

Moderne Rehabilitation von Gleichgewichtsstörungen mit Hilfe von Neurofeedback-Trainingsverfahren

Im Gegensatz zu anderen sensorischen Informationssystemen (z. B. Hör-, Seh- und Geruchssinn) ist der Gleichgewichtssinn in unserem Bewusstsein selten präsent. Dies ändert sich jedoch nachhaltig, wenn eine Störung im vestibulären System bzw. in seinen Teilsystemen eintritt und das Leitsymptom Schwindel den Betroffenen zum Patienten macht.

Das vestibuläre System erhält einen kontinuierlichen Informationsfluss über die Position und die Bewegungen des Körpers, wobei die informative Rückkopplung von Kopf und Augen voneinander unabhängig erfolgen muss, so dass z. B. die Augen auf einem Punkt fixiert sein können, wenn auch der Kopf sich bewegt. Um seine sensorimotorische Integrationsfunktion erfüllen zu können, ist das vestibuläre System aus 3 Bestandteilen konstituiert:

- dem peripheren und zentralen Anteil des vestibulären Systems, der Rezeptorfelder zur Reizaufnahme enthält (Bogengänge und Makulaorgane) und der Weiterleitung vestibulärer Informationen und ihrer zentralen Verarbeitung dient,
- dem vestibulookulären Anteil (Reflexbahn) des vestibulären Systems, der die visuelle Kontrolle über die Lage im Raum ausübt,
- dem vestibulospinalen (propriozeptiven) Anteil des vestibulären Systems, der durch sensible und Mechanorezeptoren Informationen über die Glieder- bzw. Muskelposition und -spannung (somit die Lage- und Be-

wegungsempfindung) vermittelt und der willkürlichen bzw. unwillkürlichen Kontrolle der Spinalmotorik (Kontrolle des Ruhetonus der Streckmuskulatur) dient.

Eine klinisch manifeste, akute Störung im Vestibularsystem führt zu einem Verlust der Tonusbalance innerhalb der Teilsysteme bzw. zu einem Überwiegen einer Seite. Akute Vestibulariserkrankungen (z. B. Neuropathia vestibularis) beginnen zumeist mit einer heftig ausgeprägten, mit vegetativen Begleitsymptomen verknüpften klinischen Symptomatik, klingen jedoch zumeist nach einigen Tagen ab. Durch zentrale Kompensationsmechanismen schafft es das Vestibularsystem in den überwiegenden Fällen innerhalb einiger Wochen, einen für den Patienten so erfahrbaren Normalzustand wieder herzustellen.

➤ Nur wenige Patienten erleiden eine Chronifizierung ihrer Beschwerden

Nur einige wenige Patienten erleiden nach einer akuten Gleichgewichtsstörung eine Chronifizierung ihrer Beschwerden. Dazu zählen insbesondere komplexe (z. B. posttraumatische) Gleichgewichtsstörungen, isolierte Otolithenfunktionsstörungen, der Schwindel des alternden Menschen (Presbyvertigo) und der iatrogene Schwindel (z. B. nach Exstirpation von Akustikusneurinomen).

Diese Schwindelformen sind mittels medikamentöser und physiotherapeu-

tisch-selbstübender Maßnahmen bislang nicht immer erfolgreich behandelbar.

