

Haas CT, Schulze-Cleven K, Turbanski S, Schmidtbleicher D

Zur Interaktion koordinativer und propriozeptiver Leistungen

Interactions of coordinative and proprioceptive performances

Institut für Sportwissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt

Zusammenfassung

1. Problemstellung: Gegenstand der Studie war die Überprüfung, inwieweit eine Optimierung koordinativer Leistungen mit einer Verbesserung propriozeptiver Eigenschaften einhergeht.

2. Methoden: 25 Studienteilnehmer wurden einer Experimentalgruppe (15 Personen) und einer Kontrollgruppe (10 Personen) zugeteilt. Die Analyse der propriozeptiven Leistung basierte auf der Reproduktion oszillierender Gelenkwinkelverläufe via Kniegelenkextensionen und -flexionen. Zwischen Vor- und Nachtest absolvierten die Teilnehmer der Experimentalgruppe 5 Serien randomisierter Ganzkörperschwingungen à 60 Sekunden. Aus früheren Studien ist bekannt, dass dieses Treatment zu signifikanten koordinativen Verbesserungen führt. In der Kontrollgruppe wurde eine Ruhephase zwischengeschaltet.

3. Ergebnisse: Bei fast allen Versuchsteilnehmern können im Testverlauf sowohl unter- als auch überschießende Abweichungen von der Zielvorgabe identifiziert werden. Am oberen Umkehrpunkt (max. Kniegelenkwinkel) treten vermehrt überschießende Bewegungsabweichungen auf, am unteren Umkehrpunkt (min. Kniegelenkwinkel) eher unterschließende. Im Hinblick auf die Bewegungsfrequenz zeigen sich in Relation zur Vorgabe leicht schnellere Ausführungen. Der Vortest-Nachtest-Vergleich führt in beiden Gruppen zu geringen und nicht signifikanten Differenzen in allen Testparametern ($p > 0,05$). Auch im Gruppenvergleich können keine statistisch bedeutsamen Differenzen identifiziert werden.

4. Diskussion: Die vorliegende Studie zeigt keinen Einfluss des Treatments auf die propriozeptive Leistungsfähigkeit. Frühere Studien fanden allerdings hochsignifikante Verbesserungen in der posturalen Kontrolle als Treatmenteffekt. Als mögliche Erklärung für diese divergenten Resultate lassen sich verschiedene Argumente auf untersuchungsmethodischer Ebene anführen. Alternativ bietet die Theorie der Stochastischen Resonanz (SR) eine Plattform, um motorische Adaptationen durch eine natürliche neuronale Variabilität zu erklären.

Schlüsselwörter: Propriozeption, Koordination, Oszillation, Stochastische Resonanz

Einleitung

„Propriozeptives Training“ stellt in den Bewegungswissenschaften und der Sportmedizin eine vielfach bemühte und umfangreich zitierte Trainingsform dar. Vor allem im Bereich der Prävention und Rehabilitation gilt das Erreichen einer optimierten Propriozeption als zentrales Ziel (z.B. 1, 17, 24, 28, 31). Ein kritischer Vergleich der ur-

Summary

1. Purpose of the study: The aim of this study was to analyse whether improved coordinative performance is based on improved proprioceptive capabilities.

2. Methods: 25 sportive participants were subdivided in one experimental (15 subjects) and one control group (10 subjects). Proprioceptive performance was analysed by reproducing a slowly-oscillating target course via knee extension and flexion movements. Members of the experimental group performed 5 series of random whole-body-vibration of 60 seconds each between pre- and post-tests. Control subjects had a rest period.

3. Results: Undershooting as well as overshooting errors can be identified in nearly all participants. Overshooting errors were more prominent at the higher endpoint (max. knee angle) and undershooting errors were found at the lower endpoint (min. knee angle). A higher velocity compared to the target course became evident with respect to movement frequency. However, pre-post comparison showed small and statistically insignificant ($p > 0,05$) differences in all analysed parameters in both groups. Furthermore, no significant group differences could be identified.

4. Discussion: The study at hand shows that the treatment has no influence on proprioceptive performance. However, earlier studies found that the treatment greatly improves postural control ($p < 0,01$). This divergence might be explainable on one hand by methodical aspects of measuring proprioception. On the other hand, stochastic resonance theory provides a platform to explain adaptations in motor control by the natural variability of neural processes.

