

T. Pohl¹, T. Brauner¹, T. Horstmann^{1,2}

Belastungsparameter im sensomotorischen Training

Load parameters in sensorimotor training

Zusammenfassung: Trotz Erkenntnissen zur allgemeinen Wirksamkeit weist der Bereich SMT nach wie vor eine Vielzahl von offenen Fragen auf, die sich durch die Komplexität dieser Thematik begründen. Ziel dieses Übersichtsartikels ist die Zusammenfassung evidenzbasierter Erkenntnisse zur Dosis-Wirkungsbeziehung im sensomotorischen Training. Dazu werden die Ergebnisse aktueller Übersichtsarbeiten zusammengefasst und die trainingswirksamen Parameter herausgearbeitet und diskutiert.

Schlüsselwörter: Dosis-Wirkungsbeziehung, Umfang, Intensität, neuromuskuläres Training, propriozeptives Training

Zitierweise

Pohl T, Brauner T, Horstmann T. Belastungsparameter im sensomotorischen Training.

OUP 2015; 04: 200–204 DOI 10.3238/oup.2015.0200–0204

Summary: Despite the knowledge about the general effectiveness of sensorimotor training, several questions remain unanswered due to the complexity of sensorimotor training. The purpose of this review is to summarize evidence based insights of the dose-response relationship in sensorimotor training. Therefore, the results of current reviews are summarized and the effective training parameters are worked out and discussed.

Keywords: dose-response relationship, extend, intensity, neuromuscular training, proprioceptive training

Citation

Pohl T, Brauner T, Horstmann T. Load parameters in sensorimotor training.

OUP 2015; 04: 200–204 DOI 10.3238/oup.2015.0200–0204

Einleitung

Unter sensomotorischem Training (SMT), häufig auch als neuromuskuläres (NMT) oder propriozeptives Training (PT) bezeichnet, werden Trainingsformen zusammengefasst, die das sensomotorische System verbessern sollen. Generell konnten Effekte des SMT in verschiedensten Umfeldern von Therapie bis Leistungssport nachgewiesen werden. Im (Leistungs-) Sport erhöht ein gezielter Einsatz von SMT die Effektivität von klassischem Krafttraining [1, 2], im Bereich der Verletzungsprävention konnte die verletzungsprophylaktische Wirkung des SMT nachgewiesen werden [3–5] und in der Rehabilitation von orthopädischen Verletzungen ist das SMT als fester Therapiebaustein nicht mehr wegzudenken [6–8]. Hier steigerte SMT die Leistungsfähigkeit nach diversen Verletzungsformen, wie z.B. nach funk-

tioneller und chronischer Sprunggelenkinstabilität [5], Vorderer Kreuzbandrekonstruktion [5], Hüftarthrose [9] und Kniearthrose [10, 11]. Weiterhin gibt es in der Literatur Hinweise für eine Verbesserung im statischen und dynamischen Gleichgewicht [12], die Propriozeption [13, 14] und die Stabilisierungsfähigkeit [9] nach SMT Interventionen.

Trotz dieser Erkenntnisse zur allgemeinen Wirksamkeit weist der Bereich SMT nach wie vor eine Vielzahl von offenen Fragen auf, die sich durch die Komplexität dieser Thematik begründen. Der Fokus verwendeter sensomotorischer Übungen kann durch viele Parameter variiert werden. Beim Balance-Training zählen hierzu z.B. unterschiedliche Körperhaltungen, Art und Größe der Unterstützungsfläche, unterschiedliche Bewegungsaufgaben sowie die Kombination mit dem Training anderer konditioneller Fähigkeiten wie z.B. dem Krafttraining. Je

nach Fokus rücken schwerpunktmäßig andere sensomotorische Fähigkeiten, wie statisches Gleichgewicht, funktionelle Gelenkstabilität oder die Propriozeption in den Vordergrund. Während in der Praxis Therapeuten die genannten Übungsparameter je nach angestrebtem Schwerpunkt erfolgreich variieren, liegen in der Wissenschaft kaum evidenzbasierte Erkenntnisse vor, wie die Parameter festzulegen sind, um möglichst erfolgreich zu sein. Noch schwerwiegender erweisen sich die Wissenslücken zu den klassischen Belastungsparametern Umfang, Dauer und Intensität. Während beim Ausdauer- und Krafttraining Belastungsparameter für die verschiedensten Ansprüche hinlänglich bekannt und weitestgehend evidenzbasiert belegt sind [15], liegen beim SMT wenig evidenzbasierte Informationen dazu vor. In vielen aktuellen Studien fordern die Autoren Untersuchungen der Belastungsparame-

