

Thomas Gisler-Hofmann

medibalance, Luzern

Plastizität und Training der sensomotorischen Systeme

Lernen durch Wiederholung ohne Wiederholung

Zusammenfassung

Propriozeptive Trainingsformen haben in der Prävention einen hohen Stellenwert. Dieser Stellenwert beruht in der therapeutischen Praxis auf der häufig vertretenen Modellvorstellung, propriozeptive Trainingseffekte würden einem einfachen kybernetischen Regelkreis entsprechen, d.h. eine verbesserte Propriozeption verbessert eine frühere Wahrnehmung gefährlicher Gelenkstellungen, wodurch die Möglichkeit von kompensatorischen Muskelkontraktionen bestünde. Obwohl sich posttraumatisch zahlreiche propriozeptive Funktionsdefizite feststellen lassen, stellen verschiedene neuere Studien die häufig angenommene enge und quasi exklusive Kausalität zwischen propriozeptiver Erfassung und neuromuskulärer Steuerung in Frage. Da die Integration multimodaler Afferenzen – bedingt durch die meist ballistische Charakteristik von Verletzungen – jeweils innerhalb von kurzen Zeitfenstern erfolgen muss, bestehen hohe Anforderungen an die Informationsverarbeitungsvorgänge. Erkenntnisse über die neuronalen Zusammenhänge belegen die Interaktion der verschiedenen Sensorsysteme, deren sensorische Variabilität, deren enormen Plastizität und Kapazität der reizverarbeitenden zentralnervösen Areale sowie der motorischen Kompetenzen. Dabei wird offensichtlich, dass spinale, supraspinale und kortikale Zentren eine übergeordnete Position einnehmen, die bei uneingeschränkter Sensorik mit hoher Geschwindigkeit präzise motorische Ergebnisse produzieren. Doch genau diese Geschwindigkeit und Präzision muss durch repetitives Üben stetig erarbeitet und bewahrt werden. Betrachtet man nun aber aufgrund der neuronalen Komplexität die etablierten, etwas habituellen Interventionen, dominieren einerseits Applikationen, die den interaktiven Vorgängen und Zusammenhängen nicht ganz entsprechen oder gelegentlich destruktiv wirken; andererseits scheinen oftmals die hohen technischen, bewegungs- und gelenkübergreifenden Ansprüche und die dermassen determinierten variablen Reizkonfigurationen zu wenig bekannt zu sein. Forschungsergebnisse führen zu Erkenntnissen, dass sensomotorische Trainingsmassnahmen zu neuronalen Anpassungen führen, welche die koordinativen Voraussetzungen zur Kontrolle der bewegten Gelenke verbessern können.

Abstract

Proprioceptive training has an important role in prevention. This important role is based on the idea that proprioceptive training effects follow a simple regulation, i.e. improved proprioception improves the sensitivity for dangerous joint angles with the possibility to intervene in time avoiding an injury. New studies question the close relationship between proprioception and neuromuscular steering. The integration of multinodal afferences must occur within a short time period due to injuries, which means a high demand on the integration of information. Knowledge about neuronal interrelations shows the interreactions of different sensor systems with its variability, plasticity, capacity in processing nervous impulses, and motor competences. From this, it becomes obvious that spinal, supraspinal, and cortical centers dominate and produce precise motor results with a high speed provided that the sensory system is intact. This high speed and precision must be conserved by regular exercise. Considering the neural complexity, the normally applied intervention seem not quite adequate or even harmful. In addition, the appropriate intervention after injury are not well known, which would satisfy the complex motor control. Research results show that correct sensomotor exercise leads to neural adaptation improving the coordination and movement of muscles and joints.

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 56 (4), 137–149, 2008

Einleitung

Im Bereich der Rehabilitation, aber auch in der Prävention, kommt dem Training der Propriozeption traditionell eine hohe Bedeutung zu (Aston-Miller et al., 2001; Schmidt et al., 2005; Soderman et al., 2000; Verhagen et al., 2004). Versucht man propriozeptive Leistungen physiologisch zu spezifizieren, so ergibt sich ein heterogenes Bedeutungsverständnis und meist unscharfe Abgrenzungen gegenüber sensomotorischen oder koordinativen Leistungen. In Anlehnung an verschiedene Arbeiten versteht man unter Proprio-

zeption die Fähigkeit, Zustand und Veränderung von Gelenkwinkeln zu erfassen und Bewegungen wahrzunehmen (*siehe 1.2*). Es sind also sensorische Leistungen und diese besitzen ausschliesslich eine informative Aufgabe.

Nach heutigem Wissensstand und in Anbetracht der nachfolgend beschriebenen Komplexität der sensomotorischen Systeme erscheint die Konzentration lediglich auf eine sensorische Modalität reduzierte Sicht und Intervention (propriozeptives Training) doch mehr als fraglich. Verschiedene Studien (Haas et al., 2004, 2005, 2006b; Lephart et al., 2000) konnten nämlich keine Hin-

weise auf propriozeptive Modifikationen identifizieren. Auch eine Vergleichsstudie zwischen gesunden Personen und Patienten mit Polyneuropathie zeigt, dass posturale Kontrollprozesse nicht über ein einfaches propriozeptives Feedback und entsprechende Reflexmechanismen getriggert werden (Bloem et al, 2000). Eine weit grössere Bedeutung müssen daher komplexeren Korrekturmustern und funktionalen Synergien zugeordnet werden, die zudem Inputs aus verschiedenen sensorischen Afferenzen beinhalten.

Allerdings zeigen posttraumatische Analysen (Aston-Miller et al., 2001; Fischer-Rasmussen und Jensen, 2000) schlechtere Reproduktionsleistungen und erhöhte Bewegungswahrnehmungsschwellen auf der lädierten Seite. Für die Beeinträchtigung der Propriozeption durch Verletzung sprechen Studien, die verschiedene Mechanorezeptoren und freie Nervenendigungen in der Bandstruktur identifizieren konnten, die wahrscheinlich durch die Läsion massiv mitgeschädigt wurden (Goertzen et al., 1993; Haus et al., 1992; Jimmy und Wink, 1991). Beim Schmerzgeschehen ohne Läsionen bleiben die propriozeptiven Leistungen erhalten; die Nozizeptoren sind jedoch entsprechend hyperaktiv, d.h. die zusätzliche Wahrnehmung führt zu einer anderen Verarbeitung im Zentralnervensystem mit anders determinierten neuromuskulären Leistungen.

Funktionelle Bewegungserfolge – seien sie intrinsisch oder lokomotorisch – haben gemeinsam, dass spinale, supraspinale und/oder kortikale Areale aktiviert werden müssen. Obwohl betont werden muss, dass diese Areale funktionell eine Einheit bilden, zeigt sich je nach Aufgabe und Antwort eine segmentale Lösungspriorität. So benutzen Körperhaltung, Lokomotion und die artikuläre Kinästhesie eine spinale und supraspinale Modulierung, während die Willkürmotorik und neue Bewegungsmuster kortikal geplant, programmiert und modifiziert werden.

1. Sensomotorische Systeme

Das einwandfreie Arbeiten motorischer Systeme ist unter anderem von Informationen über die Vorgänge in der Peripherie abhängig. Hierfür sind sensomotorische Meldungen verantwortlich, die Körperhaltung und Bewegung grösstenteils selbst hervorrufen. Die enge Verknüpfung von sensorischen Meldungen und motorischen Befehlen findet ihren Ausdruck in der zusammenfassenden Bezeichnung Sensomotorik.

1.1 Exterosensorik – Informationsebene (Affferenz)

Die exterozeptive Sensibilität umfasst die gesamten neuralen Strukturen für die Aufnahme und Weiterleitung von Informationen aus der Umwelt zum Zentralnervensystem.

Exterozeptive Quellen sind:

- Visuelle Sensorik (Bewegung, Entfernung, Lagebeziehungen von Objekten usw.)
- Vestibulärapparat (Gleichgewichts- und Bewegungssinn)
- Akustische Sensorik (Lage und Richtung der Schallquellen)
- Tast- und Drucksensoren
- Geruchs- und Geschmackssensoren
- Thermorezeptoren

1.2 Propriozeption – Informationsebene (Affferenz)

Kann als Tiefensensibilität oder kinästhetische Sensibilität bezeichnet werden.

Gelenkrezeptoren

- Mechanorezeptoren (Typ I – II – III)
- Nozizeptoren

Muskel- und Sehnenrezeptoren

- Muskelspindeln
- Golgi-Sehnenkörperchen
- Gamma-System
- Mechanorezeptor Typ III
- Nozizeptoren

1.3 Zentralnervöse Leistungen – Verarbeitungsebene

Der Ort, wo Signale aus den sensorischen Systemen selektiv gefiltert, segmentiv verarbeitet und möglichst präzise moduliert werden, um anschliessend als efferente Antworten in der Peripherie wirksam zu werden.

Kortikale willkürliche Verarbeitung / Modulierung und Modifikationen.

Supraspinale sowie spinale Verarbeitung / Modulierung / Regulation von Automatismen und Reflexen.

1.4 Koordinative Leistungen – Ausführungsebene (Efferenz)

Das Mass für das Zusammenspiel der Muskeln.

Die Funktionskomplexe sind:

- Die Haltungs- oder Stützmotorik (Kinästhesie)
- Die Zielmotorik → Bewegungen (Kinesie)

1.5 Sensomotorische Leistungen – Informations-, Verarbeitungs- und Ausführungsebene

Der alles umfassende Funktionskomplex, nämlich: Sensorische Information, Verarbeitung im Zentralnervensystem, motorische Kompetenz (Abb. 1). Die Leistung der gesamten Sensomotorik kann als Summe der Einzelsysteme aufgefasst werden, die phylogentisch unterschiedlich alt sind und unterschiedliche Teilaufgaben übernehmen. Dabei interagieren und überlagern sich diese Einzelsysteme, um eine effektive Anpassung an die jeweiligen Bedürfnisse zu ermöglichen.

Spinale und supraspinale Reflexantworten

- Modulation der Halte- bzw. Stützmotorik (Stabilitäts- und Gleichgewichtsaufgaben)
- Gelenkführungsaufgaben (Gelenkkontrolle)
- Bewegungs- und Lagesinn (Orientierung im Raum)
- Motorische Programme (u.a. Bewegungsautomatismen, Feinmotorik)
- Feedback über die Ergebnisse der interneuronalen multisensorischen Konvergenz (Kontrolle motorischer Kommandos sowie der Bewegungserfolge)

Kortikale Verarbeitung

- Willkürliche Ausführung von Bewegungen (Willkürmotorik)
- Modulierung von neu zu erlernenden Bewegungsmustern (Planung und Programmierung der Zielmotorik)
- Kontrolle und Modifizierung von Bewegungen während deren Ausführung

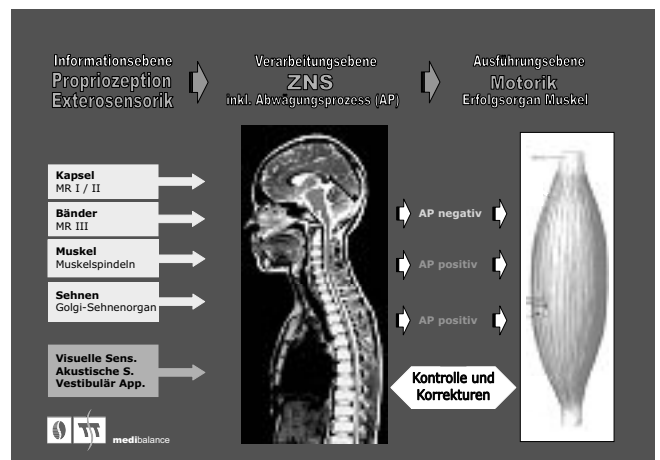


Abbildung 1: Die sensorischen Systeme (links), die verarbeitenden zentralnervösen Areale Gehirn und Rückenmark (Mitte) und das Erfolgsorgan Muskel (rechts). (Gisler, medibalance, Luzern.) (Abb. farbig siehe Titelseite dieser Ausgabe)

2. Plastizität und Training der sensomotorischen Systeme

Im Verlaufe des Lebens kristallisieren sich bei jedem Menschen bestimmte Bewegungsmuster heraus, die durch ihr repetitives Vorkommen gebahnt und optimiert werden. Aus arthroneuromuskulärer Sicht erkennen wir, dass eine Bewegung nie genau ganz gleich durchgeführt wird, selbst wenn es Routinebewegungen mit vermeintlich denselben Mustern sind. In der Konsequenz bedeutet dies, dass die Modulierung einer Bewegung jeweils einen gewissen kalkulatorischen Aufwand erfordert, weil motorische Anforderungssituationen immer ein gewisses Mass an Varianz und Ungewissheit beinhalten. Gleichzeitig gibt es im Alltag und vor allem im Sport zahlreiche Situationen, in denen die Verarbeitungsprozesse sehr schnell und trotzdem präzise funktionieren müssen. Die wesentliche Anforderung besteht einerseits darin, dass bestimmte, an die äusseren Bedingungen angepasste Reflexgrössen notwendig sind, um flüssige und sichere Bewegungsergebnisse zu generieren; andererseits müssen diese Vorgänge in extrem kurzen Zeitspannen ablaufen. Normalerweise funktioniert dies über Erfahrungswerte, die jedoch durch Reizmangel, vor allem aber durch Verletzungen und Erkrankungen gestört sein können. Durch gezielte, aber möglichst variable Trainingsanforderungen kann das Reflexverhalten optimiert werden.