Spezialisierte Physiotherapie und Eigenübungen

Wie bereits beschrieben, entsteht im Falle einer einseitigen peripher-vestibulären Läsion ein Seitenunterschied hinsichtlich des afferenten Inputs in die zentralen Gleichgewichtsstrukturen. Das führt zu einem Tonusungleichgewicht, welches sich klinisch als Schwindel äußert. Bei sistierender Seitendifferenz ist es möglich, ein neues Tonusgleichgewicht herbeizuführen, um somit eine mehr oder weniger komplette Rehabilitation zu erreichen (vestibuläre Kompensation) [12]. Diese Erholungsvorgänge werden meist durch nichtvestibuläre, aber mit dem vestibulären System kooperierende Sinnesindrücke (z. B. visuelle oder propriozeptive) unterstützt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sind spezielle Behandlungsverfahren im Sinne eines vestibulären Trainings zur Förderung der zentralvestibulären Kompensation entwickelt worden. Das Grundprinzip des vestibulären Trainings besteht darin, durch gezielte wiederholte Reizungen eine Kompensation anzustreben. So gibt es z. B. Trainingsprogramme, die verschiedene Balanceaufgaben [17] oder spezielle Tai-Chi-Übungen [13] verwenden. Bei anderen Methoden befindet sich der Patient in einem Simulator, mit dessen Hilfe Übungen in einer virtuellen (visuellen) Realität durchgeführt werden [19, 15].

D. Basta · A. Ernst

Moderne Rehabilitation von Gleichgewichtsstörungen mit Hilfe von Neurofeedback-Trainingsverfahren

Zusammenfassung

Die konservative Therapie von Gleichgewichtsstörungen hat in den letzten Jahren durch den Einsatz von Neuro(bio)feedbackverfahren eine deutliche Erweiterung erfahren. Bei diesen Verfahren erhält der Patient während der Durchführung von Gleichgewichtsübungen einen (akustisch, galvanisch oder vibrotaktile) Zusatzreiz, der ihm das Ausmaß der Abweichung von einer angenommenen Körpernormallage signalisiert. Dieser Reiz wird durch das Neurofeedbacksystem appliziert, das gleichzeitig während der Übungen des Patienten dessen Kör-

perlage fortlaufend analysiert, mit internen Normwerten abgleicht und dann im entsprechenden Ausmaß den Zusatzreiz gibt. In ersten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich insbesondere bei komplexen oder langanhaltenden, chronischen Gleichgewichtsstörungen dadurch ein verbessertes Therapiepotenzial ergibt.

Schlüsselwörter

Neurofeedback · Schwindel · Gleichgewichts-training · Gleichgewichtsstörungen · Therapiepotenzial



Abb. 1 ▲ Galvanisch arbeitendes Neurofeedbacksystem BrainPort®

Neurofeedbackverfahren

In den letzten Jahren haben sich verschiedene medizinisch-wissenschaftliche und medizintechnische Versuche etabliert, um Gleichgewichtsstörungen mit technischen Hilfen zu rehabilitieren. Diese sog. Neurofeedbacksysteme sind eine konservative Therapiealternative bei akuten und chronifizierten Gleichgewichtsstörungen. Sie signalisieren dem Patienten Abweichungen aus der Körpernormallage, damit eine Korrekturbewegung stattfinden kann.

So schlug Wall erstmals 2003 [20] sog. Vestibularisprothesen vor, die die Funktion eines ausgefallenen Gleichgewichtsorgans übernehmen sollten. Dabei wurde noch zwischen implantierbaren Systemen (die in das Gleichgewichtsorgan als elektrisch betriebene Prothese ähnlich wie bei Kochleaimplantaten eingepflanzt werden) und nichtimplantierbaren Systemen unterschieden. Die Letzteren sollen am Körper angebracht und mit Sensoren versehen den Probanden warnen, wenn er eine Ideallage (über vorher eingestellte Maximalwerte in der Horizontal- und Vertikalebene) verlässt. Die Übermittlung des Stimulus sollte vibrotaktile erfolgen, wobei eine permanente Verbindung zu einem Steuercomputer erforderlich ist.

Der Einsatz von Neurofeedbackverfahren war bis vor kurzem deshalb lediglich im Laborversuch möglich. Bei Jugendlichen und Erwachsenen im erwerbsfähigen

Modern rehabilitation for vestibular disorders using neurofeedback training procedures

Abstract

The conservative therapy of long-lasting vestibular disorders has been changed over the last few years by the introduction of neuro(bio-)feedback procedures. A technical neurofeedback system applies an additional (acoustic, galvanic, vibrotactile) stimulus to the patient while performing vestibular exercises. This stimulus is dependent on the extent of postural deviation of the patient from a normal (ideal) position in space. The neurofeedback system is body worn and continuously registers any postural deviation from

the normal position so that it can apply suitable stimuli to the patient. This new way of rehabilitating patients with vertigo seems to be a promising addition in the therapy of long-lasting, complex vestibular disorders as recent studies have demonstrated.