¹ Fachgebiet Konservative und Rehabilitative Orthopädie, Technische Universität München, München

² Medical Park St. Hubertus Bad Wiessee, Bad Wiessee

ter von SMT unter Berücksichtigung der Dosis-Wirkungsbeziehung [12, 16–19]. Im Folgenden werden aktuelle Übersichtsarbeiten vorgestellt, welche die Effektivität und die Dosis-Wirkungsbeziehung von SMT thematisiert haben. Im Anschluss fassen wir die Angaben über Parameter bezüglich Dauer der Einheiten, Länge der Intervention, Frequenz und Intensität von SMT zusammen.

Überblick über aktuelle Übersichtsarbeiten

In den Jahren 2008–2015 sind 6 Übersichtsarbeiten veröffentlicht worden, in denen Belastungsparameter des SMT retrospektiv aus Primärstudien mit einem positiven Effekt von SMT extrahiert wurden. Die Analysen unterscheiden sich dabei hinsichtlich Probandenklientel und der untersuchten anatomischen Strukturen.

Die Arbeitsgruppe um Zech, Hübscher, Vogt, Banzer, Hänsel und Pfeifer erarbeitete 2010 eine systematische Übersichtsarbeit zum Thema ‚Balance Training for Neuromuscular Control and Performance Enhancement‘. Sie zeigten auf, dass ein Gleichgewichtstraining die posturale Schwankung und das dynamische Gleichgewicht in Athleten und Nichtathleten positiv beeinflusst. Die Autoren berichten weiterhin von kontroversen Hinweisen auf Effekte von SMT auf Sprungleistungen, Koordination, spinale Reflexe, Muskelaktivität und Kraftentwicklungsrates [12].

Dieselbe Arbeitsgruppe findet in ihrer Übersichtsarbeit zur Wirksamkeit von NMT auf die Rehabilitation von Sportverletzungen eine moderate Evidenz. Sie schlussfolgern, dass NMT als eine effektive Methode zur Prävention weiterer Verletzungen im Sinne tertiärer Prävention und zur Verbesserung der Gelenkfunktion einzusetzen ist [5].

Aman, Elangovan, Yeh und Konczak analysierten 2014 die Effektivität von PT zur Verbesserung motorischer Funktionen. In ihrer Übersichtsarbeit untersuchten sie die folgenden Arten von SMT-Interventionen: aktive Bewegung/Gleichgewichtstraining, passives Bewegungstraining, somatosensorisches Stimulationstraining, somatosensorisches Diskriminationstraining und kombiniertes/multiple-Systeme-Training. Die Autoren schlussfolgerten, dass PT effektiv die pro-

priozeptive Funktion verbessern kann. Dabei lagen die Verbesserungsdaten von 29 der 51 eingeschlossenen Studien über 20 %. Gleichzeitig konnten 20 von 42 Studien, für die eine Effektstärke berechnet werden konnte, Effektstärken von mehr als 0,5 aufweisen [20].

McKeon und Hertel versuchten in ihrer Übersichtsarbeit von 2008 drei Fragen zu beantworten:

1. Ob prophylaktisches Gleichgewichts- und Koordinationstraining das Risiko eines Supinationstraumas senkt?
2. Ob Gleichgewichts- und Koordinationstraining die Behandlungsergebnisse eines akuten Sprunggelenktraumas verbessert und
3. ob Gleichgewichts- und Koordinationstraining die Behandlungsergebnisse bei chronischer Sprunggelenkinstabilität verbessert.