2.1 Sensomotorisches Training und neuromuskuläre Leistung

Aus belastungs- und neurophysiologischer Sicht erscheinen Situationen, in denen ein hohes Verletzungsrisiko besteht, vor allem durch zwei Aspekte geprägt zu sein: Zum einen sind ballistische Bewegungsmuster charakteristisch, sodass eine bewusste, willkürliche Einleitung muskulärer Korrekturmassnahmen unwahrscheinlich ist (Norrie et al., 2003; Rankin et al., 2000; Redferna et al., 2002). Zum andern bedingt der Risikostatus der Situation, dass funktionale feedforward Mechanismen, die eine grosse Bedeutung insbesondere für die posturale Kontrolle haben, ausbleiben oder fehlerhaft sind. Dementsprechend besteht eine Situation, die nicht antizipiert wurde, jedoch gleichzeitig komplexe Korrekturmehanismen erfordert, welche innerhalb von kurzen Zeitfenstern ablaufen müssen. Die Folge sind hohe Anforderungen an die Informationsverarbeitungskapazität.

Der Mensch verfügt dafür über ein sehr komplexes System, bei dem zahlreiche externe und interne Faktoren eine Rolle spielen (Boden et al., 2000; De Morat et al., 2004; Liu und Maitland, 2000). So werden beispielsweise Körperpositionen im Raum nicht nur durch propriozeptive Rückmeldungen erfasst, sondern auch durch die Interaktion verschiedener Sensorsysteme, wobei die Interaktionsstruktur variabel ist.

Bezüglich der arthroneuromuskulären Situation verfügt der Mensch über eine redundante und miteinander gekoppelte Anzahl an Freiheitsgraden, weshalb ein motorisches Ziel über unterschiedliche Gelenkwinkelkonfigurationen erreicht werden kann (Tunik et al., 2003). Hieraus lässt sich ableiten, dass die Beanspruchung einer Struktur – so zum Beispiel die auf das vordere Kreuzband wirkenden Kräfte – sowohl durch eine Bewegung im Kniegelenk verändert werden kann, als auch durch Bewegungen in Sprung- oder Hüftgelenk. Dies bewirkt eine Modifikation der Hebelverhältnisse und eine Verlagerung von Teilmassen (Li et al., 1999; Liu und Maitland, 2000; Tunik et al., 2003). Die dynamische Nutzung der Freiheitsgrade führt zu einer beständigen, variablen und zum Teil sehr praxisnahen neuronalen Unruhe (Noise), deren Signale zu einer erhöhten Adaptationsfähigkeit im Zentralnervensystem führen. Dieses Nichtlinearitäts-Phänomen stellt den Anknüpfungspunkt der Stochastischen-Reiz-Theorie dar (Gammaitoni et al. 1998). Variable sensomotorische Übungen – die von ihrer Charakteristik dem nichtlinearen Prinzip entsprechen – sind möglicherweise in ihrer Wirkung noch höher einzustufen, wenn die funktionelle Beanspruchung eines Systems durch zusätzliche Applikation von Störgrössen (Noise) überlagert wird.

Die Neuigkeit (nicht antizipiert) stellt eine grosse prozessuale Anforderung dar. Eine Möglichkeit, diese Anforderungen zu re-

duzieren, besteht in einer Segmentation der Reize in verarbeitbare Komponenten. Trainierbar dürfte diese sensomotorische Kompetenz vor allem dadurch sein, dass beständig Situationen generiert werden, die nur gering antizipierbar sind und dementsprechend Anforderungen an die spinale, supraspinale und kortikale Verarbeitung und somit an die Segmentation stellen. Weniger geeignet erscheinen sehr harmonische Bewegungsformen, wie zum Beispiel das einfache Stehen auf einem Therapiekreisel (Abb. 2). Verschiedene Autoren (Söderman et al., 2000; Verhagen et al., 2004) konnten belegen, dass das einfache Stehen auf einem Balance Board bzw. Therapiekreisel zwar einen positiven Einfluss auf die Sprunggelenkfunktion aufweist, sich jedoch kontraproduktiv auf die funktionelle und verletzungspräventive Kniegelenkkompetenz auswirkt (so zum Beispiel 4 von 5 Kreuzbandrupturen in der Interventionsgruppe).

2.2 Neuronale Komplexität im sensomotorischen Training

Die Fusssohle spielt für den Stand, für die Wiedergewinnung des Gleichgewichts und die Fortbewegung eine wichtige Rolle (Kennedy und Inglis, 2002). Plantare sensorische Inputs sind in der Lage, Bewegungsmuster des Gehens und Laufens zu verändern, die Wahrnehmung der Fussposition bezüglich Unterschenkel und Unterlage zu optimieren (Chen et al., 1995; Robbins et al., 1995), und sie verbessern sogar die Gesamtkörperkoordination. Im Gegensatz dazu, zeigt sich bei neurodegenerativen Krankheiten, wie z.B. Morbus Parkinson und Multiple Sklerose, unter anderem auch eine starke Einschränkung plantarer sensorischer Fähigkeiten (Prätorius et al., 2003). Speziell in diesem Zusammenhang ist nochmals anzufügen, dass harte, nicht anpassbare Unterlagen (Balance Board, Therapiekreisel usw.) weder im Sport noch in der Therapie zwingend zu den bevorzugten Hilfsmitteln zählen sollten, da sie eine wesentliche Reizaufnahme nicht optimal nutzen (Abb. 2).

Eine Arbeit von Zazulak et al. (2007) bestätigt eine weitere intermuskuläre Komplexität und Wirkung der sensomotorischen Systeme und damit die synergistischen Einflüsse dezentralisierter Körperregionen auf das dynamische Geschehen in einem lokalen Gelenksystem. Sie untersuchten die Propriozeption des Rumpfes bei Athleten im Zusammenhang mit deren Knieverletzungen. Die Studienergebnisse geben Anlass zur Annahme, dass eine verminderte Rumpf-Propriozeption die dynamische Kniestabilität beeinträchtigt. Vor allem bei den Frauen, die eine ungenügende aktive und passive propriozeptive Repositionierung des Rumpfes aufweisen, stieg für jedes Grad fehlerhafter Repositionierung das Risiko für Knieverletzungen signifikant an. Vorhersagen über Verletzungswahrscheinlichkeiten gelangen den Autoren mit einer Sensitivität von 90% und einer Spezifität von 60% für Knieverletzungen und 86% bzw. 61% für Bänder-/Meniskus-Verletzungen bei den Frauen.

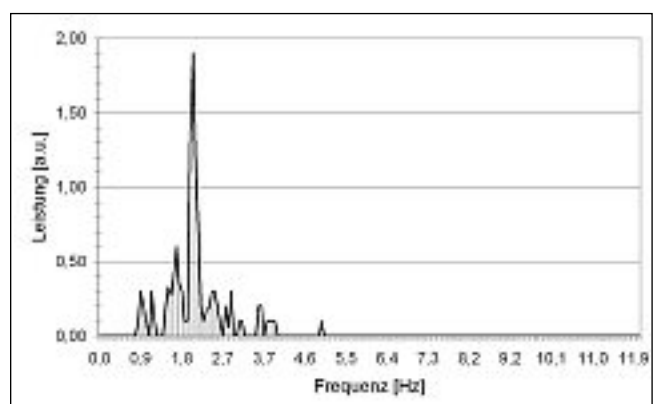


Abbildung 2: Power-Spektrum des einbeinigen Stehens auf einem Therapiekreisel. Auffällig ist vor allem ein relativ scharfer und niederfrequenter dominanter Peak (= 2,1 Hz). Dementsprechend variiert das Schwankungsmuster wenig und die Korrekturzeiträume sind eher lang, wodurch das präventive Potenzial reduziert wird. (Institute of Sport Sciences, J.W. Goethe-University Frankfurt.)

Andere biomechanisch assoziierte Merkmale belegen beim sensomotorischen Training (SMT) die Beachtung gelenkachsenspezifischer Dimensionen, die mono- oder pluriartikulär unterschiedliche, aber wichtige Reizansprüche stellen (eigene, unpublizierte Daten). So ist es beispielsweise notwendig, dass sensomotorische Interventionen/Übungen je nach Gelenktypus eine selektiv sagittale, frontale oder rotatorische Kinematik aufweisen oder dass sie sogar nach einer achsenverbindenden Dynamik verlangen. In der Praxis kann dies bedeuten, dass in der Therapie je nach Bedarf sensomotorische Verbesserungen selektiv monoartikuläre Ziele verfolgen und erst noch bewusst nur eine Bewegungsachse beanspruchen. In der subakuten Therapiephase, speziell aber hinsichtlich einer funktionellen Alltags- und Sportkompetenz, ist hingegen eine komplexere achsenverbindende Bewegungs- und Kontrolldimension gefragt, die sich sowohl auf ein bestimmtes Gelenk beziehen kann, als auch pluriartikulär übergreifend wirksam werden soll.

2.3 Zentrale neuronale Kooperationen

Gruber und Gollhofer (2004) konnten durch SMT in einer 4-wöchigen Untersuchung, in der sie die spinale (H-Reflex) sowie supraspinale Erregbarkeit (H/M-Ratio) bestimmten, zeigen, dass sich die Standsicherheit verbesserte. Während für die Reduktion der H/M-Ratio eine erhöhte präsynaptische Inhibition als Ursache wahrscheinlich ist, wird die Reduktion der konditionierten H-Reflexe auf einen verminderten motorkortikalen Antrieb zurückgeführt. Sie folgerten, dass die durch SMT erzielten Bewegungsautomatismen dazu führen, dass die Bewegungskontrolle von kortikalen auf vermehrt cerebellare und subkortikale Zentren übergeht. Supraspinale Zentren projizieren über absteigende Bahnen einerseits direkt auf den Motoneuronenpool, andererseits regulieren sie periphere Reflexbahnen über im Rückenmark lokalisierte Interneurone. Damit sind die Neuronenverbände in der Lage, Reflexe zu bahnen oder zu hemmen, sowie den Aktivierungszustand von Motoneuronen direkt zu beeinflussen.

Interessanterweise deuten auch die bisher durchgeführten Trainingsstudien auf eine aufgabenspezifische Anpassung supraspinaler Zentren hin. Bei einer posturalen Aufgabe waren direkte kortikospinale Bahnen beim SMT gehemmt, während sie bei einer willkürmotorischen Aufgabe gebahnt waren.

3. Adaptive Relevanz der sensomotorischen Systeme

Wie sich unser Nervensystem ausprägt, ist unter anderem davon abhängig, welchen Anforderungen es ausgesetzt wird. Es weist ein besonders hohes Mass an Plastizität (strukturell und im Sinne der Lernfähigkeit) auf – ein Charakteristikum für die Hauptaufgabe des Nervensystems, nämlich auf sensorische Inputströme flexibel zu reagieren und daraus zu lernen. Für anspruchsvolle, posturale Aufgaben könnte es bereits nach 4 Wochen zu einer Automatisierung der sensomotorischen Antwort und in der Folge zu einer Auslagerung der motorischen Kontrollfunktion auf subkortikale Strukturen kommen, wie zum Beispiel die Basalganglien oder das Kleinhirn. Gleichzeitig scheint daraus eine verstärkte Kontrolle der spinalen Reflexkontrolle zu resultieren. Die besondere Plastizität des Nervensystems basiert also auf verschiedenen Kompetenzen und Mechanismen, die nachfolgend kurz beschrieben werden:

3.1 Sensorik / Rezeptoren

Nach heutigem Wissensstand ist weder die Exterosektorik noch die Propriozeption trainierbar. Eine Ausnahme bildet das Gamma-System. Die Empfindlichkeit der Muskelspindeln hängt in erster Linie von ihrem Spannungszustand ab, und dieser unterliegt über absteigende Bahnen der zentralen Kontrolle des Gehirns und kann so moduliert werden. Grundsätzlich sind die supraspinalen Zentren in der Lage, über die Regulation des Grundtonus der intrafusalen Fasern die Reaktionsfähigkeit der Muskulatur zu steigern, zu senken oder gar ganz zu unterdrücken.