Keywords

Neurofeedback · Vertigo · Vestibular rehabilitation · Vestibular disorders · Therapeutic potential

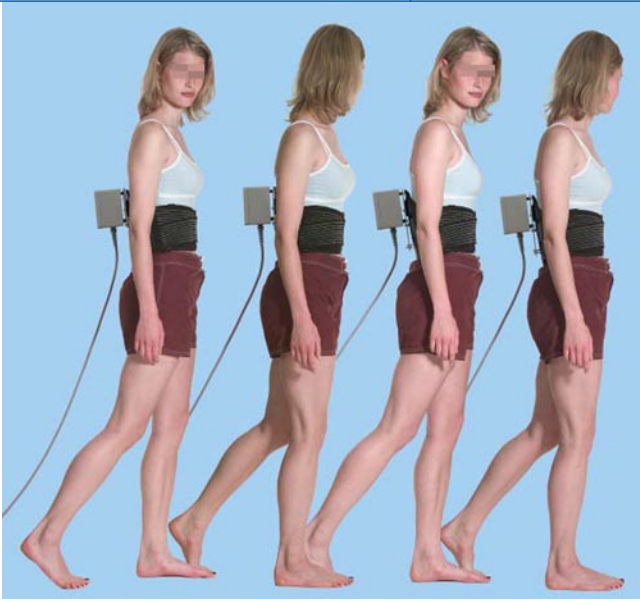


Abb. 2 ◀ Akustisch arbeitendes Neurofeedbacksystem Sway-Star®

higen Alter führen Gleichgewichtsstörungen (z. B. nach Schädel-Hirn-Traumen im Rahmen von Arbeitsunfällen) jedoch häufig zu Erwerbslosigkeit und/oder dauernder Invalidität. Jenseits des 80. Lebensjahres kommt es bei der Hälfte der Senioren einmal im Jahr zu einem Sturz. Dies wird durch die demografische Entwicklung zu einem Massenphänomen. Allein in der EU sterben jährlich 80.000 Menschen nach Sturzereignissen mit einer Prävalenz des weiblichen Geschlechts (WHO 2005). Deshalb ist sowohl gesundheitsökonomisch als auch politisch die Entwicklung effizienter technischer Systeme für die Vestibularisrehabilitation wünschenswert.

Neurofeedbackverfahren verfolgen die Optimierung des Vestibularisstrainings durch eine simultane Darbietung von nichtvestibulären Informationen. Dabei wird parallel die Richtung und das Ausmaß der Körperschwankung bei bestimmten Gleichgewichtsübungen bestimmt und rückgekoppelt ein nichtvestibulärer Reiz angeboten, um das Vestibularisstraining zu optimieren. Diese Neurofeedbacksysteme leiten ihre Informationen über taktile [10, 20], galvanische [18] oder auditorische [9] Signalwege dem Patienten zu.

Galvanische Form

Das galvanische Neurofeedbacktraining (BrainPort®) arbeitet mit Hilfe einer Feedback-Elektrostimulation auf der

Zunge des Patienten (■ **Abb. 1**). Dabei wandert ein leichter, als Kribbeln wahrgenommener Strom über ein netzartiges Elektrodenarray in die Richtung, in die der Patient schwankt. Der Patient soll lernen, den Stromreiz in der Mitte des Arrays zu halten und somit ein Wandern der Stromempfindung bzw. ein Schwanken zu verhindern [6]. Aufgrund der Verwendung von Beschleunigungssensoren für die Schwankungsmessung ist mit dem Gerät leider nur ein Training von Stehübungen möglich. Daher eignet es sich bevorzugt für komplexe Gleichgewichtsstörungen, wie sie z. B. nach einem Schlaganfall auftreten [6].