Keywords: Proprioception, Coordination, Oscillation, Stochastic Resonance

sprünglichen Definition mit den umgangssprachlichen Verwendungsformen zeigt inhaltlich erhebliche Varianzen. Ausgehend von den Arbeiten von Goldstein und Sherrington wird im klassischen Sinn die Fähigkeit beschrieben, Zustand und Veränderung von Gelenkwinkeln zu erfassen (1, 6, 7, 29). Aufbauend auf dieser Definition werden zwei propriozeptive Modalitäten unterschieden: a) Genauigkeit der Erfassung eines Gelenkwinkels und b) Schwelle der Wahrnehmung einer Bewegung (1). Offen

bleibt hierbei, inwiefern sich diese Erfassungsvorgänge durch Training optimieren lassen. Weit verbreitet ist die Auffassung, dass koordinative Leistungen – wie z.B. die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts – eng mit propriozeptiven Fähigkeiten verbunden sind. So sind nach einer Bandruptur nicht nur Defizite in der funktionalen Kniegelenkstabilität und der posturalen Kontrolle zu finden, sondern auch propriozeptive Einschränkungen bezüglich

mehrere propriozeptive Testserien. Das Treatment setzte sich aus der Applikation randomisierter mechanischer Ganzkörperschwingungen (srt-medical, Fa. human mobility) in fünf Serien à 60 Sekunden zusammen. In früheren Untersuchungen wurde gezeigt, dass diese Reize spontan zu signifikanten Verbesserungen in der posturalen Kontrolle führen (vgl. Abb. 1) (12, 13, 14, 15, 34). Des Weiteren ist bekannt, dass die physiologische Reaktion und damit verbundene Veränderungen in der

posturalen Kontrolle von der Reizfrequenz abhängig sind (vgl. Abb. 1) (12, 14).

Dementsprechend absolvierte jeder Proband an unterschiedlichen Tagen und in zufälliger Abfolge je fünf Trainingsserien im theta- (6 Hz) sowie im alpha-Frequenzbereich (10 Hz). Aus Gründen der Informationsselektion und zur Vermeidung von Habituationseffekten ist der Schwingungsreiz nicht harmonisch sondern unterliegt einer Randomisierungsfunktion, d.h. die Grundfrequenz schwankt in einem Bereich von ca. +/-1Hz, sowie geringen stochastischen Einflüssen (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16). Um bei der Experimental- und Kontrollgruppe die gleichen Zeitfenster im Untersuchungsverlauf zu gewährleisten, wurde in der Kontrollgruppe anstatt des Treatments eine 15-minütige Pause zwischen den Vor- und Nachtestserien geschaltet.

Messung: Das Messprozedere basiert auf der Reproduktion von Gelenkwinkeln (vgl. Abb. 2 und 3). In Anlehnung an Untersuchungen von Wilke und Froböse sowie Lönn et al. (19, 36) wurde eine aktive Reproduktion in sitzender Position ausgewählt. Die Bewegungsvorgabe be-

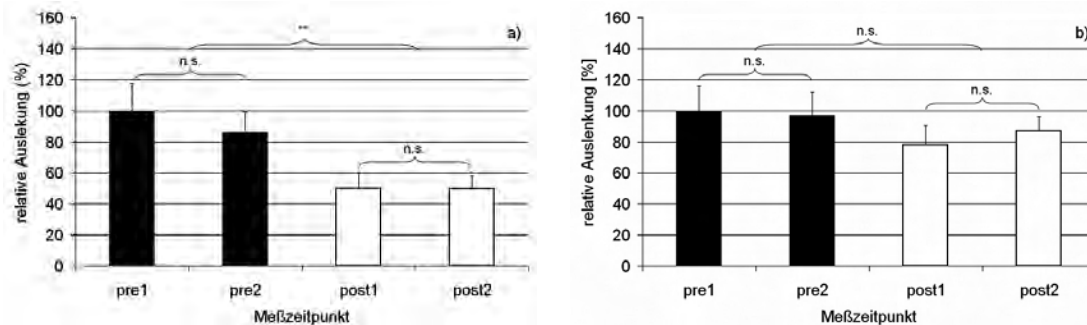


Abbildung 1 a, b: Darstellung der aufsummierten relativen Auslenkungen einer dynamischen Messplattform vor und nach dem Treatment bei (a) 6 Hz und (b) 10 Hz. Ein geringerer Wert parametrisiert eine bessere Gleichgewichtskontrolle. Während aus der 6 Hz Stimulation hochsignifikante Verbesserungen in der Gleichgewichtsregulation resultieren, bewirkt die 10 Hz Stimulation nur leichte Modifikationen (14).

der Wahrnehmungsschwelle von Bewegungen und der Reproduktionsgenauigkeit von Gelenkwinkeln (3, 4, 9, 36). Auch bei neurodegenerativen Krankheitsbildern – wie z.B. Morbus Parkinson – zeigen sich sowohl massive Einschränkungen in der Propriozeption, als auch Störungen im Gangbild und in der Gleichgewichtsregulation (8, 15, 27, 34).

