h (Intervention versus Kontrolle). Besonders wertvoll erwies sich das zusätzliche Balancetraining bei denjenigen Spielern, die bereits früher am Sprunggelenk verletzt waren.

Diese Ergebnisse sind insofern interessant, da nach Verletzung nachgewiesenermaßen ein sensomotorischer (propriozeptiver) Funktionsverlust einhergeht, dem durch ein sensomotorisches Training im Sinne einer Verletzungsreduktion eindrucksvoll begegnet werden kann.

## Literatur

1. Aagaard P: Training-induced changes in neural function. *Exerc Sport Sci Rev* 31 (2003) 61-67.
2. Backous DD, Friedl KE, Smith NJ: Soccer injuries and their relation to physical maturity. *Am J Dis Child* 142 (1988) 839-842.
3. Bahr R, Krosshaug T: Understanding injury mechanisms: a key component of preventing injuries in sport. *Br J Sports Med* 39 (2005) 324-329.
4. Bloem BR, Allum JHJ, Carpenter MG, Honegger F: Is lower proprioception essential for triggering human automatic postural responses? *Exp Brain Res* 130 (2000) 375-391.
5. Carroll TJ, Riek S, Carson RG: The sites of neural adaptation induced by resistance training in humans. *J Physiol* 544 (2002) 641-652.
6. Dietz V: Human neuronal control of automatic functional movements: interaction between central programs and afferent input. *Physiol Rev* 72 (1992) 33-69.
7. Gollhofer A: Proprioceptive Training: Considerations for Strength and Power training, in: Komi, P (Hrsg.): *Strength and Power in Sport* 2<sup>nd</sup> Edition, 2003, 331-342.
8. Granacher U, Gollhofer A, Strass D: Training induced adaptations in characteristics of postural reflexes in elderly men. *Gait&Posture* 24 (2006) 459-460.
9. Gruber M, Gollhofer A: Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *Europ J appl Physiol* 92 (2004) 98-105.
10. Hawkins RD, Fuller CW: An examination of the frequency and severity of injuries and incidents at three levels of professional football. *Br J Sports Med* 32 (1998) 326-332.
11. Henke T, Gläser H, Heck H: Zur Unfallproblematik und Prävention von Verletzungen im Sport. *Trainerakademie Köln aktuell* 4 (1995) 18-19.
12. Hopper DM, Hopper JL, Elliott BC: Do selected kinanthropometric and performance variables predict injuries in female netball players? *J Sports Sci* 13 (1995) 213-222.
13. Macefield G, Gandevia SC, Gorman R, Bigland-Ritchie B, Burke D: The discharge rate of human motoneurons innervating ankle dorsiflexors in the absence of afferent feedback. *J Physiol* 438 (1991) 219P.
14. McGuine TA, Greene JJ, Best T: Balance as a predictor of ankle injuries in high school basketball players. *Clin J Sport Med* 10 (2000) 239-244.
15. Mechelen van W, Hlobil H, Kemper HC: Incidence, severity, aetiology and prevention of sports injuries. A review of concepts. *Sports Med* 14 (1992) 82-99.



16. Meeuwisse WH: Assessing causation in sport injury: a multifactorial model. *Clin J Sport Med* 4 (1994) 166-170.
17. Meunier S, Pierrot-Deseilligny E: Gating of the afferent volley of the monosynaptic stretch reflex during movement in man. *J Physiol* 419 (1989) 753-763.
18. Murphy DF, Connolly DA, Beynnon, BD: Risk factors for lower extremity injury: a review of the literature. *Br J Sports Med* 37 (2003) 13-29.
19. Myklebust G, Bahr R: Return to play guidelines after anterior cruciate ligament surgery. *Br J Sports Med* 39 (2005) 127-131.
20. Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, Holme I, Bahr R: Exercises to prevent lower limb injuries in youth sports: cluster randomised controlled trial. *BMJ* 330 (2005) 449-456.
21. Santello M, McDonagh M, Challis J: Visual and non-visual control of landing movements in humans. *J Physiol* 537 (2001) 313-327.
22. Schubert M, Curt A, Jensen L, Dietz V: Corticospinal input in human gait: Modulation of magnetically evoked motor responses. *Exp Br Res* 115 (1997) 234-246.
23. Taube W, Schubert M, Gruber M, Beck S, Faist M, Gollhofer A: Direct corticospinal pathways contribute to neuromuscular control of perturbed stance. *J Appl Physiol*, 101 (2006) 420-429.
24. Tropp H, Ekstrand J, Gillquist J: Factors affecting stabilometry recordings of single limb stance. *Am J Sports Med* 12 (1984) 185-188.
25. Verhagen E, van der Beek A, Twisk J, Bouter L, Bahr R, van Mechelen W: The effect of a proprioceptive balance board training program for the prevention of ankle sprains. *Am J Sports Med* 6 (2004) 1385-1393.

**Korrespondenzadresse:**

**Prof. Dr. Albert Gollhofer**  
**Institut für Sport und Sportwissenschaft**  
**Albert-Ludwigs Universität Freiburg**  
**Schwarzwaldstr. 175**  
**79117 Freiburg**  
**e-Mail: [albert.gollhofer@sport.uni-freiburg.de](mailto:albert.gollhofer@sport.uni-freiburg.de)**