Für die Fragen 1 und 2 zeigte die Datensynthese eine Evidenz für eine Risikosenkung bei Supinationstraumata, vor allem bei schon einmal verletzten Athleten, und eine Verbesserung der Behandlungsergebnisse bei akuten Sprunggelenktraumata. Frage 3, ob sich das Risiko des Umknickens bei chronischer Sprunggelenkinstabilität positiv beeinflussen lässt, konnte anhand der Daten nicht berechnet werden und deren Beantwortung bleibt somit unklar [21].

O’Driscoll und Delahunt stellten im Jahr 2011 eine Übersicht von Artikeln zusammen, die sich mit NMT zur Verbesserung sensomotorischer und funktioneller Defizite bei chronischer Sprunggelenkinstabilität befassten. Für die Messungen der statischen und dynamischen posturalen Stabilität, des aktiven und passiven Gelenk-Positionsinns, der isometrischen Kraft, der Latenzzeit, der Unterschenkel-Rückfuß-Koordination und der Wiederverletzungsrate zeigte die Übersichtsarbeit eine moderate oder limitierte Evidenz für die Effektivität von NMT [22].

Die Arbeitsgruppe Sugimoto, Myer, Barber Foss und Hewett [23] befasste sich im Jahr 2013 mit den Dosierungseffekten von neuromuskulärem Trainingsinterventionen zur Reduktion von vorderen Kreuzbandverletzungen bei Athletinnen. Dabei wurden Interventionsdauer, Trainingshäufigkeit und Dauer der neuromuskulären Trainingseinheiten im Zusammenhang mit der Anzahl der vorderen Kreuzbandverletzungen untersucht. In ihrer Arbeit extrahieren

Sugimoto et al. die wirksamen Belastungsparameter auf eine andere Art und Weise als die bereits vorgestellten Übersichtsarbeiten. Sie kategorisieren die Belastungsparameter dichotom, wonach die eingeschlossenen Studien den Kategorien zugewiesen werden und der Trainings- oder Interventionserfolg der Kategorien miteinander verglichen wird. Es wurde festgestellt, dass NMT das Verletzungsrisiko im Vergleich zu nicht-neuromuskulär trainierenden Gruppen um bis zu 46 % herabsenkte, was die Effektivität von NMT als verletzungsprophylaktische Intervention demonstrierte.

Belastungsparameter: Dauer der Einheit

Wie lange dauern Therapie-/Trainings-einheiten in Studien, in denen ein positiver Effekt von SMT aufgezeigt werden konnte. Laut Zech et al. [5, 12] liegt die Dauer der einzelnen Einheiten von erfolgreichen SMT-Interventionsstudien zwischen 10 und 60 Minuten [5] bzw. zwischen 5 und 90 Minuten [12] (Abb. 1). Sugimoto et al. kommen zu dem Schluss, dass lange Einheiten von mehr als 20 Minuten wirksamer als kurze Einheiten von weniger als 20 Minuten [23] sind. In den restlichen Studien werden keine Angaben zu der Dauer einer Trainingseinheit gemacht. Weiterhin schlussfolgern Sugimoto et al., dass eine wöchentliche Gesamttrainingsdauer von > 30 Minuten effektiver ist als eine Dauer von 15–30 Minuten und diese wiederum effektiver als eine Dauer von ≤ 15 Minuten pro Woche [23].

Länge des Trainingszeitraums

Zum Zeitraum, über den ein SMT andauern sollte, um Veränderungen hervorzurufen, werden folgende Angaben gemacht. Positive Effekte wurden in Studien mit SMT-Interventionszeiträumen zwischen 4–12 Wochen beobachtet [5, 12] bzw. nach 6–10 Wochen [22]. In 2 Arbeiten wird herausgearbeitet, dass eine SMT-Intervention mindestens über 6 Wochen anhalten sollte [20, 21] (Abb. 2). In einer Arbeit von Aman et al. [21] wird zusätzlich dargestellt, dass sich Verbesserungen teilweise schon nach einer einzigen Einheit zeigen, diese Verbesserung sich aber nicht stabil erwies. Weiterhin wird in der Arbeit geschrieben, dass