3.2 Neuronale Anpassung im Zentralnervensystem

3.2.1 Neubildung von Nervenzellen

Der Zusammenhang zwischen Bewegungsreizen und dem Überleben sowie der Neubildung von Nervenzellen ist ein zentraler und bisher zu wenig beachteter Mechanismus. Wird eine Nervenzelle über einen längeren Zeitraum nicht gereizt, verliert sie ihre Funktionsfähigkeit. Bei ausreichender Aktivität werden sogenannte neurotrophe Faktoren freigesetzt, die der Degeneration und dem Funktionsverlust von Nervenzellen entgegenwirken, sowie für die Verknüpfung von neuen Nervenzellverbänden sorgen.

Körperliche Aktivitäten, speziell SMT, sind wichtig für die fortlaufende Genexpression neurotropher Faktoren für Neuroplastizität und Gehirngesundheit (Cotman und Berchold, 2002; Hollmann et al., 2003). Ergebnisse aus Tierversuchen sprechen dafür, dass sich nur dann physiologische Konzentrationen dieser Substanzen einstellen, wenn ein Mindestmass an körperlicher Aktivität garantiert war. Die mit verstärkter Neurogenese einhergehende ausgeprägte BDNF-Expression im Hippocampus war das konsistenteste Ergebnis dieser Untersuchung. Neurogenetische Prozesse und die gesamte Neuroplastizität werden in erster Linie durch BDNF moduliert (Berchold et al., 2002; Carro E., 2000). Die verstärkte Genexpression neurotropher Faktoren setzte nach 2–7 Tagen ein und hielt auch nach Beendigung des Versuches mehrere Tage an (Berchtold et al., 2001; Cotman und Berchtold, 2002; Cotman und Engesser-Cesar, 2002).

Entscheidend für die Qualität und Quantität dieser Vorgänge ist die regionale Gehirnaktivität. Sie modifiziert ständig das Netzwerk der Neuronen. Die Information aus der Körperperipherie lässt Repräsentationsareale im Kortex entstehen. Veränderungen des Informationsflusses in einem gegebenen Bereich der kortikalen Karte durch vermehrte oder verminderte periphere muskuläre Beanspruchung führen zur Reorganisation der Karte. Bei sehr starken, weitgehend identisch durchgeführten muskulären Leistungen, wie SMT, können benachbarte Repräsentationsareale im Kortex bis zu 1 cm ausgedehnt werden (Elbert et al., 1995).

3.2.2 Dendritenbildung

Die plastische Eigenschaft der Dendriten ist sehr gross und diese sind als anatomische Veränderungen sichtbar (sogenannte dendritische Dornen). Sie wachsen ganz gezielt auf mögliche Kontaktpartner zu (Abb. 3a, 3b). So kann das Wachstum von Dendriten der Pyramidenzellen des Kortex durch äussere Reize beeinflusst werden. Unabhängig dafür sind sensorische und motorische Erfahrungen, die eine Stimulation für die Dendritenbildung darstellen. Umgekehrt führen das Fehlen von sensorischen Reizen, wie Druck, Berührung, Vibration, Gleichgewichtsreize, visuelle sowie akustische Reize nachweisbar zur Atrophie der Dendriten (Abb. 3c, 3d). Innerhalb der ersten 8 h können jedoch über keiner dieser neu entstandenen Zellkontakte Informationen ausgetauscht werden. Erst in den darauffolgenden Stunden entscheidet sich, ob eine Verbindung bestehen bleibt oder sich zurückbildet. Die Kontakte, welche auch nach 24 h noch vorhanden sind, besitzen voll funktionsfähige Synapsen, und haben eine gute Chance, auch nach mehreren Tagen oder Wochen noch zu existieren (Engert und Bonhoeffer, 1999). Weiter führen bereits eine niedrige Frequenz und damit eine einhergehende Abschwächung der Synapsen zum Verschwinden dieser Dornen. Abgeleitet von diesen speziellen plastischen Vorgängen könnte möglicherweise eine zentrale Bedeutung von der, in der Anfangsphase hohen Dichte sensomotorischer Stimulationen ausgegangen werden, d.h. adäquat intensive und relativ häufige Reize in den ersten Tagen und Wochen.

3.2.3 Neurobiologische Mechanismen

Ein Teil des Gehirns reagiert bei neuen, nicht vorhersehbaren Anforderungen – wie sie gut konzipierte sensomotorische Übungen beinhalten – mit der Freisetzung von Neurotransmittern, wie z.B. Dopamin und dem Botenstoff Munc-13. Munc-13 spielt beim Priming (Verbesserung der Fusionsfähigkeit in der Synapse) eine entscheidende Rolle (Abb. 4). Ohne Munc-13 findet kein Priming statt und folglich kommt es auch nicht zur Ausschüttung von Bo-

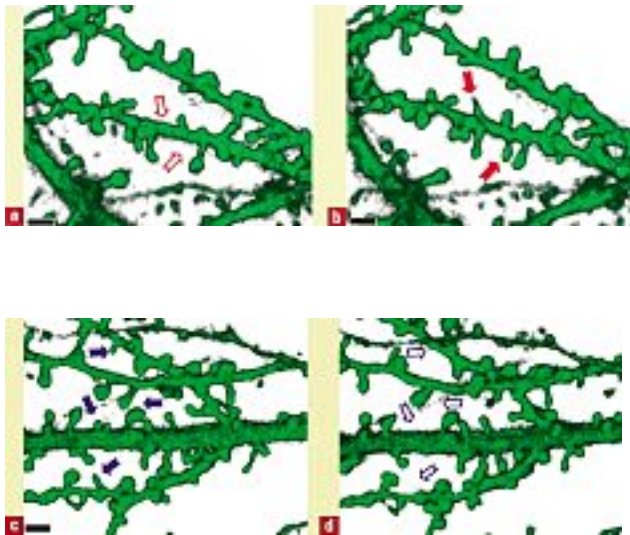


Abbildung 3: a und b: Intensive Stimulation führt zur Bildung dendritischer Dornen an den Nervenzellen (rote Pfeile im Teilbild b). c und d: Bei niedriger Reizfrequenz kommt es zur Rückbildung von Dornen (blaue Pfeile im Teilbild d). (Max-Planck-Institut für Neurobiologie.)

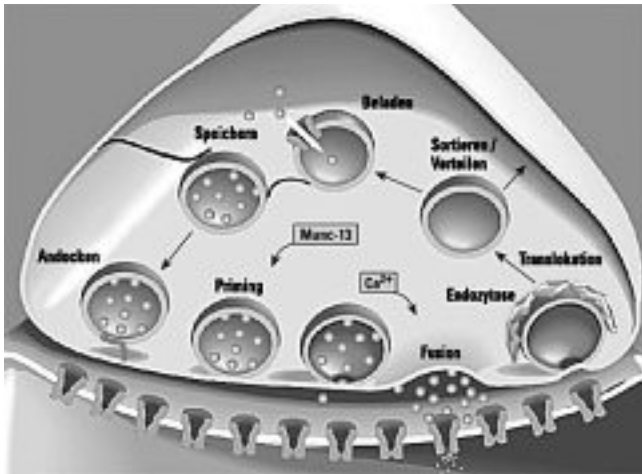


Abbildung 4: Vesikelzyklus in der Synapse verändert. Sichtbar wird, wo Munc-13 in den Vesikelzyklus eingreift und dadurch die Fusion möglich macht. (Max-Planck-Institut für Neurobiologie.)

tenstoffen (Augustin et al. 1999). Tatsächlich wird Munc-13 durch die Aktivität von Nervenzellen so reguliert, dass der Nachschub an Vesikeln dem jeweiligen Bedarf angepasst werden kann: Ist die Zelle sehr aktiv, werden durch das Protein viele neue freisetzbare Vesikel nachgeliefert, ist sie still, wird auch die Aktivität des Proteins herunterreguliert. Der Vorteil der chemischen Übertragung besteht darin, dass dadurch die Übertragungsstärke der Synapse, d.h. die Effizienz, mit der ein Aktionspotenzial in der sendenden Nervenzelle die Empfängerzelle erregt, verändert werden kann. Neurobiologen gehen davon aus, dass diese synaptische Plastizität die Grundlage für Lern- und Gedächtnisprozesse ist.

Ferner werden weitere diverse biochemische Vorgänge – z.B. die Freisetzung von Wachstumshormonen – als leistungsfördernde Effekte erwähnt. Diese biochemische Stimulation tritt vor allem dann auf, wenn Krafttraining mit einem hohen Anteil sensomotorischer Reize koexistent ist (Elbert et al., 1995; Haas et al., 2006b; McCall et al., 2000). Allerdings fanden McCall und Co-Autoren (2000) noch kontroverse, biochemische Antworten in Abhängigkeit des Reiztransfers auf den Agonisten bzw. Antagonisten.

Sensomotorische Lernprozesse sind immer auch von strukturellen, neurologischen Veränderungen begleitet, d.h. repetitive Reize verändern die innere Struktur. So lässt sich eine Verbreiterung der synaptischen Endköpfchen, eine Verzweigung der Fa-

serenden und eine veränderte biochemische Struktur der Neurone nachweisen.

3.3 Neuromuskuläre Plastizität

Das Nervengewebe hat ein gewisses Regenerationsvermögen. Wenn ein Motoneuron degeneriert, findet ein Sprouting (Aufzweigung) der Nervenendigungen von benachbarten Motoneuronen statt. Auf diese Weise können Muskelabschnitte, die von dem degenerierten Motoneuron versorgt sind, durch Aufzweigung benachbarter Motoneurone weiter genutzt werden. Dies geht allerdings auf Kosten der ursprünglichen Feinabstimmung. Motoneurone – besonders der tonischen Muskulatur – sind, was ihren Stoffwechsel betrifft, an eine hochfrequente Aktivität angepasst. Das intermittierende Vorkommen hochfrequenter Reize ist für die Qualität und Funktion der Motoneurone essenziell.

In den Mitochondrien, den Kraftwerken in den Muskelfasern, lassen sich unter anderem durch sensomotorische Reize die Alterungsvorgänge derselben wesentlich verlangsamen (Melov et al., 2007). Physiologisch gesehen, ist der kontraktile Teil der Muskulatur nicht in der Lage, so schnell zu kontrahieren, wie die Geschwindigkeiten – welche bei bestimmten Bewegungen funktionell gemessen werden – vermuten lassen. Die fehlende Kontraktionsgeschwindigkeit lässt sich durch eine perfekte intra- und intermuskuläre Koordination sowie der Ausnutzung elastischer Komponenten der Muskulatur ausgleichen (Gisler 2007b). Neben der funktionellen Kompetenz sind die Ergebnisse im Erfolgsorgan Muskel schliesslich auch von dessen struktureller Qualität abhängig.

3.4 Sensomotorisches Lernen

SMT verbessert das sensomotorische Lernen durch Optimierung der sensorischen Selektion, durch Verbesserungen der Informationsverarbeitung im Zentralnervensystem und durch komplexe Funktionsverbesserungen der interagierenden, sensomotorischen Leistungen (siehe 1.5). Auch hier gilt das Prinzip der Äquivalenz: je mehr die Übungssituation dem echten Anspruch ähnelt, desto leichter lässt sich das Gelernte transferieren.

4. Durch neuronale und leistungsphysiologische Adaptationen determinierte Anwendungsbereiche

- a) Die intensivierte sensorische Wahrnehmung kann auf der Ebene eines einzelnen Gelenksystems dazu führen, dass die Qualität der destabilisierenden Reize besser erkannt und adäquater beantwortet wird, wodurch die Fähigkeit zur aktiven Stabilisierung sowie der Bewegungskontrolle in diesem Gelenk optimiert wird. Dadurch prädestiniert sich SMT für die Anwendungsbereiche Prävention, Therapie und Rehabilitation.
- b) Die intensive, sensorische Rückmeldung und deren Verarbeitung haben zur Folge, dass die Ansteuerung der Muskulatur – im Sinne einer verbesserten lokalen, intermuskulären und Ganzkörper-Koordination optimiert werden kann. Damit drängt sich SMT zunehmend in den Massnahmenkatalog vieler Sportdisziplinen mit hohen sportmotorischen Beanspruchungen.
- c) SMT hat nachweislich einen positiven Einfluss auf die initiale Kraftproduktion (Granacher et al., 2007; Gruber et al., 2004). Die Verbesserungen der mechanischen Kraftproduktion korrespondieren dabei mit erhöhten neuromuskulären Aktivierungen im Kraftanstieg. Daher kann auch ein Einfluss auf die intramuskuläre Koordination durch SMT angenommen werden. Aus dieser Sicht erweist sich SMT als interessante Leistungsoptimierung bei entsprechenden sportmotorischen Zielstellungen.