Auf der Basis derartiger Evidenzen wurde häufig geschlossen, dass die Interaktion zwischen Propriozeption und Koordination auch im umgedrehten Sinne auf sportliche Trainingsprozesse anwendbar ist, d.h., dass eine verbesserte Koordination mit einer ebenfalls verbesserten Propriozeption einhergeht. Neuere Ansätze im Bereich der Neurophysiologie und Informationstheorie stellen eine derartige zweiseitige funktionale Kausalität in Frage (1, 16, 28). Zielstellung der vorliegenden Studie ist dementsprechend die Überprüfung, ob Trainingsreize, die zu verbesserten koordinativen Leistungen führen, mit propriozeptiven Veränderungen einhergehen.

Methoden

Personenstichprobe: Insgesamt nahmen 25 Personen ohne neurologische oder orthopädische Einschränkungen an der Untersuchung teil. Zur Überprüfung der Gütekriterien der Testprozedur bildeten 10 Personen (3 Frauen, 7 Männer) eine Kontrollgruppe, bei der keine Intervention erfolgte. Die Experimentalgruppe setzte sich aus 15 weiteren Teilnehmern (7 Frauen, 8 Männer) zusammen. Die Aufteilung auf beide Gruppen erfolgte zufällig.

Verlauf: Das Untersuchungsdesign basiert auf einem ad-hoc Längsschnitt. Teilnehmer der Experimentalgruppe absolvierten vor und nach einer koordinativen Trainingseinheit

Referenzposition (90°)

Min.-Position (105°)



Extension

Flexion



Max.-Position (125°)

Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der Testaufgabe. Jede Testserie wurde in einer definierten, vorgegebenen Position von 90° begonnen. Durch wechselseitige Kniegelenkextensionen und -flexionen sollten Gelenkwinkelverläufe mit Maxima von 125° und Minima von 105° reproduziert werden.

stand in einem langsam oszillierenden Sinussignal (0,25 Hz), das eine Bewegungsamplitude von +/- 10 Grad repräsentiert (vgl. Abb. 2 und 3).

Die Reproduktion erfolgte durch zyklische Extensions- und Flexionsbewegungen im Kniegelenk. Zur Erfassung der Gelenkwinkelveränderungen wurde ein Goniometer (Fa. Bio-vision) eingesetzt, der aus Gründen der Fehlerminimierung an einer stabilen Knie-Orthese (Fa. DonJoy) befestigt war, die vom Probanden an der linken unteren Extremität getragen wurde. Die Wahl einer aktiven Reproduktionsweise und die Entscheidung für die Erfassung der propriozeptiven Leistung im Kniegelenk erfolgt in Anlehnung an andere Arbeiten und die daraus hervorgehenden Testgütekriterien (1, 5, 19, 36). Um sicherzustellen, dass die Reproduktionsaufgaben auf der Basis propriozeptiver Signale erfolgten, wurde ein doppelter Sichtschutz installiert. So konnte während des Versuchs der Bildschirm nicht eingesehen werden und es bestand keine Möglichkeit einer visuellen Kontrolle der eigenen Kniegelenksbewegung. Damit die erfassten Größen möglichst wenig variierten, absolvierten alle Probanden vor Testbeginn eine 30-minütige Trainingsphase, die mit und ohne visuelles Feedback durchgeführt wurde.

Datenverarbeitung und Statistik: Zur Bestimmung der propriozeptiven Leistung wurden drei Parameter analysiert: Bewegungsmaximum (Extension), Bewegungsminimum (Flexion) und Bewegungsfrequenz. Im Vor- und

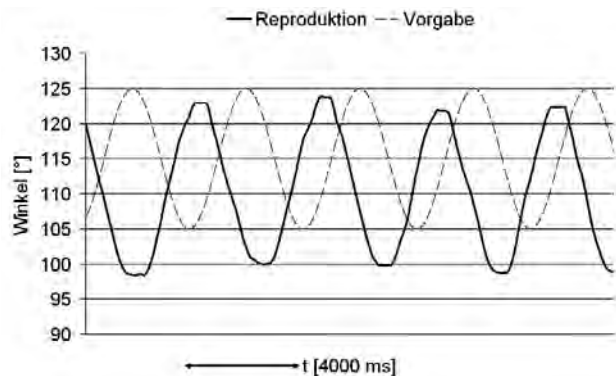


Abbildung 3: Exemplarische Darstellung der Bewegungsvorgabe sowie der Reproduktionsleistung eines Probanden.