Auditorische Form

Das auditorische Neurofeedbacktraining (Sway-Star®) umgeht dieses Problem durch die Verwendung von Gyrometern zur Messung der Körperschwankung [1]. Gyrometer ermitteln anhand der Coriolis-Kraft die Winkelgeschwindigkeit einer Schwankung, wodurch es möglich wird, auch komplexe Gangübungen (z. B. laufen auf weichem Untergrund, Treppenteigen usw.) mit Hilfe eines Feedbacksignals zu trainieren. Beim auditorischen Neurofeedbacktraining wird dem Patienten das Überschreiten bestimmter übungsspezifischer Schwellen über ein Tonsignal angezeigt (■ **Abb. 2**).

Dabei kommt der Ton aus der Richtung, in der die Schwelle für die Körperschwankung überschritten wurde. Dafür

werden 4 Lautsprecher im Abstand von 90° in einem ruhigen Raum (mindestens 5×5 m) installiert. Die Tonhöhe des Signals unterscheidet sich zudem in jeder Richtung, um die Zuordnung der Signalquelle zu erleichtern. Der Ton wird bei einer überschwelligen Schwankung um so lauter, je größer die Differenz zwischen dem Schwellenwert und dem Messwert ist. Die Werte für die Ansprechschwellen des auditorischen Feedbacks können vor jedem Training patienten- und übungsspezifisch angepasst werden. Dabei sind die Schwellen so gewählt, dass der Patient noch in der Lage ist, erfolgreich durch Ausgleichsbewegungen auf die Feedbacksignale zu reagieren. Leider lässt sich das Trainingssystem nur stationär installieren.

Es konnte gezeigt werden, dass Patienten mit einem beidseitigen Ausfall der Bogengangfunktion während der Aktivierung eines auditorischen Feedbacksystems ihre Körperschwankung signifikant verringern [9, 7].

Einsatz bei Otolithenerkrankungen

Die konventionelle Therapie bei beidseitigen Otolithenfunktionsstörungen ist besonders problematisch, da nur etwa 35% der Patienten eine geringfügige Verbesserung der Gleichgewichtskontrolle nach Absolvierung eines Trainingsprogramms mit konventionellen Trainingsmethoden auf dem Balancebrett angeben [8]. Deshalb wurde zur Rehabilitation von Patienten mit Otolithenfunktionsstörungen ein spezielles Trainingskonzept unter Verwendung eines auditorischen Feedbacksystems entwickelt. Dabei ist zu bedenken, dass sich ein Feedbacksystem auf einen konkreten Parameter für das Feedback beziehen muss. Dieser sollte idealerweise mit der bei dem jeweiligen Patienten bestehenden Ätiologie der Erkrankung korrespondieren. Frühere Untersuchungen [3] zeigten, dass Schwankungen von Patienten mit einer Otolithenfunktionsstörung bei Gang- und Standaufgaben insbesondere durch die Winkelgeschwindigkeit charakterisiert werden. Deshalb wurde dieser Parameter als Sollwertparameter für die Feedbackschleife verwendet.

Hier steht eine Anzeige.



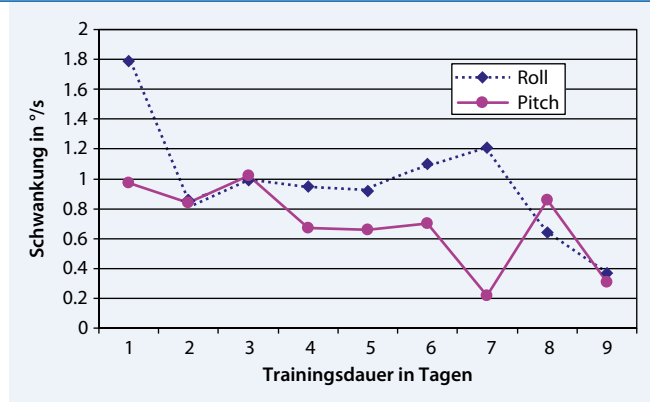


Abb. 3 ▲ Das mobile Vertiguard®-Neurofeedbacksystem während des Gleichgewichtstrainings

