



Abb.: zabavna / fotolia.com

Posturale Kontrolle – Grundlagen

Die Kontrolle des Gleichgewichts gehört mit zu den faszinierendsten Fähigkeiten des Menschen. Das „Gleichgewichtssystem“ hat die Aufgabe, die Kontrolle des Schwerpunkts innerhalb der Unterstütsungsfläche zu gewährleisten. Nahezu alle menschlichen Bewegungen beinhalten diese Anforderung. Im Stehen besteht eine der großen Herausforderungen darin, den relativ hoch gelegenen Körperschwerpunkt über der relativ kleinen Unterstütsungsfläche (Füße) zu kontrollieren. Dieses „System“ ist derart flexibel, dass es die Kontrolle des Körperschwerpunkts in einer beinahe unendlichen Fülle von Aufgabenstellungen und Umweltsituationen erlernen bzw. gewährleisten kann.

Martin Huber

Forscher gehen davon aus, dass sich die ersten habituellen Zweibeinstehender und -geher vor ca. drei Millionen Jahren entwickelten [18]. In diesem Zusammenhang fanden umfassende Änderungen der Anatomie und der Neurophysiologie statt. Wie genial diese Veränderungen waren, machen die kläglich anmutenden Versuche, menschliche Bewegung (v. a. das Gehen) mittels humanoider Roboter zu imitieren, klar. Denn selbst die am weitesten entwickelten Modelle, wie Asimo von Honda, kommen an die Geschmeidigkeit und Flexibilität des menschlichen Gehens bzw. menschlicher Balancefähigkeiten nicht annähernd heran.

— Wie ist der Begriff „posturale Kontrolle“ definiert?

Posturale Kontrolle (PK) wird häufig auch als Balance oder Gleichgewicht bezeichnet. Bei genauerer Ansicht lassen sich diese Begriffe jedoch gegeneinander abgrenzen. Balance ist definiert als „Fähigkeit einer Person, nicht zu fallen“ [26]. Der Begriff PK geht darüber hinaus, denn er wird interpretiert als die Durchführung „einer Handlung, um die Balance in jeder Haltung oder Aktivität aufrechtzuerhalten, zu erlangen oder wieder zu erlangen“ [26]. In dieser differenzierten Definition schwingen schon die Einflüsse unterschiedlicher Aufgabenstellungen bzw. „Balancemechanismen“ mit (Näheres wird im Abschnitt „Bezugsrahmen für eine Analyse der PK“ behandelt).

— Wie steuert das Nervensystem das „Gleichgewicht“?

Posturale Kontrolle erfordert netzwerkartige Aktivitäten auf allen Ebenen des Nervensystems [14]. So sind das Rückenmark, der Hirnstamm, das Kleinhirn, die Basalganglien und der sensomotorische Kortex bei der Verarbeitung afferenter Information und der Generierung efferenter Impulse involviert [32]. Die Ansicht, dass Gleichgewichtskontrolle vor allem durch Reflexe hergestellt wird, gilt heutzutage als veraltet [9, 19]. Erstaunlicherweise ist v. a. in der Fachliteratur zum Thema Morbus Parkinson immer noch von „posturalen Reflexen“ die Rede [3].

Auf unterschiedlichsten Ebenen des Nervensystems finden also Verarbeitungs- und Steuerungsprozesse statt. Dies deutet schon darauf hin, dass Schädigungen in unterschiedlichen Bereichen des Nervensystems

zu unterschiedlichen Problemen mit der PK führen können und aus diesem Grund auch differenziert zu therapieren sind.

— Rolle des zerebralen Kortex

Antizipatorische posturale Anpassungen Der zerebrale Kortex ist an den sog. antizipatorischen posturalen Anpassungen (anticipatory postural adjustments, APAs → siehe auch Textabschnitt „Bezugsrahmen von Shumway-Cook und Woollacott“) beteiligt [14, 31]. Es wird angenommen, dass die APAs ein Vorgang im Rahmen der motorischen Planung einer Bewegung sind. Das heißt, das Nervensystem antizipiert die Folgen einer Bewegung (z.B. Destabilisation des Körperschwerpunktes durch eine Extremitätenbewegung) und „berücksichtigt“ das in der Planung. Die supplementär-motorische Area (SMA) ist hierin involviert.

Sensorische Informationen Teile des temporoparietalen Kortex sind bei der Integration sensorischer Informationen beteiligt und bilden ein internes Modell zur Wahrnehmung des aufrechten Standes (Vertikalität; Stichwort: Körperschema). Diese interne Repräsentation des Körpers basiert auf dem ständigen Zufluss sensorischer Informationen ins ZNS und ist eine wesentliche Grundlage für die Bewegungskontrolle [31, 19].

Aufmerksamkeit Ein weiterer Beitrag des Kortex ist die „Aufmerksamkeit“ [19]. Gut erkennbar ist die Bedeutung der Aufmerksamkeit für die posturale Kontrolle in Dual-Task-Situationen. Hier wird die reziproke Beeinflussung zwischen Motorik und Kognition deutlich. Wird ein Teil der Aufmerksamkeitsressourcen für eine kognitive Aufgabe benötigt, so kann es passieren, dass die parallel dazu ausgeführte Gleichgewichtsaufgabe darunter leidet und umgekehrt. Bekannt ist dieses Phänomen unter dem Slogan „Stops walking when talking“ [13] bzw. „Stops talking when walking“ [37].