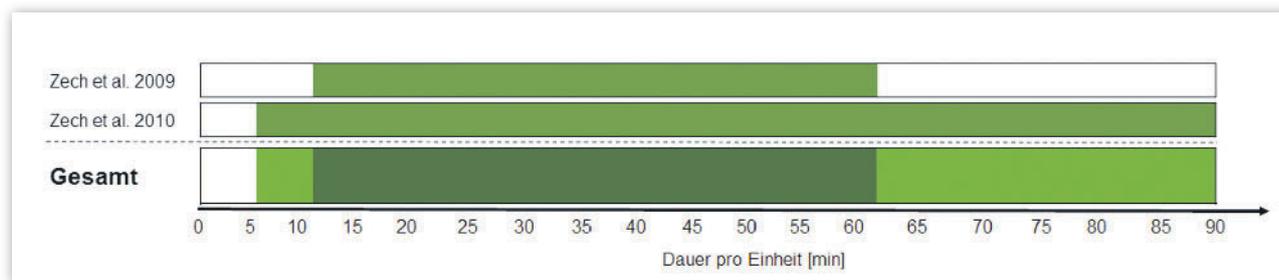


Abbildung 1 Übersicht und Zusammenfassung der Dauer einzelner Trainingseinheiten von wirksamen Trainingsinterventionen. Je dunkler die Farbe in der Gesamtübersicht, desto mehr Übereinstimmungen gibt es für diesen Zeitraum in den Übersichtsarbeiten.

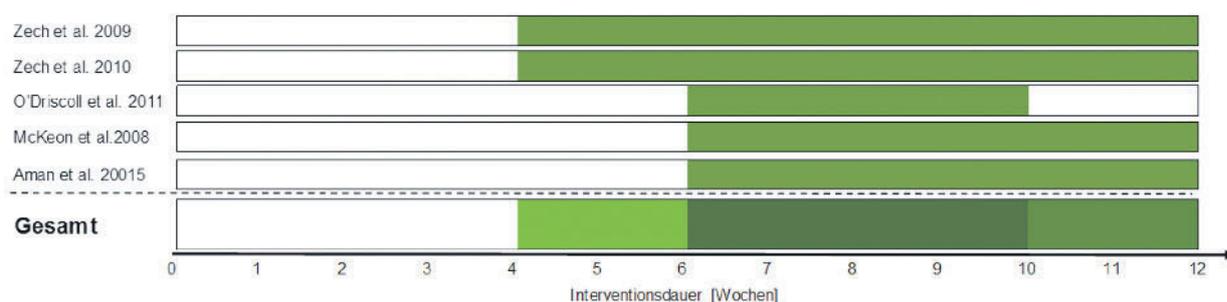


Abbildung 2 Übersicht und Zusammenfassung der Länge des Trainingszeitraums von wirksamen Trainingsinterventionen. Je dunkler die Farbe in der Gesamtübersicht, desto mehr Übereinstimmungen gibt es für diesen Zeitraum in den Übersichtsarbeiten.

sich zwischen 3 und 5 Wochen Interventionsdauer kein Effekt zeigen lässt [20].

Trainingsfrequenz

Die wöchentliche Trainingsfrequenz von SMT, bei der ein Trainingserfolg zu erwarten sei, variiert bei den verschiedenen Übersichtsarbeiten zwischen $3,9 \pm 1,5$ [12], 1–5 [5, 22] und mindestens 3 [21] Einheiten pro Woche (Abb. 3). Sugimoto et al. fanden heraus, dass es besser ist, mindestens 2-mal pro Woche zu trainieren als nur einmal pro Woche [23].

Diskussion

Die Zusammenfassung der verschiedenen Ergebnisse sollte die Frage beantworten, ob es eine evidenzbasierte Aussage zu einer Dosis-Wirkungsbeziehung im SMT gibt. Nach Betrachtung der Ergebnisse schlussfolgern wir, dass gesicherte Erkenntnisse zur Dosis-Wirkungsbeziehung gering sind. Zwar werden die ermit-

telbaren Parameter der erfolgreichen Interventionen herausgearbeitet, nur sind dies alles Angaben, die den Umfang des SMT beschreiben. Über die Steuerung des Trainings über die Intensität, wie man es aus der Trainingswissenschaft kennt (hoher Umfang, geringe Intensität und umgekehrt), liegen keine hinreichend abgesicherten Erkenntnisse vor.