Nachtest wurden jeweils fünf Testserien absolviert, wobei die besten vier Serien in die weitere Datenverarbeitung aufgenommen wurden. Jede Testserie setzte sich aus 10 Bewegungszyklen zusammen. Als propriozeptiver Leistungsparameter wird jeweils der Mittelwert einer Testserie im Hinblick auf Bewegungsminimum, -maximum sowie -frequenz gewertet. In Orientierung an der vorliegenden Literatur wurden propriozeptive Leistungen umso höher bewertet, je geringer die Abweichung der eigenen Bewegung von der Bewegungsvorgabe war. Nach Prüfung der üblichen Verteilungsmaße und Anwendungsvoraussetzungen wurden in der statistischen Datenverarbeitung 2-faktorielle Varianzanalysen mit doppelter Messwiederholung für die einzelnen Testparameter berechnet. Analog erfolgt der Vergleich der einzelnen Treatmentbedingungen

(6 Hz vs. 10 Hz). Zur Absicherung vermeintlicher Gruppenunterschiede (Treatment 6 Hz vs. Kontrolle sowie Treatment 10 Hz vs. Kontrolle) wurden 2-faktorielle Varianzanalysen mit einfacher Messwiederholung berechnet. Zur Adjustierung der Alpha-Fehler erfolgten Bonferroni-Fehlerkorrekturen.

Ergebnisse

Die interindividuelle Betrachtung der Untersuchungsergebnisse zeigt bei rund 80 % der Probanden Abweichungen in Höhe von 2° bis 5° von der Bewegungsvorgabe. Das Ausmaß der Abweichungen wird nicht durch eine Bewegungsrichtung (Bewegungsminimum bzw. Flexion vs. Bewegungsmaximum bzw. Extension) deutlich dominiert. So zeigt die intraindividuelle Analyse der Datenstruktur im Hinblick auf die Bewegungszyklen und -serien Abweichungen von der Vorgabe in beide Richtungen, d.h. überschießende und unterschließende Bewegungsabläufe. Im Durchschnitt ist am Minimum ein leicht unterschließendes Muster zu identifizieren, am Maximum dagegen ein leicht überschießendes (siehe Tab. 1). Bezüglich der Bewegungsfrequenz können ebenfalls intraindividuell variable Ergebnisse identifiziert werden. Im Durchschnitt ergeben sich im Vergleich zur Vorgabe leicht schnellere Abläufe.

Statistisch betrachtet zeigen sich bei allen Parametern (Minimum, Maximum, Frequenz) sowohl innerhalb der Vor- wie auch der Nachtests keine signifikanten Differenzen ($p > 0,05$), sodass von geringen Lerneffekten auszugehen ist.

Der Vergleich von Vor- und Nachtests zeigt bei keinem Testparameter, unabhängig von der Treatment- oder Kontrollbedingung, markante oder statistisch bedeutsame Veränderungen ($p > 0,05$). Ebenso führt der Gruppenvergleich zu keinem signifikanten Ergebnis ($p > 0,05$).

Diskussion

Im Gegensatz zu den umfangreichen Kenntnissen über Sensitivitäten, Erregungsschwellen und Entladungsverhalten unterschiedlicher Sensoren bestehen vor allem im Bereich der funktionalen Gewichtung afferenter Signale und deren Modulationspotential efferenter Steuerungsvorgänge augenfällige Forschungsdefizite. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen in keinem Testkriterium signifikante propriozeptive pre-post Veränderungen oder Gruppenunterschiede. Gleichzeitig konnten in vorangegangenen Studien signifikante Verbesserungen bei koordinativen Anforderungen als Treatmenteffekt nachgewiesen werden (12, 13, 14, 15, 34). Dementsprechend liegt die Schlussfolgerung nahe, dass Trainingsstimuli, die bei gleichem Studiendesign zu verbesserten koordinativen Leistungen führen, nicht direkt von propriozeptiven Veränderungen begleitet sein müssen. Da in dieser Studie allerdings jeweils ad-hoc Effekte betrachtet wurden, be-

schränkt sich diese Schlussfolgerung zunächst nur auf kurzfristige Adaptationsprozesse.