4.1 Wirkung und Nutzen durch SMT im Alltag und im Sport

Die neuronale funktionelle Plastizität charakterisiert sich durch rasche Adaptations- und Deadaptationsvorgänge. Erste adaptive Erfolge zeigen sich schon nach wenigen Reizsetzungen bzw. Trai-

ningseinheiten (siehe 3.2.1, 3.2.2). Für relevante, sensomotorische Erfolge beträgt die Zeitspanne je nach Zielstellung zwischen 4 Wochen und mehreren Monaten. Der Zuwachs an Maximalkraft und Explosivkraft (Bruhn und Gollhofer, 2001; Granacher et al., 2007) ist in den ersten 4 Wochen vorwiegend auf neuronale Anpassungen zurückzuführen. Granacher und seine Mitarbeiter (2007) vermuten, dass die neuronalen Anpassungen auf einer Reduktion der präsynaptischen Hemmung zu Beginn der Kraftentwicklung erklärbar sind. Bei längerer Trainingsdauer sind in Abhängigkeit der Reizkonfiguration weitere neuronale, aber auch zusätzliche muskuläre bzw. strukturelle Anpassungen zu erwarten. Nach Erreichen der formulierten Kompetenz sind weiterhin gut konzipierte leistungsadäquate Stimulationen notwendig, wenngleich die Reizintervalle zum Erhalt der neuronalen Fähigkeiten etwas weiter auseinanderliegen dürfen. Fehlen die kontinuierlichen Reizsetzungen, degenerieren vor allem die zentralen Funktionen, indem die Informationsverarbeitung durch strukturelle Verluste bedingt (Abb. 3c, 3d) funktionell komplizierter wird und dadurch die sensomotorischen Leistungen als Ganzes qualitativ an Komplexität, Geschwindigkeit und lokaler Präzision verlieren.

Ein gutes SMT besticht durch seine alltags- oder disziplinen-spezifische Modulation, und ist zudem bestmöglichst auf die individuellen Fähigkeiten/Bedürfnisse zugeschnitten. Aufbauend auf diesen physiologischen Vorgaben sind nachweislich protektive und leistungsphysiologisch interessante Anpassungen zu erwarten. So unter anderem:

- Bessere funktionelle Reflexaktivitäten sowie Verbesserung alltagsmotorischer Aufgaben.
- Bessere lokale, intermuskuläre und Ganzkörper-Koordination.
- Intensivere, sensomotorische Bewältigung destabilisierender Reize, was auf der Ebene eines einzelnen Gelenkes sowie der pluriartikulären Beanspruchung eine günstige Voraussetzung für die adäquat motorische Kompensationsantwort darstellt. Biomechanisch kann daher davon ausgegangen werden, dass sich dadurch die motorische Gelenkkontrolle in der stabilisierenden und kinetischen Beanspruchung verbessert und gleichzeitig eine protektive Wirkung erzielt wird.
- Verbesserung der dynamischen Standstabilität (Bruhn et al., 2000), der Gleichgewichts- und Lokomotionsfähigkeit sowie der Zielmotorik, was sich auch in einer deutlichen Verringerung des Sturzrisikos (Granacher et al., 2007) auswirkt.
- Zunahme der Explosivkraft, vor allem in der initialen Phase der Kraftproduktion. Dies begünstigt die Handlungsgeschwindigkeit im Alltag (z.B. Sturzprävention), die reaktiven Muster im Sport sowie die Sprungleistungen.
- Ein spezieller Nutzen durch initiale Kraftverbesserungen zeigt sich in azyklischen und kampfbetonten Belastungsformen, wo sich vor allem disziplinenverwandte, sensomotorische Übungsstrukturen erkennbar positiv auf das reaktive und situative Bewegungsverhalten auswirken (z.B. Spiel- und Kampfsportarten).
- Bedeutsam werden sensomotorische Übungen, wenn die Qualität der sensomotorischen Kontrolle – unter dem Aspekt einer spezifischen alltäglichen oder sportmotorischen Zielstellung – determiniert wird.
- SMT eignet sich bestens, um muskuläre Dysbalancen – speziell die Spannungs- und Leistungsdysbalancen – auszugleichen, indem die neuronale Ansteuerung der agonistischen Muskulatur verbessert wird. Bezüglich der Harmonisierung von muskulären Dysharmonien haben funktionell-anatomisch adäquate sensomotorische Übungen eine sehr positiv korrigierende Wirkung, um vor allem Spannungs-, Synergisten- und Systemdysharmonien in den physiologischen Normbereich zurück zu führen (Gisler 2007a).
- Verringerung der Verletzungsinzidenz, vor allem deutlich weniger Muskel- und Gelenkverletzungen durch Reduktion potenzieller Verletzungssituationen, aber auch einer höheren protektiven Kompetenz in potenziellen Verletzungssituationen. In Metaanalysen (Caraffa et al., 1996; Heidt et al., 2000; Myklebust et al., 2003) wurde errechnet, dass man mehr als die Hälfte al-

ler Verletzungen der unteren Extremitäten durch gezieltes SMT vermeiden könnte.

Neue Studien (Faude et al., 2005; Giza et al., 2005) bestätigen die präventive und leistungsphysiologische Wirkung und den Nutzen durch SMT. Im professionellen Frauenfußball führte beispielsweise eine ergänzende SMT-Einheit pro Woche bereits im 1. Halbjahr zu einer hoch signifikanten Verletzungsreduktion. Nach einem Jahr konnten Bänderverletzungen und schwere Muskelverletzungen sogar vollständig verhindert werden. Die vorherige Verletzungsinzidenz im Saisonverlauf zeigte noch mit 82 Verletzungen durch Foulspiel und 145 ohne Gegnerinnenwirkung eine hohe Prävalenz auf. Leistungsphysiologisch interessant waren zusätzliche, nützliche Nebeneffekte durch SMT: Innerhalb einer Halbsaison verbesserte sich das Koordinationsvermögen, die Sprunghöhe sowie -weite, die Wurfkraft und die Beweglichkeit signifikant (Faude et al., 2005).

4.2 Wirkung und Nutzen durch SMT in der Prävention, Therapie und Rehabilitation

Durch Verletzungen und Krankheiten bedingte Immobilität führt bereits nach einer Inaktivitätsphase von mehr als 1 Woche zu degenerativen Vorgängen, vorwiegend in zentralen, aber auch efferenten neuronalen Netzwerken, wodurch die Möglichkeit der muskulären Ansteuerung nachhaltig reduziert wird (Haas et al., 2006b).

An diese Deadaptation sind auch biochemische Modifikationen und morphologische Veränderungen gekoppelt (Gisler 2007b). Die Wiedererlangung – zumindest der früheren Kompetenz – dauert bei einer adäquaten Therapieplanung meistens 3 bis 8 Mal länger, als der Inaktivitätszeitraum. Da jedoch in der therapeutischen und rehabilitativen Praxis dem Training der sensomotorischen Leistung eine eher sekundäre Bedeutung zukommt und die intermuskulär übergreifende Komplexität oftmals zu wenig Beachtung erfährt, erklärt sich möglicherweise dadurch ein Teil der hohen Wiederverletzungsrate bei Sportlern nach einer Erstverletzung. Die ist 5 bis 9 Mal höher im Vergleich mit bis anhin verletzungs-freien Sportlern.

Da im Moment der Applikation pathophysiologische Rahmenbedingungen bestehen und möglicherweise zur Schmerzreduktion verordnete Medikamente, wie Analgetika oder Psychopharmaka und Stereoiden zu Wahrnehmungsstörungen führen und ebenso die Transmittersubstanzen beeinflussen, stellt sich die Frage, welches Übungs-konstrukt einerseits kein Risiko für die pathogenen Strukturen darstellt und andererseits trotzdem die aktuell mögliche adaptive neuronale Plastizität fördert oder sie zumindest in der degenerativen Entwicklung bremsst. Vor dem Hintergrund, dass man in der Therapie und Rehabilitation nicht mit beliebig energiereichen Signalen (grosse Amplituden und hohe Signalintensitäten bei gestörter Signalverarbeitung usw.) arbeiten kann, ohne die Gefahr einer Schädigung hervorzuheben, ist die Gestaltung und Anpassung sensomotorischer Übungen der dominante Anteil für therapeutische Erfolge. Ist das Übungskonzept indikativ, fallspezifisch angepasst und von substanzieller Evidenz können folgende Wirkungen bzw. Korrekturen erzielt werden:

- Nützlich sind sensomotorisch adäquat modulierte Reizkonfigurationen, vor allem bei der Therapie der klassischen movement disorders, also bei Patienten, deren alltägliche Bewegungsfähigkeiten als Folge von Erkrankungen und Verletzungen beeinträchtigt sind, aber auch bei Patienten mit neurodegenerativen Krankheiten wie multiple Sklerose, Alzheimer, Morbus Parkinson und nach einem Schlaganfall oder bei spinalen Läsionen.
- SMT ist möglicherweise die Therapie der Wahl bei Tonusregulationsstörungen. Eine nicht angepasste Tonusregulation, wie sie beispielsweise bei Zerebralpareesen und sensomotorischen Integrationsstörungen auftreten, ist aber auch ein wesentliches Problem des Schmerzpatienten und bei Patienten mit chronischen Funktionsstörungen.
- Da der Selektion und Gewichtung afferenter Informationen – im Hinblick auf die Modulation funktioneller Koordinationsmus-

- ter – eine zentrale Rolle zukommt, sind elektrische Reizgebungen, welche sensorische Integrationsprozesse umgehen, mittel- und langfristig nur begrenzt sinnvoll. So gesehen, ist SMT schon früh ein zwingendes und logisches Therapiekonzept in den Fällen, wo es darum geht, Patienten rasch, belastbar sowie funktionsfähig in den Alltag zu entlassen.
- Für den Sporttreibenden ist SMT nach einem traumatischen Erlebnis eine unumgängliche Massnahme, um eine Rückkehr zur vorherigen Funktionalität und Leistungsfähigkeit zu gewährleisten und ebenso wichtig, um eine Wiederverletzung zu vermeiden.
 - In den ersten posttraumatischen Tagen/Wochen sind im Einfluss nozizeptiver Signale zwar initiale sensomotorische Modulierungen möglich; von einer endgültigen Funktionalität liegen sie jedoch in diesem Moment noch weit entfernt. Sie sind aber trotzdem als Stimulus der Neuroaktivität wichtig, denn sie verhindern weitgehend das fortgesetzte Degenerieren neuronaler Netzwerke; sie sind auch in der Progression zu komplexeren sensomotorischen Modulationen notwendig.
 - Interventionen, welche die Gelenke der unteren Extremitäten als Behandlungsziel haben, müssen bei symptomatischen Reaktionen – ausgelöst durch SMT – als Behandlungskonzept nicht zu früh sistiert werden. Mittels kompensatorischer Konfigurationen über benachbarte Gelenke sind meistens erträgliche und damit nützliche Varianten modulierbar.
 - Bei seitendifferenzierter, sensomotorischer Kompetenz wird defizitbedingt die betroffene schwächere Seite entsprechend dominant behandelt. Nicht vergessen sollte man aber, dass der posttraumatische Zeitraum auch auf der gesunden Seite die Funktionalität degenerativ beeinflusst oder zumindest verändert. Diese Konstellation und die daraus abgeleiteten Therapieansprüche manifestieren sich primär in den unteren Extremitäten. Hier sind dann auch in der therapeutischen Endphase refunktionalisierende und seitenharmonisierende Massnahmen notwendig, die anfänglich durch kortikale Kompensationsmechanismen in der Bewegungsplanung charakterisiert sind.
 - Bei technisch sowie bewegungs- und belastungsphysiologisch kompetenter Anwendung wirkt SMT durch seinen protektiven und refunktionalisierenden Einfluss auf bestimmte artikuläre Heilungsvorgänge positiv oder kann gewisse bestehende, mechanisch assoziierte Gelenksymptome reduzieren (z.B. Gelenkinstabilität, nicht aktivierter arthrotischer Befall, Probleme mit aus Faserknorpel bestehenden Strukturen).
 - Nach Abschluss der Heilungsvorgänge senkt SMT signifikant die Wiederverletzungsrate (Rezidivprophylaxe), aber auch das erhöhte Risiko für andere Verletzungen. Voraussetzung ist – wie immer – die technisch-anatomische Kompetenz der Übungen und die Integration der notwendigen physiologischen Komplexität, die der jeweiligen Zielstellung entspricht.
 - SMT verbessert den Knochenstoffwechsel und erhöht die Knochendichte. Durch seine charakteristische Beanspruchung sind vor allem bei mittleren und höheren Intensitäten hohe Zug- und Druckbelastungen sowie Torsionskräfte nahe an osteoporotischen Schwachstellen koexistent. Dadurch sind optimale Voraussetzungen, die präventiv notwendigen Trabekelzüge entsprechend auszubilden und sie zu erhalten, gegeben.
 - Aufgrund der typisch intermuskulären, systemübergreifenden und in der Folge gelenkumfassenden muskulären Innervation kann davon ausgegangen werden, dass daraus eine im Alltag nutzbare, verbesserte Gelenkführung resultiert. Diese physiologische Führung ist Voraussetzung für eine verschleissarme, langfristig problemfreie Gelenkfunktionalität.