Die Gründe für die unzureichend gesicherten Erkenntnisse zur Dosis-Wirkungsbeziehung sind mannigfaltig. Aussagen über die optimale Intensität von SMT sind schwer zu ermitteln, da die Belastungsintensität im SMT nur schwer zu quantifizieren ist. Vereinzelt Studien haben Progression von Übungen [24], die beanspruchte Muskulatur beim Training auf verschiedenen Geräten [25] oder über die Effekte von Ermüdung auf sensomotorische Fähigkeiten und die motorische Kontrolle [26, 27] thematisiert. Die Frage, wann eine Übung abgebrochen werden sollte, weil die Ermüdung (ähnlich dem Krafttraining) zu groß wird, können diese Untersuchungen nicht beantworten. Wir sind der Mei-

nung, dass es einer umfassenden Messbatterie bedarf, welche die gesamte Bandbreite an ermüdungsmöglichen Systemen und Parametern erfassen kann, um der Komplexität der sensomotorischen Ermüdung und damit der Dosis-Wirkungsbeziehung gerecht zu werden.

Weiterhin ist anzumerken, dass es nach Wissen der Autoren keine Untersuchung gibt, die sich gezielt mit der Frage beschäftigt, wie ein SMT gestaltet werden muss, um optimale Effekte zu erzielen. Die besprochenen Übersichtsarbeiten ermitteln die Belastungsparameter lediglich durch eine retrospektive Ermittlung aus Interventionsstudien mit signifikanten Verbesserungen der Zielgrößen. Die Herausarbeitung dieser ist auch (bis auf Sugimoto et al.) nicht die Absicht der Übersichtsarbeiten. Eher geht es dabei um die generelle Wirksamkeit von SMT bei verschiedenen Zielgruppen und verschiedenen Zielgrößen – von der Reduktion von Verletzungen des Vorderen-Kreuzbands bei Athletinnen [23] bis zur Verbesserung der neuromuskulären Kontrolle und Leistungssteigerung durch Gleichge-

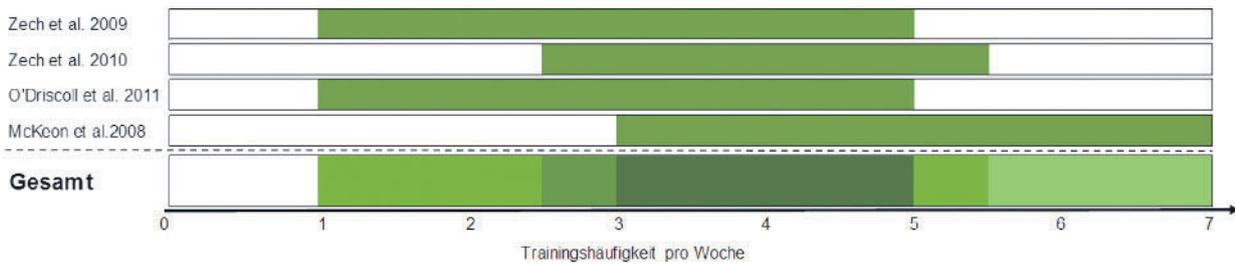


Abbildung 3 Übersicht und Zusammenfassung der wöchentlichen Trainingsfrequenz von wirksamen Trainingsinterventionen. Je dunkler die Farbe in der Gesamtübersicht, desto mehr Übereinstimmungen gibt es für diesen Zeitraum in den Übersichtsarbeiten.