Bevor alternative neuronale Adaptationsmechanismen diskutiert werden, erscheint es sinnvoll, auch untersuchungsmethodische Aspekte kritisch zu betrachten. Selbst

grund der geführten Bewegung der Testsituation ist allerdings davon auszugehen, dass bewusste kognitive Aspekte die Bewegungsleistung entscheidend beeinflussen bzw. dominieren (30). Auf eine weitere Diskussion von Bewusstseinsaspekten, sowie der damit verbundenen Ab-

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen aller Untersuchungsgruppen im Pre- und Posttest. Sowohl die Gruppen- als auch die Pre-Postvergleiche führen jeweils zu statistisch nicht signifikanten Ergebnissen ($p > 0,05$).

Gruppe	Testparameter					
	Minimum		Maximum		Frequenz	
	Pre-Test	Post-Test	Pre-Test	Post-Test	Pre-Test	Post-Test
Exp. 6 Hz-Treatment	103,9 (+/-2,3)	103,8 (+/-3,8)	127,6 (+/3,1)	127,2 (+/-6,0)	0,27 (+/-0,03)	0,26 (+/-0,04)
Exp. 10 Hz-Treatment	103,4 (+/-4,0)	103,8 (+/-4,2)	127,1 (+/-7,1)	127,9 (+/-5,6)	0,26 (+/-0,03)	0,27 (+/-0,05)
Kontroll	102,9 (+/-2,2)	102,8 (+/-3,4)	127,4 (+/-2,6)	126,1 (+/-2,1)	0,28 (+/-0,02)	0,29 (+/-0,04)

wenn die vorliegende Datenlage nicht darauf hindeutet, können propriozeptive Anpassungen nicht komplett ausgeschlossen werden. Zur Gewährleistung der notwendigen Gütekriterien liegen propriozeptiven Testprozeduren - auf Basis der Gelenkwinkelreproduktion - generell geführte und dementsprechend langsame Bewegungen zugrunde (19). Das Treatment ist allerdings durch ein ballistisches Reizmuster charakterisiert, was im Hinblick auf das Erreichen präventiver neuromuskulärer Adaptationsvorgänge zentral bedeutsam erscheint (13, 14, 15, 34). Da das Entladungsverhalten - vor allem der Muskelspindeln - hochgradig geschwindigkeitsabhängig ist, sind auch dementsprechend spezifische Anpassungen wahrscheinlich. Die Divergenz der biomechanischen Anforderungsstrukturen könnte somit dazu führen, dass auftretende propriozeptive Adaptationen in der langsamen Testsituation nicht zum Tragen kommen (22, 30). Untersuchungen von Yasuda et al. unterstützen diese Annahme (38). Sie argumentieren, dass die Muskelspindeln vor allem für die Kontrolle der Bewegungsgeschwindigkeit verantwortlich sind, während Gelenk- und Mechanorezeptoren die Endpunkte einer Bewegung kontrollieren. In diesem Zusammenhang ließe sich interpretieren, dass das Treatment, sofern es propriozeptive Veränderungen hervorruft, vor allem Anpassungen auf Ebene von Typ Ia und Typ II Afferenzen generiert (38).

Im Zusammenhang mit differierenden zeitlichen Anforderungssituationen lassen sich noch weitere Aspekte anführen. Norrie et al. (22) zeigten, dass bei der posturalen Kontrolle zumindest zwei Zeitfenster zu unterscheiden sind. Während frühe Kontrollprozesse (automatic phase, ab ca. 140 ms) weitgehend autonom ablaufen, kann die Gleichgewichtsregulation in einer späten Phase (attention-demanding phase, ab ca. 690 ms) durch kognitive Prozesse beeinflusst werden. Analog zu dieser Differenzierung unterscheiden auch andere Studien unterschiedliche Zeitfenster in posturalen Steuerungsvorgängen (21, 25, 26, 30). Hieran anknüpfend wäre denkbar, dass verbesserte propriozeptive Wahrnehmungsleistungen auftreten, die direkt auf spinaler Ebene umgeschaltet werden und die Bewegungsausführung in einer frühen Phase positiv beeinflussen, ohne dass eine direkte Weiterschaltung auf höhere Ebenen und dementsprechend auch keine Bewusstwerdung erfolgen würde. Auf-

grund der geführten Bewegung der Testsituation ist allerdings davon auszugehen, dass bewusste kognitive Aspekte die Bewegungsleistung entscheidend beeinflussen bzw. dominieren (30). Auf eine weitere Diskussion von Bewusstseinsaspekten, sowie der damit verbundenen Ab-

grenzung des Propriozeptionsbegriffes zur Kinästhetik, soll an dieser Stelle aus ökonomischen Gründen verzichtet werden.