5. Determinanten im sensomotorischen Training

5.1 Anatomisch-physiologische Betrachtung

SMT wird nutzenbringend primär für die Füsse/Sprunggelenke, die Kniegelenke, die Hüftgelenke, die Wirbelsäulengelenke sowie für die Schultergelenke eingesetzt. Bei Indikation sind auch

Anwendungen in anderen Gelenken möglich. Für die klinische Wirkung ist es wichtig, die Systemkompetenzen in ihrer ureigenen Funktionalität und adaptiven Fähigkeit zu erkennen und sie durch entsprechend determinierte Stimulationen zur Adaptation zu bringen. Das Erreichen von leistungsphysiologischen Zielen, wie verbesserte Gelenkkontrolle, Gelenkstabilität, Gleichgewichtsvermögen und Explosivkraft ist zusätzlich von der Übungswahl und der Ausführungsqualität abhängig. Organisatorisch bedeutsam ist, dass SMT nie in ermüdetem, aber auch nicht in abgekühltem, unvorbereitetem Zustand ausgeführt wird. Ein empfehlenswerter Zeitpunkt für gute Trainingseffekte ist die Integration in die 2. Hälfte des Warm-up's oder unmittelbar nach dem Aufwärmen. In der Therapie/Rehabilitation ist es möglich, den Einstieg durch koordinativ leichte, wenig belastende allgemeine Interventionen oder mit wenig anspruchsvollen, sensomotorischen Übungen zu planen. Für die Sicherung der Qualität und Erfolgsergebnisse sind einige Trainings- und Belastungsmerkmale zu beachten:

- Die Übungen müssen anatomisch-physiologisch kompetent und soweit möglich individuell adaptiert sein.
- Je nach Übungswahl bzw. nach Übungsgestaltung kann eine deutlich unterschiedliche arthroneuromuskuläre Wirkung erzielt werden → von indikativ bis kontraindikativ (s. Kapitel 2.2).
- Kontraindikationen – auch in benachbarten Gelenken – sind methodisch und technisch unbedingt auszuschliessen (entsprechende Übungsgestaltung).
- Meistens ist es physiologisch kontraindikativ, funktionell verbundene Gelenke mit Interventionen zu trainieren, welche vorwiegend ein aus dem funktionellen Verbund herausisoliertes Gelenk betreffen, z.B. nur Sprunggelenke ohne Interaktionen, die auch das Kniegelenk und das Hüftgelenk mit einbeziehen.
- Bestimmte Übungen beanspruchen in der Endphase der Ausführung durch ihre systemübergreifenden, muskulären Interaktionen auch die kardiopulmonale Leistungsfähigkeit von mittelintensiv bis submaximal. Dies ist bei Patienten mit entsprechender Insuffizienz zu beachten.
- Statische Unzulänglichkeiten sind anfänglich durch extrinsisch korrigierende Massnahmen aufzufangen. Später sind womöglich wieder rein intrinsische Fähigkeiten ohne äussere Kompensationen anzustreben (eigene, unveröffentlichte Daten).
- Bei pathologischen Zuständen können entlastende Übungsvariationen Symptome lindern bzw. sogar eliminieren.
- Vor allem für die unteren Extremitäten gilt, dass diejenigen Patienten, welche gehen oder stehen können, auch in der Lage sind, mit SMT zu beginnen.

5.2 Sicherung der Belastungsnormative im Training

Belastungsnormative sind Merkmale, welche die von aussen auf den Körper einwirkenden Belastungen beschreiben. Die Belastungsnormative sind immer individuell und für den Erfolg unabdingbar miteinander verknüpft. Sie beeinflussen sich auch gegenseitig. Änderungen von Normativen beinhalten immer eine andere Wirkung im positiven wie im negativen Sinne. Die nachfolgend beschriebenen Belastungsnormative sind also für den unmittelbaren Effekt sowie für den kontinuierlichen Erfolg auch beim SMT wichtig.

5.2.1 Belastungsintensität

Die Übungsintensität ist so zu wählen, dass dadurch keine Symptomverstärkungen und keine Qualitätseinschränkungen auftreten. Doch ist grundsätzlich einzuräumen, dass unter anderem eine höhere Intensität auch eine verstärkte neurophysiologische Aktivität generiert und somit fallspezifisch positiv ist.

5.2.2 Belastungsdauer

Untersuchungen deuten darauf hin, dass ein Training zwischen 20 und 40 s das sensomotorische System optimal reizen kann. Bei bestimmten Übungen ist hingegen auch eine Belastungsdauer bis 60 s notwendig und effektiv (eigene, unveröffentlichte Daten). Ausgedrückt in der Anzahl Wiederholungen bedeutet dies ca. 8–15

Wiederholungen. Dies gilt vor allem bei neurophysiologischen Zielsetzungen mit zugleich moderatem bis mittelintensivem Kräftigungscharakter. Bei speziell neurologisch intensiv wirkenden Übungen sind schon 15 bis 20 s Belastung ausreichend bzw. sogar optimal. Werden hingegen zugleich Kraftziele angestrebt, darf die Wiederholungszahl entsprechend dem Kraftziel zwischen 1–25 RM liegen. Grundsätzlich zeigen leichte Ermüdungssymptome, dass die Grenze der optimalen Belastungsdauer bereits überschritten wurde.

5.2.3 Pausendauer

Faktisch ist die Dauer der Pause zwischen den Serien gleich lang oder minim länger als die Belastungsdauer – also 20–60 s. Allzu lange Pausen vermindern möglicherweise den Trainingseffekt. Anstelle mehrerer Serien mit derselben Reizkonfiguration sind 2–4 leicht unterschiedliche Übungsvarianten für das gleiche Gelenk-Muskelsystem eine empfehlenswerte Variante.

5.2.4 Belastungsumfang

Der Belastungsumfang pro Gelenk/Gelenksystem bzw. pro neuromuskuläres Zielgebiet ist eher klein zu halten (keine Ermüdung!). Wichtiger und effektiver als der Belastungsumfang ist die Belastungshäufigkeit.

5.2.5 Belastungsform

Sie kann und soll variiert werden, z.B. durch Tempovariationen, Intensitätsvariationen sowie Belastungsvariabilität, im Rahmen einer noch sinnvollen Reizänderung während der Übungsausführung (siehe 6.1). Insgesamt betrachtet, gehört die Belastungsform zu den anspruchsvollsten, integrativen Komponenten beim SMT, dies schon deshalb, weil die Vielfalt der zur Verfügung stehenden Variabilität und Komplexität zielgerecht zu lösen ist.

5.2.6 Belastungshäufigkeit pro Woche

Die Intervalle können zwischen 1x pro Woche bis täglich variieren, wobei mehrmalige Interventionen pro Woche (3–12 Trainingseinheiten) für die neuronalen Vernetzungen deutlich effektiver sind als 1x pro Woche. Möglicherweise sind relativ häufige Reizsetzungen in der initialen Phase der plastischen Adaptationsvorgänge überdurchschnittlich wirksam (siehe 3.2.2).

5.2.7 Belastungskontinuität

Die fortgesetzte Durchführung von SMT-Einheiten sollte mindestens 4 Wochen anhalten. Ob längere Belastungsphasen von mehr als 6 Wochen ohne Änderungen der Reizkonfiguration (Übungsvariationen, Änderungen des Schwierigkeitsgrades usw.) eine progressive Verbesserung generieren, ist im Moment noch nicht zufriedenstellend beantwortet. Verschiedene Untersuchungen und Studien erwähnen einen möglichen Deckeneffekt bzw. einen neurologischen Gewöhnungseffekt. Erfahrungen des Autors zeigen, dass je nach Fähigkeiten des Trainierenden nach 3 bis 6 Wochen die Bereitschaft und Kompetenz für höhere Anforderungen vorhanden ist. Andererseits ist es wichtig, dass beim Erreichen der Zielsetzung weiterhin sensomotorische Reize geplant werden, um einen entsprechenden Leistungsverlust zu verhindern. Allerdings können die Reizintervalle etwas weiter auseinanderliegen (Reizhäufigkeit).

6. Reizkonfiguration der sensomotorischen Übungen

Jede Übung als Signalgeber bestimmt die Selektion, die Gewichtung, die Segmentierung, die Komplexität sowie die Qualität der Verarbeitung und in der Folge die möglichst physiologisch determinierte efferente Antwort. In diesem Sinne kommt der Architektur und Ausführung sensomotorischer Übungen eine zentrale Bedeutung zu. So sind präaktive Entscheidungen, inwieweit kortikale oder subkortikale Zentren angesprochen werden sollen, ebenso wichtig, wie die Klarheit darüber, welche anatomisch-physiologisch, sich gegenseitig beeinflussenden arthroneuromuskulären Systeme interaktiviert werden sollen. Um die gewünschten Anpassungen zu

generieren, ist es zusätzlich notwendig, das Überschreiten eines Schwellenwertes, bei welchem ein Aktionspotenzial ausgelöst wird, übungsbedingt zu sichern (Abb. 5 und 6).

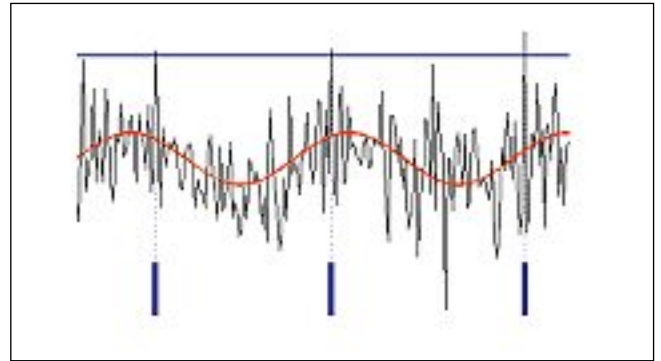


Abbildung 5: Das nichtlineare System im dargestellten neuronalmotivierten Beispiel ist die Schwelle (blaue Querlinie oben), bei deren Überschreitung ein Aktionspotenzial – dargestellt ebenfalls in blau am unteren Bildrand – ausgelöst wird. Das Signal (rot) verläuft stets unterhalb der Schwelle. Werden jedoch Störsignale (Noise) zu dem Signal addiert (schwarz), so wird die Schwelle gelegentlich überschritten (blaue, vertikale Balken). Die Wahrscheinlichkeit dafür ist in den Maxima der Störsignale höher als in den Minima. Bei nur geringen Störgrößen wird die Schwelle nie überschritten, bei sehr hoher und enger Darstellung bildet sich in der dichten Folge von Aktionspotenzialen das Signal nicht mehr gut ab. Eine mittlere Darstellung ist für die Annahme des Signals nach der nichtlinearen Theorie optimal. (Wikipedia.)

Auf dieser Basis bekommt der jeweils Trainierende die Ausführung und die speziellen Merkmale der Übung vorgezeigt und wird – falls notwendig – auch taktil begleitet. Anschliessend sind eine kompetente Blickdiagnostik und die daraus resultierenden Korrekturen sowie Anpassungen beständige und wichtige Merkmale der Erfolgssicherung. Ein hoher Grad kognitiver Fähigkeiten und eine fokussierende Konzentrationsfähigkeit sind beim Ausführenden wichtig, um sensomotorische Regulationen zu intensivieren und damit entweder die lokal oder komplexer wirkende Zielstellung rascher und optimal zu erreichen.

Um Gewöhnungseffekte zu vermeiden und zudem eine intensive und fortwährende Wahrnehmung des Signals sicherzustellen, wird die übungsspezifische Charakteristik durch unterschiedliche, sich dynamisch verändernde Gelenkstellungen moduliert, und der Schwierigkeitsgrad kann dabei zusätzlich durch intrinsisch und extrinsisch erschwerend wirkende Bedingungen bzw. randomisierte oder stochastische Störsignale erhöht werden. Findet im Verlauf des Trainings eine Absenkung des Aktivierungsniveaus statt, sollte im Sinne der koordinativen Anpassung bzw. durch Veränderung der Reizkonfiguration die Übung erschwert werden (siehe 6.3–6.8).

6.1 Unterschiedliche Signalmodulationen

Die Integration stochastischer (variabler) und randomisierter (zufälliger) Anteile in das Stimulusignal sorgt dabei – entgegen unserer üblichen Betrachtungsweise – für eine verbesserte Verarbeitung der afferenten Informationen (Abb. 6).

Das Phänomen dieser nichtlinearen Reizgestaltung erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schwellenwert überschritten wird und dadurch entsprechende Aktionspotenziale ausgelöst werden (Abb. 5). Wie Untersuchungen zeigen, bewirken stochastische Signalanteile eine einfachere Erfassung und Verarbeitung durch das Nervensystem, während die Randomisierung Anforderungen an die Gewichtung und Segmentierung der Afferenzen stellt und entsprechende Trainingseffekte generiert.