wichtstraining [12]. Es liegt in der Natur der Sache, dass verschiedene Zielgrößen auch verschiedene Messmethoden benötigen. Und da gibt es bei den sensomotorischen Fähigkeiten ein breites Spektrum verschiedenster Messmethoden. Veränderungen von Reflexantworten werden u.a. durch Messungen des H-Reflexes quantifiziert [2, 28]. Gleichgewichtsparameter können bei statischen Gleichgewichtsmessungen über Kraftmessplatten erfasst werden [26, 29, 30]. Bei dynamischen Gleichgewichtsmessungen können verschiedene Tests, wie z.B. der Star Excursion Balance Test [31] oder Stabilisierungsmessungen auf Kraftmessplatten [26] oder sensomotorischen Trainingsgeräten [26, 32] durchgeführt werden. Eine weitere sensomotorische Fähigkeit, die mit unterschiedlichen Methoden gemessen werden kann, ist die Propriozeption. Je nachdem, ob Lage-, Kraft- oder Bewegungssinn im Fokus der Untersuchung liegen, können unter anderem Winkelreproduktionstests [33] oder Tests zur Bestimmung der Schwelle zur Feststellung passiver Bewegungen (threshold to detection of passive movement) [17] durchgeführt werden. Die dadurch entstehende Vielfalt an Studien erschwert die Datensynthese von Meta-Analysen und systematischen Übersichtsarbeiten.

Ein weiteres Hindernis bei der Vereinheitlichung der Ergebnisse sensomotorischer Studien ist die methodische Qualität. In einer Übersicht mussten von 38 relevanten Studien 10 wegen inadäquater Kontrollgruppen und 9 aufgrund unzureichender Interventionsbeschreibung oder nicht kontrolliertem Studiendesign ausgeschlossen werden [5]. Weiterhin konnten teilweise nur 3 von 20 [12], bzw. 3 von 15 [5] eingeschlossenen Studien als

methodisch hochqualitativ bezeichnet werden. In den meisten Fällen lagen schlechtere Einstufungen an einer unklaren Methodenbeschreibung [5].

Mit den aus Übersichtsarbeiten extrahierten Belastungsparametern lassen sich genaue Empfehlungen nur schwer aussprechen. Wöchentliche Trainingsfrequenzen zwischen 1 und 5 oder Angaben wie 2-mal oder mehr als 2-mal pro Woche ist besser als einmal pro Woche bringen wenig Mehrwert für die therapeutische Praxis. Gleiches gilt für die Angaben zur Einheitendauer zwischen 5 und 90 Minuten. Einzig bei der Interventionsdauer scheint sich ein Schwellenwert abzuzeichnen, ab dem das SMT eine Wirkung zeigt. Es zeigt sich, dass SMT-Interventionen ab 6 Wochen statistisch signifikante Verbesserungen auslösen können. Auch wenn schon ab 4 Wochen signifikante Veränderungen durch SMT festgestellt werden konnten [5, 12], zeigt eine andere Übersichtsarbeit, dass sich zwischen 3 und 5 Wochen keine Veränderung zeigen lässt [20].

Wenn über Belastungsparameter diskutiert wird, muss man auch die Art der zu trainierenden Fähigkeiten analysieren. In der Begriffsdiskussion um das SMT [34] fallen immer wieder die Schlagworte Koordination oder (senso)motorisches Lernen [6, 19]. Bei beiden Denkansätzen ist das Ziel, eine Bewegung erfolgreich auszuführen. Für solche zielorientierten Handlungen ist ein wichtiges Bewertungskriterium die Bewegungsqualität. Die Bewegungsqualität ist eine Grundvoraussetzung für therapeutisches Training und dient zusätzlich der Reduktion des Verletzungsrisikos beim Training.

Ausblick

Um einer Beantwortung der Frage nach der Dosis-Wirkungsbeziehung näher zu kommen, sind noch einige Schritte notwendig. Ein einheitlicher Umgang mit den Begriffen SMT, NMT oder PT etc., sowohl im deutschen als auch im englischen Sprachgebrauch, sollte dabei das Fundament der wissenschaftlichen Untersuchungen bilden. Es bedarf gezielter Studien, die konkret der Fragestellungen nach optimalen Belastungsparametern nachgehen; ausschließlich diese nur retrospektiv herauszuarbeiten, ist für die Zukunft nicht ausreichend. Aufgrund der Komplexität des sensomotorischen Systems ist die Verbesserung der methodischen Qualität ein wichtiges Ziel für die Studienplanung. Sei es eine genauere Beschreibung der Interventionen, Messmethoden, oder Stichproben, die Anpassungen der Stichprobengrößen oder das Durchführen von Follow-up-Messungen. Die Betrachtung der Bewegungsqualität zur Steuerung Trainingsintensität ist eine weitere Zielgröße, die zur Aufklärung der Frage nach der Dosis-Wirkungsbeziehung beitragen kann. ^[OUP]

Interessenkonflikt: Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des Internationalen Committee of Medical Journal Editors besteht.