Neben den dargestellten methodischen Problemen und den daraus resultierenden Fragen lassen sich weitere Argumentationslinien anführen, die Potential zur Erklärung der Veränderungen des koordinativen Verhaltens aufweisen. Die Ausführung einer Bewegung generiert generell ein Set an afferenten Informationen. Zwar bestehen spezifische Reiz-Reaktionsmuster jedes Sensortypus, allerdings existieren auch Überschneidungsbereiche, die eine neurophysiologische Redundanz sicherstellen (30, 33, 38). Auf diese Weise können Ausfälle bestimmter sensorischer Afferenzen bis zu einem gewissen Grad kompensiert werden. Trotz des Vorhandenseins umfangreicher Afferenzen werden motorische Kontrollvorgänge meist durch wenige afferente Signale dominiert, was u.a. auf eine physiologische Limitationen in der Informationsverarbeitung zurückzuführen ist (16, 23, 33). Vergleichbare Funktionen werden im Bereich der Kognitionspsychologie und Neurophysiologie durch die „Global-Workspace Theorie“ beschrieben (2). Für die vorliegende Studie könnte man hieraus ableiten, dass das Treatment eine Dominanzverschiebung afferenter Signale bewirkt (12, 14, 15, 23). Analog zur oben angeführten Argumentationslinie könnten die nach dem Trainingsreiz dominierenden Afferenzen zwar dazu geeignet sein, eine bessere Gleichgewichtsregulation zu bewirken, sich allerdings nicht eignen, um langsame Bewegungen hochpräzise zu reproduzieren.

Die Überschneidung der Sensitivitätsbereiche verschiedener Sensortypen impliziert ein gewisses Maß an Variabilität des afferenten Sets. Zielstellung der Testsituation war das Erreichen einer möglichst hohen Reproduktionsgenauigkeit, wobei es nahe liegt, dass sich diese Leistung durch eine möglichst geringe Variabilität im sensorischen Verhalten erreichen ließe. Dieser lineare Ansatz steht im Gegensatz zur Theorie der Stochastischen Resonanz (SR). Ausgehend von physikalischen Klimamodellen wurde die SR Theorie seit den 90er Jahren auf biokybernetische und neurophysiologische Fragestellungen angewendet und als eine elementare Funktionsweise des Nervensystems identifiziert und abgesichert (11). Im Gegensatz zu unserem üblichen Verständnis ist die Erfassungs- und Verarbeitungskapazität neuronaler Signale optimiert, wenn diese durch ein gewisses Maß an stochastischen Einflüssen charakterisiert werden. "In other words, increasing noise (increasing disorder) in the input may result in increasing order in the output. This seemly striking fea-

ture of nonlinear stochastic systems is termed as stochastic resonance (SR)” (39, S. 133). Grundlage der Resonanz stellt dabei die natürliche stochastische Charakteristik (Noise) der neuronalen Hintergrundaktivität dar, mit der Folge, dass schon geringe Reizintensitäten ausreichen, um ein überschwelliges afferentes Signal auszulösen. “Noise thus could play a major role in signal processing by CNS neurons [...]” (32, S. 1401). Verschiedene Studien zeigten, dass die Wahrnehmungs- und Verarbeitungsfähigkeit von repetitiven Signalen mit stochastischen Anteilen im Vergleich zu harmonischen Funktionen erheblich erhöht ist (20). Liu et al. sowie Wells und Mitarbeiter wiesen derartige Funktionsmechanismen bei jüngeren und älteren Personen wie auch bei Schlaganfall- und Neuropathiepatienten nach (18, 37). Andere Experimente identifizierten SR Phänomene in Muskel- und Hautrezeptoren, in der kortikalen Signalverarbeitung sowie als psychophysisches Verhaltenskorrelat (10, 11, 32, 35). Für die vorliegende Studie sind diese Funktionsmechanismen in zwei Aspekten bedeutsam. Zum einen ist eine Grundvariabilität im sensorischen Verhalten (z.B. muskulärer Afferenzen) sinnvoll, um ein schnelle Signalerfassung und -verarbeitung in der realen Anforderungssituation zu gewährleisten. Die Zielstellung, eine möglichst geringe sensorische Varianz zu erzeugen, um hohe Reproduktionsleistungen zu vollbringen, ist somit als artifiziell zu betrachten. Dieser Interpretationsansatz weist Parallelen zu der mehrfach vertretenen Theorie auf, dass die funktionale Bedeutung propriozeptiver Signale vor allem in der Kalibration interner Bewegungsmodelle liegt (6, 11). Aus diversen physikalischen Experimenten ist bekannt, dass sich das Kalibrationspotential mit einer weiteren Range der Referenzwerte erhöht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die vorliegende Studie keine Evidenzen oder Hinweise liefert, dass verbesserte koordinative Leistungen primär auf propriozeptive Veränderungen zurückgeführt werden können. Die Ausführungen von Aston-Miller und Co-Autoren - „Can Proprioception really be improved by exercise?“ - werden somit untermauert und eine weitere Verwendung des Begriffes „Propriozeptives Training“ erscheint fragwürdig (1). Im Gegensatz zu Anpassungen, die primär auf propriozeptiver Ebene ablaufen, erscheint es wahrscheinlicher, dass koordinative Verbesserungen durch eine optimierte Selektion und Gewichtung unterschiedlicher afferenter Signale (exterozeptive, propriozeptive, vestibuläre, visuelle etc.) erklärt werden können. Dementsprechend wären andere Begriffe wie bspw. „Sensomotorisches Training“ oder „Sensorisches Integrationsstraining“ zutreffender.