Um zu lernen, muss also der Reiz variiert werden. Ein immer gleicher Stimulus (Abb. 5+6) verliert seinen Informationswert und zudem adaptieren die neuronalen Systeme schnell, d.h. innert Kürze würden die Signale unerschwinglich. Die Variationen dürfen

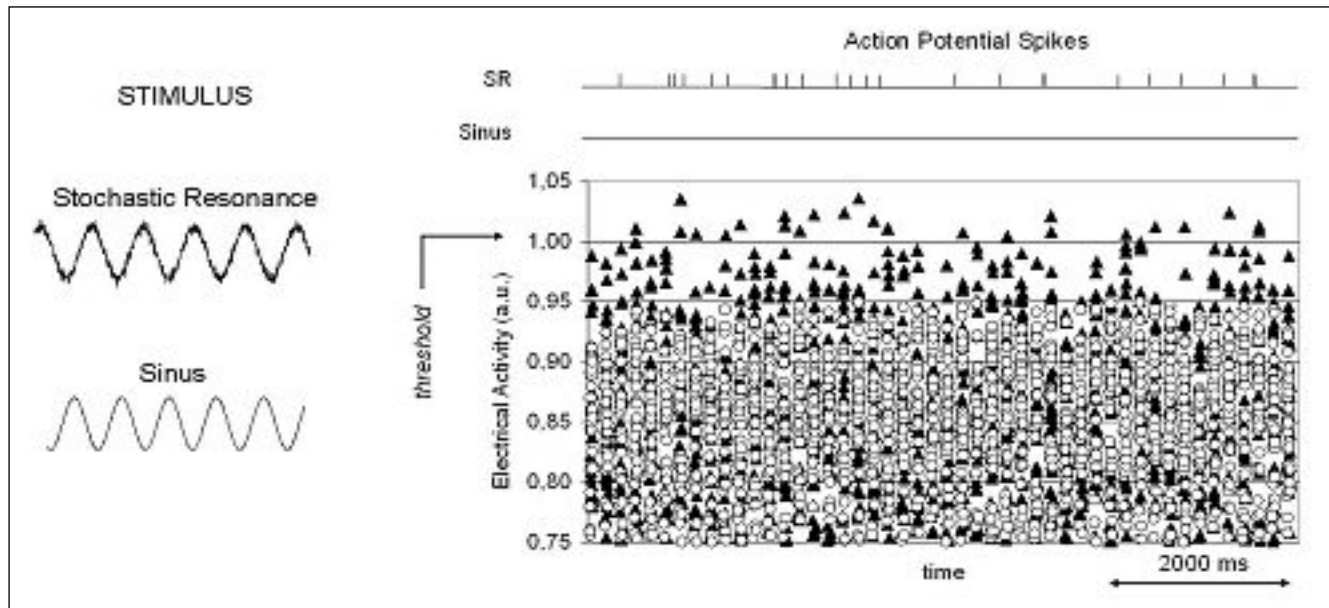


Abbildung 6: Nervenzellmodell, das mit Sinus-Signalen (O) bzw. stochastische Resonanz-Signalen (▲) gereizt wird. Während Sinusstimuli unterschwellig bleiben, werden durch stochastische Resonanzen Aktionspotenziale ausgelöst. (Institute of Sport Sciences, J.W. Goethe-University Frankfurt.)

jedoch zum Zeitpunkt der Übungsausführung nicht zu gross sein! Übungsvariationen, die sich repetitiv allzuweit aus einer durch eine bestimmte Bewegung lokalisierten Neuronengruppe entfernen, werden ineffektiv, denn daraus kann das Zentralnervensystem keine Regeln destillieren. Folglich ist es wichtig, das Prinzip Lernen ist Wiederholung ohne Wiederholung als feste Grösse in die Architektur und Ausführung sensomotorischer Übungen einzufügen.

6.2 Die drei Phasen der Anpassungserscheinungen im zentralen Nervensystem

Die wesentlichen Zielorgane des SMT sind Gehirn und Nerven. Die häufige Wiederholung ohne Wiederholung bestimmter Bewegungen verbessert die neuronalen Schaltungen auf spinalem, supraspinalem und kortikalem Niveau, wobei diese eng zusammenarbeiten. Impulse, die den Talamus erreichen, werden nach ihrer Entstehungsart und ihrem Entstehungsort gefiltert. Nur die Impulse, welche von dort aus an die Grosshirnrinde übermittelt werden, bewirken eine bewusste Empfindung. Im Hirnstammbereich und auf der Rückenmarksebene erfolgen die Antworten hingegen unbewusst in Form von Reflexen.

Phase I: Die sensomotorische Steuerung von neu zu erlernenden Bewegungsmustern wird hauptsächlich kortikal gesteuert und sehr bewusst ausgeführt. Hierbei kommt es anfangs zu unnötigen Nebenbewegungen und Spannungen, sodass die Bewegungsabläufe insgesamt unökonomisch durchgeführt werden.

Phase II: Im Kortex wird ein sensomotorisches Programm festgelegt. Kurzzeiterinnerungen werden nur vorübergehend gespeichert. Ihr Behalten bedarf keiner anatomischen Veränderung. Das Umschalten von einer Kurzzeit- auf eine Langzeitverstärkung erfordert dagegen auf molekularer Ebene ein Umschalten von einem auf Vorgängen basierenden zu einem auf Strukturen basierenden Prozess, d.h. um Langzeithalte zu etablieren, müssen neue Synapsen aufgebaut werden. Da Bewegungen nun bekannt sind, wird die muskuläre Zusammenarbeit verbessert und die Bewegungsabläufe werden zunehmend ökonomisch.

Phase III: Die sensomotorischen Vorgänge werden jetzt von kortikalen auf vermehrt subkortikale Areale verlagert, d.h. die Bewegungen laufen automatisiert ab und werden vorwiegend spinal und supraspinal gesteuert. Nur bei geänderten Ausgangsbedingungen greift der Kortex modifizierend in das Bewegungsprogramm ein und sorgt für einen angepassten Bewegungsablauf.

Aufgrund der individuell sehr unterschiedlich neuronalen Verarbeitungscompetenz dürfen die übungsspezifischen, sensorischen

Informationen die aktuelle segmentale Verarbeitungsfähigkeit der zentralnervösen Areale nicht überfordern. Deshalb ist es wichtig, dass die Planung, der Aufbau, die Ausführung sowie die Anpassungen der sensomotorischen Interventionen den momentan physischen und neuronalen Fähigkeiten angepasst werden.

Nachfolgend werden Hinweise für mögliche Reizkonfigurationen gegeben, die – bei gutem praktischem Wissen vorausgesetzt – helfen sollen, Übungskonstrukte zu kreieren, mit welchen die neurophysiologische Konditionierung im Sinne der kausalen Kette zwischen Reiz-Reiztransduktion-Adaptation-Effekt stimuliert und optimiert werden.

6.3 Reizkonfigurationen mittels einfacher intrinsischer Veränderungen (Noise)

- Koordinativ eher moderate monoartikuläre Übungen (Schultergelenk) bzw. pluriartikuläre Interventionen (untere Extremitäten, Rumpf), ohne zusätzliche intrinsische oder extrinsische Störgrössen.
- Der Zielstellung entsprechende mono- oder pluriartikuläre Interventionen, die je nach Gelenk eine sagittale, frontale oder rotatorische Kinematik aufweisen oder sogar eine achsenverbindende motorische Antwort modulieren.
- Veränderungen des Bewegungsraumes bzw. der artikulären Freiheitsgrade (siehe 2.1) sowie variierende Geschwindigkeiten während der Übungsausführung.
- Einfache Laufformen (Kreis, Oval, die Acht oder Kurvenlaufen, vorwärts-rückwärts usw.) mit konkreten Bewegungsaufgaben in den arthronemuskulären Systemen, wie dabei den Fuss dynamisch gehend abrollen oder den Fuss hüpfend, springend einzusetzen.
- Lauf- und Hüpfvarianten auf weicher Unterlage, z.B. balancepad, Gymnastikmatte usw.

6.4 Reizkonfigurationen mittels komplexer intrinsischer Veränderungen (Noise)

- Koordinativ anspruchsvollere mono- und pluriartikuläre Übungen, ohne oder mit intrinsischen Störgrössen.
- Pluriartikuläre Übungen, die sich möglichst nahe an den alltäglichen bzw. sportdisziplinspezifischen Bewegungs- und Belastungsmustern orientieren.
- Mehrgelenkige Übungen mit sensomotorischer Trainingspriorität, die zugleich durch Bewegungen anderer Körperbereiche ge-

stört werden (Noise durch Arm- und/oder Rumpfbewegungen; (Abb. 7).

- Bewältigung von zwei genau formulierten Übungsaufgaben gleichzeitig, z.B. sensomotorische Kompetenz/Stabilität einerseits und spezifische Bewegungsaufgaben andererseits, wobei der sensomotorische Auftrag zusätzlich mit extrinsischer Noise überlagert werden darf.
- Übungen mit erhöhter Komplexität durch unterschiedliche Aufgabenlösung innerhalb der funktionell verbundenen Gelenkkette (dynamische und stabilisierende Ko-Modulation).
- Sensomotorische Übungen bei anatomisch komplexen Bewegungsverbindungen, wie Beine-Rumpf, Beine-Rumpf-Schulter-Arme u.Ä.
- Antizipierbare Übungen unter Zeitdruck, im Sinne einer möglichst schnellen Ausführung, jedoch ohne Qualitätsverluste im Ablauf der Bewegungsaufgabe.
- Nicht antizipierbare randomisierte oder stochastische Übungsvariationen, auf die mit einer genau vorgeschriebenen Lösungsaufgabe reagiert werden soll.
- Sensomotorische Übungskonstrukte, die entweder verletzungsdominante Gelenke forciert integrieren oder disziplinspezifisch risikoreiche Bewegungsabläufe und erhöht intensive Belastungsmuster gezielt optimieren (hoher Transfereffekt).

6.5 Reizkonfigurationen bei ballistischen Bedingungen

- Hüpfvariationen bei leichten ballistischen Bedingungen.
- Hüpfvariationen bei ballistisch intensiveren Bedingungen.
- Hüpfvariationen, unter Vorgabe gezielter und anspruchsvoller sensomotorischer Zielstellungen bei mittelintensiver bis maximaler Belastung.
- Sprünge und speziell die darauf folgenden Landephase in verschiedenen Variationen und Richtungen bei submaximaler bis gelegentlich maximaler Belastung im Sport.
- Einbeinige Hüpfvariationen bzw. Einbeinsprünge und Landungen in verschiedenen Richtungen mit mehrheitlich ballistischem Charakter.
- Landungen und Sprünge in alle Richtungen mit plyometrischer Charakteristik (Achtung: sehr hohe Belastungsspitzen!).
- Sprungschule mit disziplinspezifischer Charakteristik, welche zudem durch gezielte protektive Belastungsprofile aufgewertet werden können.

6.6 Reizkonfigurationen mittels intrinsischer und zusätzlich extrinsischer Störsignale (Noise)

Grundsätzlich können alle Übungsvariationen von 6.3, 6.4 und 6.5 mit extrinsischen Störgrößen erschwert und intensiviert werden, und sie sind in fortgeschrittenem Stadium wichtige Erfolgsmediatoren. Zu beachten ist, dass der Schwierigkeitsgrad kontinuierlich steigend geplant wird, ohne dabei die neuronalen Zeitfenster – speziell die Grenzen der spinalen Reflexaktivität – sowie die Kraftleistung und das biologische Profil des Ausführenden zu überschreiten. Bedeutsam dürfte jedoch wohl bleiben, dass sich die durch extrinsische Faktoren komplimentierte Reizkonfiguration einermassen auf die alltäglichen und sportsspezifischen Bewegungen und Zusammenhänge transferieren lässt.

- Steigerung des Schwierigkeitsgrades durch Einflussnahme über Veränderungen: a) intrinsischer Massnahmen, wie mehr bewegte und somit störende Masse mit eventuell gleichzeitig randomisierter Programmierung; b) extrinsischer Einflüsse, wie unterschiedlich weiche Unterlagen, bewegte oder vibrierende Unterlagen usw.; c) gezielter Störgrößen innerhalb der sensomotorischen Systeme, z.B. störende Einflüsse durch den Vestibulärapparat oder durch Ausklammerung einer exterosensorischen Quelle (siehe 6.7); d) wie die Mischung bzw. Vernetzung von intrinsischen und extrinsischen Verarbeitungsaufgaben auf unterschiedlich hohem Leistungsniveau; e) von vorgegebenen stabilisierenden oder dynamischen sensomotorischen Lösungsmustern, die jedoch ständig durch das Umfeld (z.B. Partner) im Sinne variabler und randomisierter Einflussnahme gestört wird.