Korrespondenzadresse

Torsten Pohl
Konservative & Rehabilitative
Orthopädie
Technische Universität München
Georg-Brauchle-Ring 60/62
80992 München
Torsten.pohl@tum.de

Literatur

1. Bruhn S, Kullmann N, Gollhofer A: Combinatory Effects of High-Intensity-Strength Training and Sensorimotor Training on Muscle Strength. *Int J Sports Med* 2006, 27: 401–406
2. Taube W, Kullmann N, Leukel C, Kurz O, Amtage F, Gollhofer A: Differential reflex adaptations following sensorimotor and strength training in young elite athletes. *Int J Sports Med* 2007, 28: 999–1005
3. Verhagen E, van der Beek, A., Twisk J, Bouter L, Bahr R: The Effect of a Proprioceptive Balance Board Training Program for the Prevention of Ankle Sprains: A Prospective Controlled Trial. *Am J of Sports Med* 2004, 32: 1385–1393
4. Mandelbaum BR: Effectiveness of a Neuromuscular and Proprioceptive Training Program in Preventing Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes: 2-Year Follow-up. *Am J of Sports Med* 2005, 33: 1003–1010
5. Zech A, Hübscher M, Vogt L, Banzer W, Hänsel F, Pfeifer K: Neuromuscular Training for Rehabilitation of Sports Injuries. *Med Sci Sports Exerc* 2009, 41: 1831–1841.
6. Bizzini M, Boldt J, Munzinger U, Drobny T: Rehabilitationsrichtlinien nach Knieendoprothesen. *Orthopäde* 2003, 32: 527–534
7. Heisel J: Rehabilitation nach endoprothetischem Ersatz von Hüfte und Knie. *Orthopäde* 2008, 37: 1217–1232
8. Wilk KE, Macrina LC, Cain EL, Dugas JR, Andrews JR: Recent Advances in the Rehabilitation of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *J Orthop Sports Phys Ther* 2012, 42: 153–171
9. Boer J, Mueller O, Krauss I, Haupt G, Axmann D, Horstmann T: Effects of a sensory-motor exercise program for older adults with osteoarthritis or prosthesis of the hip using measurements made by the Posturomed oscillatory platform. *J Geriatr Phys Ther* 2010, 33: 10–15
10. Hurley MV, Scott DL: Improvements in quadriceps sensorimotor function and disability of patients with knee osteoarthritis following a clinically practicable exercise regime. *Br. J. Rheumatol.* 1998, 37: 1181–1187
11. Lin D: Efficacy of 2 Non-weight-bearing Interventions, Proprioception Training Versus Strength Training, for Patients With Knee Osteoarthritis: A Randomized Clinical Trial. *J Orthop Sports Phys Ther* 2009; 39: 450–7
12. Zech A, Hübscher M, Vogt L, Banzer W, Hänsel F, Pfeifer K: Balance Training for Neuromuscular Control and Performance Enhancement: A Systematic Review. *J Athl Train* 2010, 45: 392–403
13. Pánics G, Tállay A, Pavlik A, Berkes I: Effect of proprioception training on knee joint position sense in female team handball players. *Br J Sports Med* 2008, 42: 472–476
14. Tsauo J, Cheng P, Yang R: The effects of sensorimotor training on knee proprioception and function for patients with knee osteoarthritis: a preliminary report. *Clin Rehabil* 2008, 22: 448–457
15. Harre D, Krug J, Schnabel G (Hrsg.): Trainingslehre und Trainingswissenschaft: Leistung – Training – Wettkampf. 1st edition, Aachen: Meyer & Meyer; 2008
16. Piva SR, Gil AB, Almeida GJM, DiGioia AM, Levison TJ, Fitzgerald GK: A Balance Exercise Program Appears to Improve Function for Patients With Total Knee Arthroplasty: A Randomized Clinical Trial. *Phys Ther* 2010, 90: 880–894
17. Cammarata ML, Schnitzer TJ, Dhaher YY: Does knee osteoarthritis differentially modulate proprioceptive acuity in the frontal and sagittal planes of the knee? *Arthritis & Rheumatol* 2011, 63: 2681–2689