► **Für Patienten mit Otolithenfunktionsstörungen wurde ein auditorisches Feedbacksystem entwickelt**

Da sich eine spezifische Funktionsstörung der peripher-vestibulären Rezeptoren sehr deutlich auf die posturale Kontrolle bei Gang- und Standaufgaben [14] bzw. zusätzlicher Deprivation sensorischer Inputs auswirkt [16], ist eine ausführliche posturographische Untersuchung im Freifeld (möglichst alltagsrelevante Übungen) die Voraussetzung eines erfolgreichen Neurofeedbacktrainings. Deshalb wurde z. B. bei Patienten mit einer Otolithenfunktionsstörung die Oberkörperschwankung unter den verschiedenen sensorischen Bedingungen des Standard-Balance-Defizit-Tests (SBDT) ermittelt. Der SBDT enthält die folgenden Konditionen: Stehen (Augen offen/geschlossen), Stehen auf einem Bein (Augen offen/geschlossen), Tip-Top-Schritte, Stehen auf Schaumstoff (Augen offen/geschlossen), Stehen auf Schaumstoff auf einem Bein, Tip-Top-Schritte auf Schaumstoff, Laufen und Koppfrotieren, Laufen und Kopfnicken, Laufen mit geschlossenen Augen, Treppensteigen, Lau-

Abb. 4 ► Reduzierung der Oberkörperschwankung eines Patienten mit einseitiger Otolithenfunktionsstörung durch vibrotaktilen Neurofeedbacktraining. Trainiert wurde hier die Kondition „Stehen mit geschlossenen Augen auf einer Schaumstoffmatte“



fen über Hindernisse (23 cm hoch). Gerade bei Patienten mit einer Otolithenfunktionsstörung ist die Messung der Oberkörperschwankung besonders indikativ für die Diagnose einer eingeschränkten posturalen Kontrolle [4].

Für das auditorische Neurofeedbacktraining von otolithenfunktionsgestörten Patienten wurden die folgenden, besonders häufig als pathologisch bewerteten Konditionen des SBDT [3] verwendet:

- Stehen (Augen geschlossenen),
- Stehen auf Schaumstoff (Augen offen),
- Stehen auf Schaumstoff (Augen geschlossen),
- 8 Tandemschritte auf Schaumstoff (Augen offen).

Nachdem jede Übung 2 Wochen lang (ohne Wochenende) täglich jeweils 5-mal absolviert wurde, zeigten etwa 85% der Patienten eine signifikant geringere Körperschwankung auch ohne Feedback. Alters- und geschlechtsrelationierten Patienten, die das gleiche wenig intensive Trainingsprogramm ohne auditorische Feedbacksignale durchführten, zeigten hingegen zu keinem Zeitpunkt des Trainings eine signifikante Verringerung ihrer Körperschwankung [5].

Die Reduzierung der Oberkörperschwankung verläuft innerhalb des Zeitraums des Neurofeedbacktrainings stets als Zickzackkurs mit ansteigendem Trend. Das ist kennzeichnend für eine allmähliche vestibuläre Kompensation. Die Patienten scheinen die zusätzliche Information hinsichtlich ihrer Körperschwankung über den auditorischen Signalweg sinnvoll verarbeiten zu können und dadurch ihre posturale Kontrolle auch unter eingeschränkten sensorischen Bedingungen zu

verbessern. Das ist sehr bedeutsam, da Situationen mit depriviertem visuellem und propriozeptivem Input für die untersuchte Patientenklitel im Alltag eine besonders große Schwierigkeit darstellen.