Abbildung 7: Beispiel einer sensomotorischen Übungsanordnung, wobei eine pluriartikuläre Interaktion mit stochastischen Signalanteilen (Noise durch zusätzliche Armbewegungen) erkennbar ist. (Gisler, *medibalance*, Luzern.)

- Gegen variable, nicht antizipierbare Störungen durch einen oder mehrere Partner versucht der Trainierende – sich im Einbeinstand bewegend – kompetente sensomotorische Korrekturen bzw. Lösungen zu generieren, d.h. posturale Kontrolle bei verschiedenen Gelenkwinkelkonfigurationen oder Zusatzaufgaben, welche nicht antizipierbar sind.
- Bei Bedarf können Hilfsmittel eingesetzt werden, um einerseits die Reizintensität zu erhöhen und andererseits, um relativ gute disziplinspezifische Transfereffekte zu erzielen.
- Hilfsmittel und Übungen mit geringer EMG-Aktivierung sollten mit Zusatzaufgaben (Noise) versehen werden, da ansonsten der Trainingsreiz unerschwinglich ist.
- Ein speziell konzipiertes Krafttraining mit Übungen, welche auf sensomotorischer Basis moduliert sind, bewirkt durch seine dualisierende Stimulation lokaler und globaler Muskelsysteme eine hohe alltags- und sportsspezifische Adaptation und Basiskompetenz.

6.7 Reizkonfigurationen mit Störsignalen über andere sensorische Systeme (Noise)

- Die Möglichkeit der selektiven sensomotorischen Verbesserung bei gleichzeitiger Störung anderer Sinneswahrnehmungen ist insofern eine interessante Variante, wenn entsprechend spezifische Fähigkeiten erarbeitet werden sollen.
- Eine sehr interessante und für bestimmte Ansprüche auch sehr effektive Variante stellt das Ausklammern anderer Sinneswahrnehmungen dar mit dem Ziel, durch Elimination von einem Teil der Informationen den gewünschten sensomotorisch verbleibenden Teil zu forciertem Adaptation zu animieren (gezielte sensorische Selektion).

6.8 Reizkonfigurationen in der Therapie

- Faktisch dürfen alle unter 6.3 bis 6.7 beschriebenen Übungsvarianten und Reizkonfigurationen im Rahmen der pathologischen, traumatologischen Erträglichkeit und Machbarkeit übernommen werden (siehe 4.2). Selbstverständlich sind in diesem Moment auch die Belastungsnormative entsprechend anzupassen, so zum Beispiel die Belastungsform (Ausführungsgeschwindigkeit, Bewegungsraum usw.) und sicherlich auch die Belastungsintensität. Die Belastungsnormative und die Reizkonfiguration der gewählten Übungen sind nach den fallspezifisch adäquaten Anfangsvarianten aber – sofern erträglich – relativ schnell in Richtung anspruchsvollerer und komplexerer sensomotorischer Reizverarbeitung zu entwickeln.
- In Ausnahmefällen (vor allem in therapeutischen Akutphasen) kann beim SMT eine monoartikuläre Indikation mit ein- oder mehrachsigen Merkmalen indiziert sein.

- Betroffene, noch symptomatische arthroneuromuskuläre Systeme können situativ durch kompensatorische, eventuell synergistische Reizkonfigurationen entlastet werden, ohne sie ganz aus der Innervationszone und Interaktivität auszuschließen.
- Es ist notwendig, die indizierte Segmentierung der Aktionsmuster zu beachten (siehe 6.2), um die aktuell verfügbaren Zeitfenster nicht zu überschreiten (vorhandene Ataxien berücksichtigen).

7. Positionierung und Vorteile des somatomotorischen Trainings

In letzter Zeit drängen sich zunehmend Vibrationsgeräte mit unterschiedlichen Reizkonzepten auf den Markt, die – bis auf eine Ausnahme – ausschliesslich eine harmonische Sinus-Reizkonfiguration aufweisen. Das zentrale Phänomen von gleichförmigen Sinus-Signalen ist der repetitive Charakter, wodurch habituelle Effekte begünstigt werden.

Die ultimative Wirkung der Vibrationsreize wird nach wie vor kontrovers diskutiert. So bestehen neben positiven Anpassungen auch relevante Risiken und Kontraindikationen. Auf dem schmalen Grad zwischen Schaden und Nutzen konnten inzwischen der Kraftanstieg durch verbesserte Rekrutierung von bisher ungenutzten motorischen Einheiten (Issurin et al., 1994) bei geringfügiger Zunahme an Muskelmasse aufgrund einer Dickenzunahme der Typ-II-Fasern auf Kosten der Typ-I-Fasern, die Stimulierung der perichondralen Ossifikation (Osteoporoseprävention), die Funktionsverbesserung der Gleichgewichtssysteme sowie eine positive Wirkung bei bestimmten neurologischen Erkrankungen (M. Parkinson, multiple Sklerose) nachgewiesen werden. Eine neuere Studie (Bakhtyary et al., 2007) konnte sogar aufzeigen, dass Vibrationsreize vor dem Training appliziert, belastungsbedingte Muskelschäden vermindern.

Diesen positiven Ergebnissen stehen aber auch unerwünschte Wirkungen gegenüber. Bei zu hohen Frequenzen (ab 12 Hz, vor allem aber über 30 Hz) zeigt sich das Problem von Resonanzkatastrophen, welche sich über Risse in Haltestrukturen und Gefässen manifestieren können sowie das mögliche Lösen der Nieren aus den Fettdepots und das Entstehen von kinetischen Illusionen begünstigen. Zusätzlich muss beim Training mit zu hohen Frequenzen mit negativen Begleiterscheinungen wie Schwindel, Kopfschmerzen, Wahrnehmungsstörungen oder einem Verlust der Reflexfähigkeit gerechnet werden. Die zusätzlich unseriösen Versprechungen gewisser Anbieter wirken verwirrend und vor allem deplaziert, da hierfür nie ein wissenschaftlicher Nachweis erbracht wurde und schon gar keine klinische Evidenz.

Wo bestehen nun die Differenzen, Synergien und Vorteile zwischen den Interventionen gerätegesteuerter Vibrationsreize und dem übungsassoziierten SMT? Einige Beispiele mögen dies verständlicher machen:

- Die Reizcharakteristik ist bei allen Geräten – bis auf eine Ausnahme – durch eine lineare Reizgebung geprägt. SMT besticht hingegen durch quasi unerschöpfliche, nicht lineare Reizkonfigurationen und durch anatomische Nutzungsvielfalt.
- Ausnahmslos bei allen Geräten steht der Benutzer meistens mit den Füßen und erst noch in Turnschuhen auf einer harten, glatten Vibrationsplatte. Beim SMT ist die Unterlage variabel gestaltbar und ebenso den individuellen Gegebenheiten und Fähigkeiten anpassbar. Der Fuss als überaus wichtige sensorische Quelle kann beim SMT auf vielfältige Weise optimierend wirksam werden und ist daher auch ein komplementierender Bestandteil beim SMT.
- Im Gegensatz zu der eher eingeschränkten Nutzungsvielfalt der Geräte beeindruckt SMT unter anderem durch seine Möglichkeiten, die Interventionen sehr nahe an alltägliche und disziplinspezifische Bewegungsmuster anzugleichen. Erst dadurch können wichtige protektive und leistungsphysiologische Mechanismen adäquat stimuliert, adaptiert und nutzenbringend transferiert werden.

- Hinsichtlich individueller Prädispositionen sowie bestimmter Problemsituationen im subakuten Zustand kann die variable Modulierung sensomotorischer Übungen und die anpassbare Reizkonfiguration eine wesentliche Notwendigkeit bedeuten. Bei fachkompetenten Handlungen zeigen sich in diesem Anspruchsfeld klare Vorteile von SMT.

Als Ergänzung können Vibrationsgeräte in der Therapie, Rehabilitation und im Sport Sinn machen; ein Trainingersatz sind sie jedoch nicht. Im Vergleich zum SMT verbessert sich mit dem Vibrationstraining und der Elektrostimulation primär bei Menschen die Leistungsfähigkeit, wenn ganz bestimmte Defizite vorhanden sind. Fehlen diese Defizite, haben diese Stimulationen jedoch wenig Wirkung.

8. Diskussion

SMT ist ein noch junges Gebiet. Aufgrund von wissenschaftlichen Arbeiten sowie der beschriebenen neuronalen Zusammenhänge drängt sich eine kritische Überprüfung bzw. Auseinandersetzung der aktuellen Praxis auf, und sie müsste als Konsequenz zu einer Neuorientierung mit interessanten Perspektiven führen. Ein Anfang könnte beispielsweise sein, sich vom weit verbreiteten exklusiven propriozeptiven Denken zu entfernen und sich dafür der neuronalen Komplexität und Kausalität anzunähern, mehr von diesen Vorgängen, Zusammenhängen und Interaktionen zu verstehen und sich ebenso der Spezifität kompetenter sensomotorischer Handlungen zu stellen.

Für die Entwicklung funktionaler Koordinationsmuster ist die Selektion und Gewichtung afferenter Informationen und deren optimale Verarbeitungsdimension von zentraler Bedeutung. Es macht wenig Sinn und ist nicht das Ziel der Informations-, Verarbeitungs- oder Ausführungsebene (siehe 1.1–1.4) eine Vorzugsstellung einzuräumen, da keine Ebene ohne die andere zu bewegungs-, belastungs- und leistungsphysiologisch gewünschten Ergebnissen führt.

Doch mit dem Wissen, dass die Informationsebene kaum oder nicht trainierbar ist und dass es in der Ausführungsebene nur durch entsprechende Regulationen, ausgehend von den übergeordneten zentralnervösen Systemen zu gezielten Resultaten kommt, lässt sich hinsichtlich Plastizität und Adaptation trotzdem eine spinale, supraspinale und kortikale trainingsrelevante Priorität erkennen. Ein wichtiger Hintergrund des Nervensystems besteht in der Aufgabe, sich an spontane, variable, aber auch fluktuierende Umweltbedingungen anzupassen. Ob Anpassungen erfolgen, ist im Wesentlichen von der Überschreitung eines Schwellenwertes abhängig (Abb. 5). Das Erreichen von überschwelligen, sensomotorisch wirksamen Reizen ist über stochastische (variable) und randomisierte (zufällige) Reizkonfigurationen um eine Mehrfaches wahrscheinlicher als durch Interventionen, die durch harmonische Sinus-Signale geprägt sind (Abb. 6).

In der Trainingspraxis zeigt sich die Differenzierung vor allem dadurch, dass beständig Situationen generiert werden, die nur gering oder gar nicht antizipiert werden und dementsprechend Anforderungen an die Segmentation stellen. Präventiv und leistungsphysiologisch bedeutsam dürften folglich hoch variable, gering antizipierbare und ballistische Trainingsformen sein, die eine verbesserte Selektion, Gewichtung sowie Integration diverser afferenter Signale (exterozeptive, propriozeptive) bewirken. In der Anwendung mit heterogenen Voraussetzungen ist jedoch zu beachten, dass hinsichtlich Verbesserungen der redundanten Bewegungsfunktionalität und Leistungsoptimierung anfänglich Interventionen dominieren, die eher eine ausgewogene neuronal interagierende Komplexität sowie eine strukturelle Belastungshomogenität ansprechen und zudem eine gebrauchsbetonte Charakteristik aufweisen. Sensorische Experimente und vor allem ballistische Belastungsformen erweisen sich in dieser Phase als sehr ungünstig, weil übergeordnet die Bewegungsqualität und entsprechende Lernprozesse im Vordergrund stehen. Die übungstypisch, meistens komplexen Bewegungsmuster, verbunden mit der posturalen Auf-

gabenstellung führen in diesem Moment bereits zu ausreichend deutlichen Reizschwellenüberschreitungen (Abb. 5+6), die aus präventiver Sicht in der Therapie/Rehabilitation gelegentlich sogar zu notwendig korrigierenden Reizverminderungen führen. Ob sich in der therapeutischen Endphase intensivere und komplexere Ausführungsvarianten oder sich sogar ballistische Belastungsmuster im Sinne einer höheren bzw. progressiv gestalteten Funktionalität aufdrängen, muss individuell und fallspezifisch beantwortet werden.

Stehen hingegen posttherapeutisch verletzungsrelevante präventive, rezidivpräventive oder leistungsphysiologische Zielsetzungen im Vordergrund, stellen sich hohe Anforderungen an die Geschwindigkeit der Informationsverarbeitungsvorgänge. Vorteilhaft wirken hierbei funktionell-anatomisch anspruchsvollere bis ballistisch geprägte Trainingsformen, welche gelegentlich durch monoartikuläre, mehrheitlich jedoch pluriartikuläre Belastungsvarianten repräsentiert werden. Als Konsequenz für die Therapie, Prävention und den Sport bedeutet dies, dass der Reizkonfiguration und somit der Wahl, Gestaltung und Ausführung einerseits, aber auch dem konzentrativen Engagement und der technischen Kompetenz andererseits, eine vielseitigere und anspruchsvollere Bedeutung als bisher angenommen zukommt. Bereits die aktuell bekannte Wirkung und der Nutzen eines, nach physiologischen Prinzipien ausgerichteten SMT dürfte dessen Integration in die pluridisziplinären Konzepte fördern, seine Prävalenz erhöhen und müsste sich aufgrund der Effektivität in vielen Bereichen zu einem fest etablierten Wert entwickeln.