Unabhängig von der neurophysiologischen und motorischen Schlussfolgerung sollten allgemein bestehende untersuchungsmethodische Limitationen in der Messung von Propriozeption kritisch berücksichtigt werden.

Literatur

- Aston-Miller JA, Wojtys EW, Huston LJ, Fry-Welch D: Can proprioception really be improved by exercise? *Knee Surg, Sports Traumatol Arthrosc* 9 (2001) 128-136.
- Baars BJ: The conscious access hypothesis: origins and recent evidence. *Trends in Cognitive Neuroscience* 6/ 1 (2002) 47-52.
- Barrack RL, Skinner HB, Buckley SL: Joint proprioception in the anterior cruciate deficient knee. *Am J Sports Med* 17 (1989) 1-6.
- Barret DS: Proprioception and function after anterior cruciate reconstruction. *J Bone Joint Surg Br* 73 (1991) 833-837.
- Bloem BR, Allum JHJ, Carpenter MG, Honegger F: Is lower leg proprioception essential for triggering human automatic postural responses? *Exp. Brain Res* 130 (2000) 375-391.
- Bosco G, Poeppel RE: Proprioception from a Spinocerebellar Perspective. *Physiol Reviews* 81/2 (2001) 539-568.
- Dickinson J: Proprioceptive control of human movement. Lepsus, London, 1975.
- Ebersbach G, Sojer M, Müller J, Ransmayer G, Wenning G, Poewe W: Gleichgewichtsstörungen bei idiopathischer Parkinson-Erkrankung. *Nervenarzt* 73 (2002) 162-165.
- Fischer-Rasmussen T, Jensen PE: Proprioceptive sensitivity and performance in anterior cruciate ligament-deficient knee joints. *Scan J Med & Science Sports* 10 (2000) 85-89.
- Fallon JB, Carr RW, Morgan DL: Stochastic Resonance in Muscle Receptors. *J Neurophysiol* 91 (2004) 2429-2436.
- Gammaitoni L, Hänggi P, Jung P, Marchesoni F: Stochastic Resonance. *Rev Mod Physics* 1 (1998) 224- 287.
- Haas CT, Turbanski S, Kaiser I, Schmidtbleicher D: Biomechanische und physiologische Effekte mechanischer Schwingungsreize beim Menschen. *Dtsch Z Sportmed* 55/2 (2004) 34-43.
- Haas CT, Turbanski S, Kaiser I, Schmidtbleicher D: Effects of whole-body vibration on postural control in Parkinson's Disease. *Mov Disord* 19 Suppl. 9 (2004) 185.
- Haas CT, Turbanski S, Schmidtbleicher D: Neural and mechanical rhythms in rehabilitative balance training. *Isokinetics and Exercise Science* 12/1 (2004) 54-55.
- Haas CT, Turbanski S, Schmidtbleicher D: Zur Therapie von Gleichgewichtsstörungen bei nervalen Krankheitsbildern. *ZNS & Schmerz* 3 (2004) 18-20.
- Halford GS, Wilson WH, Phillips S: Processing capacity defined by relational complexity: implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behav Brain Sci* 21/6 (1998) 803-31.
- Laskowski ER, Newcomer-Aney K, Smith J: Refining Rehabilitation with Proprioception Training: Expediting Return to Play. *Phys Sportsmed* 25 / 10 (1997) 89-102.
- Liu W, Lipsitz LA, Montero-Odasso M, Bean J, Kerrigan DC, Collins JJ: Noise-Enhanced Vibrotactile Sensitivity in Older Adults, Patients With Stroke, and Patients With Diabetic Neuropathy. *Arch Phys Med Rehabil* 83 (2002) 171-176.
- Lönn J, Crenshaw AG, Djupsjöbacka M, Johansson H: Reliability of position sense testing assessed with a fully automated system. *Clin Physiol* 20/1 (1999) 30-37.
- Manjarrez E, Rojas-Piloni G, Méndez I, Amira F: Stochastic Resonance within the Somatosensory System: Effect of Noise on Evoked Field Potentials Elicited by Tactile Stimuli. *J Neuroscience* 15 (2003) 1997-2001.
- Nashner LM, Cordo PJ: Relation of automatic postural responses and reaction-time voluntary movements of human leg muscles. *Exp Brain Res* 43 (1981) 395-405.
- Norrie RG, Maki BE, Staines WR, McLroy WE: The time course of attention shifts following perturbation of upright stance. *Exp Brain Res* 146 (2002) 315-321.
- Popov KE, Kozhina GV, Smetanin BN, Shlikov VY: Postural responses to combined vestibular and hip proprioceptive stimulation in man. *Eur. J Neurosci* 11 (1999) 3307-3311.
- Quante M, Hille E: Propriozeption: Eine kritische Analyse zum Stellenwert in der Sportmedizin. *Dtsch Z Sportmed* 50/10 (1999) 306-310.
- Rankin J, Woollacott MH, Shumay-Cook A, Brown L: Cognitive influence on postural control stability: a neuromuscular analysis in young and elders. *J Gerontol* 55 (2000) M112-M119.
- Redferna MS, Müller MLTM, Richard Jennings J, Furman JM: Attentional Dynamics in Postural Control During Perturbations in Young and Older Adults. *J Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* 57 (2002) 298-303.
- Rickards C, Cody FWJ: Proprioceptive control of wrist movements in Parkinson's disease. *Brain* 147 (1997) 977-990.
- Roberts D, Ageberg E, Andersson G, Friden T: Effects of short-term cycling on knee joint proprioception in ACL-deficient knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 12 (2004) 357-363.