Die Verwendung eines sensorischen Feedbacksystems begünstigt die Rehabilitation im Sinne der zentralen Kompensation in erheblichem Maße. Wahrscheinlich liegen diesem Vorgang Prozesse des Reiz-Reaktions-Lernens zugrunde, wobei der unbedingte Reiz das Feedbacksignal darstellt. Den bedingten Reiz bilden die entsprechend der gewählten Konditionen (Schaumstoff, Augen geschlossen) verbliebenen kinästhetischen Afferenzen der Propriozeption. Das Feedbacksignal übernimmt in der initialen Phase des Trainings seine Signalfunktion durch eine komplexe operante Konditionierung hinsichtlich der Vermeidung einer Tonperzeption (beim auditorischen Neurofeedback). Nur durch diese Prozesse ist es zu erklären, dass der Patient seine Körperhaltung nach dem Training auch ohne das Feedbacksignal signifikant besser kontrollieren kann als zuvor. Es bleibt zu untersuchen, wie lange der Trainingseffekt anhält. Da zentrale vestibuläre Signalkreise eng mit dem limbischen System verknüpft sind [2], kann davon ausgegangen werden, dass sich der hohe Extinktionswiderstand emotional verknüpfter Konditionierungen [11] auf die längerfristigen Erfolgsaussichten der Therapie positiv auswirkt.

Vibrotaktilen Neurofeedback

Aktuell ist ein neuartiges Neurofeedbacksystem (Vertiguard®) im Einsatz, das für das Gleichgewichtstraining von Gang- und Standaufgaben geeignet ist. Es wird an einem Hüftgürtel getragen und ist

sehr klein, leicht sowie flexibel einsetzbar (■ **Abb. 3**). Durch das Konzept des vibrationsgetriebenen Feedbacks ist das Training nicht mehr an einen bestimmten Raum mit entsprechenden Installationen gebunden. Somit ist ein Training zu Hause sowie ein Einzel- oder Gruppentraining in der physiotherapeutischen bzw. HNO-ärztlichen Praxis möglich.

Die Analyse der Körperschwankung als Voraussetzung für die Planung eines gezielten Trainingsprogramms wird in Verbindung mit einem Computer über das gleiche Gerät durchgeführt. Während des Feedbacktrainings sind 4 Vibrationspads am Hüftgürtel befestigt (■ **Abb. 3**). Es wird jeweils das Pad aktiviert, das sich in der Schwankungsrichtung des Patienten befindet. Die Vibration wird zudem umso stärker, desto mehr der Patient schwankt. Die Ansprechschwelle ist in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht des Patienten sowie von der gewählten Übung im Gerät gespeichert.

Außerdem kann diese zusätzlich vom Patienten oder durch den Therapeuten manuell individualisiert werden. Das ist besonders im Verlauf des Trainingsprogramms wichtig, da sich mit zunehmend verbesserter posturaler Kontrolle die Ansprechschwellen erhöhen und nachjustiert werden müssen. Zudem gibt die Veränderung dieser Einstellung dem Patienten und dem Therapeuten eine Information über den bisherigen Trainingserfolg. Da die Schwellen für bis zu 6 Übungen im Gerät individuell gespeichert und per einfachem Tastendruck angewählt werden können, sind keine besonderen Qualifikationen für die Durchführung des Trainings nötig, was den Trainingserfolg v. a. im Heimtraining verbessern sollte. Erste klinische Ergebnisse dieser Methode sind vielversprechend. So zeigte sich nach dem vibrotaktilen Neurofeedbacktraining eine geringere Oberkörperschwankung eines Patienten mit einseitiger Otolithenfunktionsstörung (■ **Abb. 4**).

Fazit

Gleichgewichtsstörungen werden in den alternden westlichen Gesellschaften eine zunehmende Rolle in der HNO-Praxis und darüber hinaus spielen. Das frühzeitige Erkennen von Alterungsprozessen

im Vestibularsystem und das schnelle Erkennen einer ausbleibenden Kompensation nach akuter Gleichgewichtsstörung sind dabei die Aufgabe des HNO-Arztes. Mit den hier vorgestellten Neurofeedbackverfahren ergeben sich interessante und praxisnah gut durchführbare Therapiealternativen in der Behandlung der vorgenannten Gleichgewichtsstörungen.