In einer Zeit, in der bei einigen die physiologisch notwendige Beanspruchung der Bewegungssysteme markant abnimmt – bei ändern der Anteil und die Präsenz stereotyper und einseitiger Trainingsmassnahmen eher zunimmt, ist der Stellenwert von sensorischen Stimulationen, welche das intermuskuläre Zusammenspiel zwischen den lokalen und globalen Muskelsystemen sowie den gelenknahen arthrokinesematischen Muskelfasern optimieren, ein überzeugender arthroneuromuskulärer Gewinn für den Alltag, für bestimmte therapeutische Indikationen sowie wichtige sportliche Zielstellungen. Dabei ist SMT vergleichsweise leicht erlern- und optimierbar, vermittelt deutlicher als andere Massnahmen unmittelbare Biofeedbacks, welche einerseits die aktuellen Insuffizienzen aufzeigen und sich andererseits über adaptive posturale Vorgänge sowie durch selektiv verbesserte Bewegungsergebnisse rasch bemerkbar machen. In der Folge sind diese auch als subjektive Wahrnehmungen hinsichtlich Stabilität, kinetischer Kompaktheit sowie erhöht dynamisierter Leistungsfähigkeit feststellbar.

So gesehen, ist nicht nur das Leben, sondern auch das Gehirn eine Baustelle. Die lebenslang vorhandene Fähigkeit, Verknüpfungen neu zu bilden und auch wieder zu lösen, ermöglicht jene Leistungen, die den Menschen zum Menschen machen. Erst, indem ich mich verhalte, eröffne ich Möglichkeiten. Sensorisch betrachtet bedeutet dies, den Handlungen einen Sinn zu erteilen.

Korrespondenzadresse:

Thomas Gisler-Hofmann, **medibalance**, Bewegungs- und Leistungsphysiologie, Gislistrasse 11, 6006 Luzern, Telefon 041 370 17 18, E-Mail: gisler@medibalance.ch

Literaturverzeichnis

Aston-Miller J.A., Wojtyś E.W., Huston L.J., Fry-Welch D. (2001): Can proprioception really be improved by exercise? *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 9: 128–136.

Augustin I., Betz A., Hermann C., Jo T., Brose N. (1999): Differential expression of two novel Munc13 proteins in rat brain. *Biochem. J.* 337: 363–371.

Bakhtyari A.G., Safavi-Favokhi Z., Aminian A. (2007): Delayed onset muscle soreness. *Br. Med. J.* 41: 145–148.

Berchold N.C., Kesslak J.P., Pike C.J., Adlard P.A., Cotman C.W. (2001): Estrogen and exercise interact to regulate brain-derived neurotrophic factor mRNA and protein expression in the hippocampus. *Eur. J. Neurosci.* 14: 1992–2002.

Bloem B.R., Allum J.H.J., Carpenter M.G., Honegger F. (2000): Is lower leg proprioception essential for triggering human automatic postural responses? *Exp. Brain* 130: 375–391.

Boden B.P., Dean G.S., Feagin J.A. Jr., Garrett W.E. Jr. (2000): Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthop.* 23: 573–578.

Bruhn S., Gollhofer A. (2001): Neurophysiologische Grundlagen der Propriozeption und Sensomotorik. *Med. Orthop. Tech.* 121: 66–71.

Bruhn S., Gollhofer A., Lohrer H. (2000): Funktionelle Stabilität am Kniegelenk – Verletzungs- und trainingsbedingte Unterschiede. *Sportorthop.–Sporttraumatol.* 3: 145–154.

Caraffa A., Cerulli G., Proietti M.G., Rizzo A. (1996): Prevention of anterior cruciate ligament injuries in soccer. A prospective controlled study of proprioceptive training. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 4: 19–21.

Carro E., Nunez A., Busiguina S., Torres-Aleman I. (2000): Circulating insulin-like growth factor I mediates effects of exercise on the brain. *J. Neurosci.* 20: 2926–2933.

Chen H.H., Nigg B.M., Hulliger M., de Koning J. (1995): Influence of sensory input on plantar pressure distribution. *Clin. Biomech* 10: 271–274.

Cotman C.W., Berchold N.C. (2002): Exercise: A behavioral intervention to enhance brain health and plasticity. *Trends Neurosci.* 25: 395–301.

Cotman C.W., Engesser-Cesar C. (2002): Exercise enhances and protects brain function. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 30: 75–79.

DeMorat G., Weinhold P., Blackburn T., Chudik S., Garrett W. (2004): Aggressive quadriceps loading can induce noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am. J. Sports Med.* 31: 477–483.

Elbert T., Pontex C., Wienbruch C., Rockstroff B., Taub E. (1995): Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science* 270: 305–307.

Engert F., Bonhoeffer T. (1999): Dendritic spine changes associated with hippocampal long-term synaptic plasticity. *Nature* 399: 66–70.

Faude O., Junge A., Kindermann W., Dvorak J. (2005): Injuries in female soccer players: a prospective study in the German national league. *Am. J. Sports Med.* 33: 1694–1700.

Fischer-Rasmussen T., Jensen P.E. (2000): Proprioceptive sensitivity and performance in anterior cruciate ligament-deficient knee joints. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 10: 85–89.

Gammaitoni L., Hänggi P., Jung P., Marchesoni F. (1998): Stochastic resonance. *Rev. Mod. Phys.* 1: 224–287.

Gisler T. (2007a): Muskuläre Dysbalancen und Dysharmonien – Bekannte Unbekannte. *Schule konkret* 5/07: 21–25.

Gisler T. (2007b): Stretching – ein Auslaufmodell? – Einflussnahme auf Muskeltonus, Muskellänge und artikuläre Strukturen. *Schweiz. Zschr. Sportmed. Sporttraumatol.* 55: 139–148.

Giza E., Mithofer K., Farrell L., Zarins B., Gill T. (2005): Injuries in women's professional soccer. *Br. J. Sports Med.* 39: 212–216.

Goertzen M., Gruber J., Dellmann A., Clahsen H., Schulitz K.P. (1993): Neurohistologische Untersuchungen bei allogenen Kreuzbandtransplant als intraartikularer Bandersatz. *Zschr. Orthop.* 131: 420–424.

Granacher U., Gruber M., Strass D., Gollhofer A. (2007): Auswirkungen von sensorischem Training im Alter auf die Maximal- und Explosivkraft. *Dtsche Zschr. Sportmed.* 58: 446–451.

Gruber M., Gollhofer A. (2004): Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *Eur. J. Appl. Physiol.* 92: 98–105.

Haas C.T., Schulze-Cleven K., Turbanski S., Schmidtbleicher D. (2005): Improved sensorimotor control is not connected with improved proprioception. *Br. J. Sports Med.* 39: 388 (abstract).

Haas C.T., Turbanski S., Markitz S., Kaiser I., Schmidtbleicher D. (2006a): Stochastische Resonanz in der Therapie von Bewegungsstörungen. *Bewegungsther. Gesundheitssport* 22: 58–61.

Haas C.T., Turbanski S., Schmiedbleicher D. (2004): Neural and mechanical rhythms in rehabilitative balance training. *Isokin. Exerc. Sci.* 12: 54–55.

Haas C.T., Turbanski S., Schwed M., Schmiedbleicher D. (2006b): Neuronale Korrelate apparativ gestützter Trainingsformen. In: Sporttechnologie zwischen Theorie und Praxis, Witte K., Edelman-Nusser J., Sabo A., Moritz E.F. (Hrsg.), Shaker, Aachen, SS. 37–48.

Haus J., Halata Z., Refior H.J. (1992): Propriozeption im vorderen Kreuzband des menschlichen Kniegelenkes – morphologische Grundlagen. *Zschr. Orthop.* 130: 484–494.

Heidt R.S. Jr., Sweeterman L.M., Carlonas R.L., Traub J.A., Tekulve F.X. (2000): Avoidance of soccer injuries with preseason conditioning. *Am. J. Sports Med.* 28: 659–662.

Hollmann W., Strüder H.K., Tagarakis C.V.M. (2003): Körperliche Aktivität fördert Gehirngesundheit und -leistungsfähigkeit – Übersicht und eigene Befunde. *Nervenheilkunde* 9: 467–474.

- Issurin V.B., Liebermann D.G., Tenenbaum G. (1994): Effect of vibratory stimulation training on maximal force and flexibility. *J. Sports Sci.* 12: 561–566.
- Kennedy P.M., Inglis J.T. (2002): Distribution and behaviour of glabrous cutaneous receptors in the human foot sole. *J. Physiol. (Lond.)* 538: 995–1002.
- Lephart S.M., Riemann B.L., Fu F.H. (2000): Introduction to the sensorimotor system. In: Proprioception and neuromuscular control in joint stability, Lephart S.M., Fu F.H. (Eds.), Human Kinetics, Champaign, pp. (UB: Seitenzahlen fehlen)
- Li G., Rudy T.W., Sakane M., Kanamori A., Ma C.B., Woo S.L.-Y. (1999): The importance of quadriceps and hamstrings muscle loading on knee kinematics and in-situ forces in the ACL. *J. Biomech.* 32: 395–400.
- Liu W., Maitland M.E. (2000): The effect of hamstring muscle compensation for anterior laxity in the ACL-deficient knee during gait. *J. Biomech.* 33: 871–879.
- McCall G.E., Grindeland R.E., Roy R.R., Edgerton V.R. (2000): Muscle afferent activity modulates bioassayable growth hormone in human plasma. *J. Appl. Physiol.* 89: 1137–1141.
- Melov S., Tarnopolsky M.A., Beckman K., Felkey K., Hubbard A. (2007): Resistance exercise reverses aging in human skeletal muscle. *PLoS ONE* 2: e465.
- Myklebust G., Engebretsen L., Braekken I., Skjølberg A., Olsen O.-E., Bahr R. (2003): Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball players: A prospective intervention study over three seasons. *Clin. J. Sport Med.* 13: 71–78.
- Norrie R.G., Maki B.E., Stianes W.R., McIlroy W.E. (2003): The time course of attention shifts following perturbation of upright stance. *Exp. Brain Res.* 146: 315–321.
- Prätorius B., Kimmeskamp S., Milani T.L. (2003): The sensitivity of the sole of the foot in patients with Morbus Parkinson. *Neurosci. Lett.* 346: 173–176.
- Rankin J., Woollacott M.H., Shumay-Cook A., Brown L. (2000): Cognitive influence on postural control stability: a neuromuscular analysis in young and elders. *J. Gerontol.* 55: M112–M119.
- Redferna M.S., Müller M.L.T.M., Richard Jennings J., Furman J.M. (2002): Attentional dynamics in postural control during perturbations in young and older adults. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* 57: 298–303.
- Robbins S., Waked E., Rappel R. (1995): Ankle taping improves proprioception before and after exercise in young men. *Br. J. Sports Med.* 29: 242–247.
- Schmidt R., Benesch S., Bender A., Claes L., Gernos H. (2005): Die Trainierbarkeit von propriozeptiven und koordinativen Parametern bei der chronisch-funktionellen Sprunggelenkstabilität. *Zschr. Orthop.* 143: 227–232.
- Söderman K., Werner S., Pietila T., Engström B., Alfredson H. (2000): Balance board training: prevention of traumatic injuries of the lower extremities in female soccer players. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 8: 356–363.
- Turbanski S., Haas C.T., Schmidtbleicher D. (2005): Effects of random whole-body-vibration on postural stability in Parkinson's disease. *Res. Sports Med.* 13: 243–257.
- Tunik E., Poinzner H., Levin M.F., Adamovich S.V., Messier J., Lamarre Y., Feldman A.G. (2003): Arm-trunk coordination in the absence of proprioception. *Exp. Brain Res.* 153: 343–355.
- Verhagen E., van der Beek A., Twisk J., Bouter L., Bahr R., van Mechelen W. (2004): The effects of a proprioceptive balance board training program for the prevention of ankle sprains. *Am. J. Sports Med.* 32: 1385–1393.
- Zazulak B.T., Hewett N., Reeves P., Goldberg B., Cholewicki J. (2007): The effects of core proprioception knee injury. *Am. J. Sports Med.* 35: 368–373.
- Zimmy M.L., Wink C.S. (1991): Neuroreceptors in the tissues of the knee joint. *J. Elektromyogr. Kinesiol.* 1: 148–157.