18. Khan F, Ng L, Gonzalez S, Hale T, Turner-Stokes L: Multidisciplinary rehabilitation programmes following joint replacement at the hip and knee in chronic arthropathy. *Cochrane Database Syst Rev* 2008: CD004957
19. Henriques, Denise Y P, Cressman EK: Visuomotor adaptation and proprioceptive recalibration. *Journal of motor behavior* 2012, 44: 435–444
20. Aman JE, Elangovan N, Yeh I, Konczak J: The effectiveness of proprioceptive training for improving motor function: a systematic review. *Front. Hum. Neurosci.* 2014, 8: 1075
21. McKeon PO, Hertel J: Systematic review of postural control and lateral ankle instability, part II: is balance training clinically effective? *J Athl Train* 2008, 43: 305–315
22. O'Driscoll J, Delahunt E: Neuromuscular training to enhance sensorimotor and functional deficits in subjects with chronic ankle instability: A systematic review and best evidence synthesis. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol* 2011, 3: 19
23. Sugimoto D, Myer GD, Barber F, Kim D, Hewett TE: Dosage Effects of Neuromuscular Training Intervention to Reduce Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes: Meta- and Sub-Group Analyses. *Sports Med* 2014; 44: 551–62
24. Borreani S, Calatayud J, Martin J, Colado JC, Tella V, Behm D: Exercise intensity progression for exercises performed on unstable and stable platforms based on ankle muscle activation. *Gait & Posture* 2014, 39: 404–409
25. Dohm-Acker M, Spitzenpfeil P, Hartmann U: Auswirkung propriozeptiver Trainingsgeräte auf beteiligte Muskulatur im Einbeinstand. *Sportverletz Sportschaden* 2008, 22: 52–57
26. Steib S, Hentschke C, Welsch G, Pfeifer K, Zech A: Effects of fatiguing treadmill running on sensorimotor control in athletes with and without functional ankle instability. *Clin Biomech* 2013, 28: 790–795
27. Steib S, Zech A, Hentschke C, Pfeifer K: Fatigue-induced alterations of static and dynamic postural control in athletes with a history of ankle sprain. *J Athl Train* 2013, 48: 203–208
28. Bruhn S, Leukel C, Gollhofer A: Differential effects of stimulus characteristics during knee joint perturbation on hamstring and quadriceps reflex responses. *Hum Mov Sci* 2011, 30: 1079–1091
29. Raymakers J, Samson M, Verhaar H: The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s). *Gait & Posture* 2005, 21: 48–58
30. Rougier PB: Biomechanical analysis of postural strategies over the first two months following anterior cruciate ligament reconstruction. *Motor Control*, 16: 94–105
31. Gribble PA, Hertel J, Plisky P: Using the Star Excursion Balance Test to assess dynamic postural-control deficits and outcomes in lower extremity injury: a literature and systematic review. *J Athl Train* 2012, 47: 339–357
32. Boer J, Mueller O, Krauss I, Haupt G, Horstmann T: Zuverlässigkeitsprüfung eines Messverfahrens zur Charakterisierung des Standverhaltens und Quantifizierung des Balancevermögens auf einer instabilen Plattform (Posturomed). *Sportverletz Sportschaden* 2010, 24: 40–45
33. Shakoorn N, Furmanov S, Nelson DE, Li Y, Block JA: Pain and its relationship with muscle strength and proprioception in knee OA: results of an 8-week home exercise pilot study. *J Musculoskelet Neuronal Interact* 2008, 8: 35–42
34. Pfeifer K, Banzer W, Hänsel F, Hübscher M, Vogt L, Zech A: Wissenschaftliche Expertise „Sensomotorisches Training – Propriozeptives Training“. Köln: Sportverlag Strauß. 2009