29. Sherrington CS: The integrative action of the nervous system. Yale University Press, New Haven, 1906 (wiederveröffentlicht durch Cambridge University Press 1961).
30. Smid HGOM, Hauser U, Weiler HT, Awiszus F, Hinrichs H, Heinze H-J: Brain potentials and behavioral responses associated with attention to hard- and easy-to-discriminate passive knee joint movements. *Psychophys* 41 (2004) 489-500.
31. Söderman K, Werner S, Pietilä T, Engström B, Alfredson H: Balance board training: prevention of traumatic injuries of the lower extremities in female soccer players? A prospective randomized intervention study. *Knee Surg, Sports Traumatol, Arthrosc* 8 (2000) 356-363.
32. Stacey WC, Durand DM: Stochastic resonance improves signal detection in hippocampal CA1 neurons. *J Neurophysiol* 83 (2000) 1394-1402.
33. Tunik E, Poinzner H, Levin MF, Adamovich SV, Messier J, Lamarre Y, Feldman AG: Arm-trunk coordination in the absence of proprioception. *Exp. Brain Res* 153 (2003) 343-355.
34. Turbanski S, Haas CT, Schmidbleicher D: Effects of random whole-body-vibration on postural stability in Parkinson's Disease. *Research in Sports Medicine* 13/3 (2005) 243-256.
35. Ward LM, Neiman A, Moss F: Stochastic Resonance in psychophysics and animal behaviour. *Biol Cybern* 87 (2002) 91-101.
36. Wilke C, Froböse I: Quantifizierung propriozeptiver Leistungen von Kniegelenken. *Deut Z Sportmed* 54 (2003) 49-54.
37. Wells C, Ward LM, Chua R, Inglis JT: Touch Noise Increases Vibrotactile Sensitivity in Old and Young. *Psychological Science* 16/4 (2004) 313-320.
38. Yasuda T, Nakagawa T, Inoue H, Iwamoto M, Inokuchi A: The role of the labyrinth, proprioception and plantar mechanosensors in the maintenance of an upright posture. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 256 (1999) 27-32.
39. Xiao J, Hu G, Liu H, Zhang Y: Frequency sensitive stochastic resonance in periodically forced and globally coupled systems. *Eur Phys J B* 5, 1998, 133-138.

Korrespondenzadresse:

Dr. Christian T. Haas
Institut für Sportwissenschaften
J.W. Goethe-Universität Frankfurt am Main
Ginnheimer Landstr. 39
60487 Frankfurt
e-Mail: c.haas@sport.uni-frankfurt.de