Korrespondenzadresse

Dr. D. Basta

HNO-Klinik im ukb
Warener Straße 7, 12683 Berlin
Dietmar.basta@ukb.de

Danksagung. Die Arbeit wurde unterstützt durch das Verbundprojekt „Entwicklung einer innovativen Gleichgewichtsprothese“, gefördert durch das Deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF 01EZ0754).

Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- Allum JHJ, Carpenter MG (2005) A speedy solution for balance and gait analysis: angular velocity measured at the centre of body mass. *Curr Opin Neurol* 18: 15–21
- Balaban CD (2004) Projections from the parabrachial nucleus to the vestibular nuclei: potential substrates for autonomic and limbic influences on vestibular responses. *Brain Res* 996: 126–137
- Basta D, Todt I, Scherer H et al. (2005) Postural control in otolith disorders. *Hum Mov Sci* 24: 268–279
- Basta D, Clarke A, Ernst A, Todt I (2007) Stance performance under different sensorimotor conditions in patients with post-traumatic otolith disorders. *J Vestib Res* 17: 25–32
- Basta D, Singbartl F, Todt I et al. (2008) Vestibular rehabilitation by auditory feedback in otolith disorders. *Gait Posture* 2008 Mar 14 [Epub ahead of print], DOI: 10.1016/j.gaitpost.2008.01.006
- Danilov YP, Tyler ME, Skinner KL et al. (2007) Efficacy of electrocutaneous vestibular substitution in patients with peripheral and central vestibular loss. *J Vestib Res* 17: 119–130
- Dozza M, Horak FB, Chiari L (2007) Auditory biofeedback substitutes for loss of sensory information in maintaining stance. *Exp Brain Res* 32: 37–48
- Ernst A, Basta D, Seidl RO et al. (2005) Management of posttraumatic vertigo. *Otolaryngol Head Neck Surg* 132: 554–558
- Hegemann J, Honegger F, Kupper M, Allum JHJ (2005) The balance control of bilateral peripheral vestibular loss subjects and its improvement with auditory prosthetic feedback. *J Vest Res* 15: 1–8
- Kentala E, Vivas J, Wall C (2003) Reduction of postural sway by use of vibrotactile balance prosthesis in subjects with vestibular deficits. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 112: 404–409
- LaBar KS, Gatenby JC, Gore JC et al. (1998) Human amygdala activation during conditioned fear acquisition and extinction: a mixed-trial fMRI study. *Neuron* 20: 937–945
- Lockemann U, Westhofen M (1991) Course of early vestibular compensation after acute labyrinthine lesions. A clinical-experimental longitudinal study. *Laryngorhinootologie* 70: 326–329
- McGibbon CA, Wayne PM, Scarborough DM, Parker SW (2004) Tai Chi and vestibular rehabilitation effects on gaze and whole-body stability. *J Vestib Res* 14: 467–478
- Mergner T, Becker W (2003) A modelling approach to the human spatial orientation system. *Ann NY Acad Sci* 1004: 303–315
- Pavlou M, Lingeswaran A, Davies RA et al. (2004) Simulator based rehabilitation in refractory dizziness. *J Neurol* 251: 983–995
- Petersen H, Magnusson M, Johansson R (1995) Vestibular stimulation perturbs human stance also at higher frequencies. *Acta Otolaryngol* 520: 443–446
- Szturm T, Ireland DJ, Lessing-Turner M (1994) Comparison of different exercise programs in the rehabilitation of patients with chronic peripheral vestibular dysfunction. *J Vestib Res* 4: 461–479
- Tyler M, Danilov Y, Bach-Y-Rita P (2003) Closing an open loop control system: vestibular substitution through the tongue. *J Integr Neurosci* 2: 159–164
- Viiire E, Sitarz R (2002) Vestibular rehabilitation using visual displays: preliminary study. *Laryngoscope* 112: 500–503
- Wall C, Weinberg MS (2003) Balance prosthesis for postural control. *IEEE Eng Med Biol Mag* 22: 84–90