Reaktion nach Perturbation Taube [34] weist darauf hin, dass der motorische Kortex auch an posturalen Reaktionen nach der äußeren Störung des Gleichgewichts (Perturbationen) beteiligt ist. Diese Reaktionen werden als „Long Latency“- oder „Late Phase“-Reaktionen bezeichnet [14]. Ihre Latenz beträgt ca. 85–100 ms nach der Pertur-

bation (z. B. Bodenbewegung im Bus). Diese Dauer ist ein Hinweis dafür, dass höhere Bereiche des ZNS mitaktiviert werden.

— Einfluss der subkortikalen Zentren

Zu diesen Bereichen zählen das vestibuläre System im Hirnstamm, das Zerebellum und die Basalganglien [28].

Posturale Synergien Dem Hirnstamm (genauer: die *Formatio reticularis*) wird die Organisation posturaler Synergien (s. weiter unten im Text) zugeordnet [19]. Bei der Anpassung dieser Synergien an die Anforderungen der Umwelt und der Aufgabe hat das Kleinhirn eine gewichtige Rolle. Diese beinhaltet die „Skalierung“ der Muskelkraft innerhalb posturaler Synergien bei unterschiedlich starken äußeren Destabilisationen. Das Kleinhirn ist außerdem an den auf Erfahrung basierenden Anteilen der posturalen Kontrolle beteiligt. Das korrespondiert mit der Aufgabe, die das Kleinhirn auch im Rahmen des motorischen Lernens hat [17]. In diesem Zusammenhang ist das Kleinhirn mit den Basalganglien für den Erwerb von Bewegungsprogrammen zuständig. Beide Regionen (Hirnstamm und Kleinhirn) sind funktionell sehr eng miteinander verbunden.

Sensorische Integration Des Weiteren werden sowohl dem Hirnstamm als auch dem Kleinhirn eine Beteiligung an der sensorischen Integration (interne Repräsentation, s. auch Kortex) zugesprochen. Teile des Kleinhirns (*Spinocerebellum*) erhalten viel Input über schnell leitende Bahnen der Propriozeption und der Oberflächensensibilität [19].

Zwei absteigende Systeme Zwei für die posturale Kontrolle wichtige, absteigende Systeme aus dem Hirnstamm projizieren in das Rückenmark. Es sind der *Tractus vestibulospinalis* und der *Tractus reticulospinalis*. Sie sind maßgeblich bei der Steuerung automatischer posturaler Antworten beteiligt.

Posturale Flexibilität Die Basalganglien sind bei schnellen Anpassungen der posturalen Kontrolle durch veränderte Bedingungen der Umwelt oder der Aufgabe gefordert [19]. Diese Fähigkeit wird auch als „posturale Flexibilität“ bezeichnet [34]. Darüber hinaus werden dort Bewegungen automatisiert [28].

— Aufgabe des Rückenmarks

Dem Rückenmark werden die sogenannten „short latency responses“ zugesprochen [14]. Das sind „Reflexantworten“ von Muskeln bei schnellen Dehnungen. Auslöser kann beispielsweise das Ausrutschen auf einem nassen Rasen sein. Diese „Reflexe“ sind jedoch keinesfalls ausreichend, um den Schwerpunkt über der Unterstützungsfläche angemessen koordiniert zu kontrollieren. Deshalb unterliegen diese Rückenmarkmechanismen starken hemmenden supraspinalen Einflüssen [34]. Diese „Reflexe“ sind funktionell wenig relevant und können allenfalls als erste, unspezifische Antwort auf Perturbationen angesehen werden [14].

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die unterschiedlichen Anteile des ZNS, wenn auch anatomisch voneinander getrennt, so doch funktionell auf das Engste miteinander verbunden sind. Der zerebrale Kortex beeinflusst die posturale Kontrolle direkt via kortikospinaler Verbindungen und indirekt über die „Kommunikation“ mit dem Hirnstamm [14]. Es sind v. a. die Bahnen des prämotorischen, supplementärmotorischen und des zingulären Kortex, die zum Hirnstamm projizieren [28]. Im Hirnstamm wiederum werden relevante Steuerungsprozesse generiert und via absteigender Bahnen und Rückenmark in die Peripherie transportiert. Im ZNS existiert ein dichtes Netzwerk verschiedener Strukturen, die in ihrer Gesamtheit für die posturale Kontrolle sorgen.

— Rahmenmodell

Um die Komplexität der posturalen Kontrolle differenziert und systematisch verstehen und analysieren zu können, schlagen viele namhafte Autoren und Autorinnen vor, einen sog. Bezugsrahmen („Framework“) zu verwenden [10, 11, 29, 20, 30].

In der Fachwelt am weitesten verbreitet sind die Bezugsrahmenmodelle von Shumway-Cook/Woollacott [12] (Abb. 1) und von Horak [9, 10] (Abb. 2). Darauf wird im Folgenden Bezug genommen.

Bezugsrahmen von Shumway-Cook und Woollacott („Interaktionsmodell“)

Nach Shumway-Cook & Woollacott [30] ist posturale Kontrolle das Ergebnis der Interaktion des Individuums (Mensch, der sich bewegt), der Aufgabe (Aktivität), die durchgeführt wird, und der Umwelt, in der die Aktivität stattfindet (Abb. 1). Im Weiteren wird

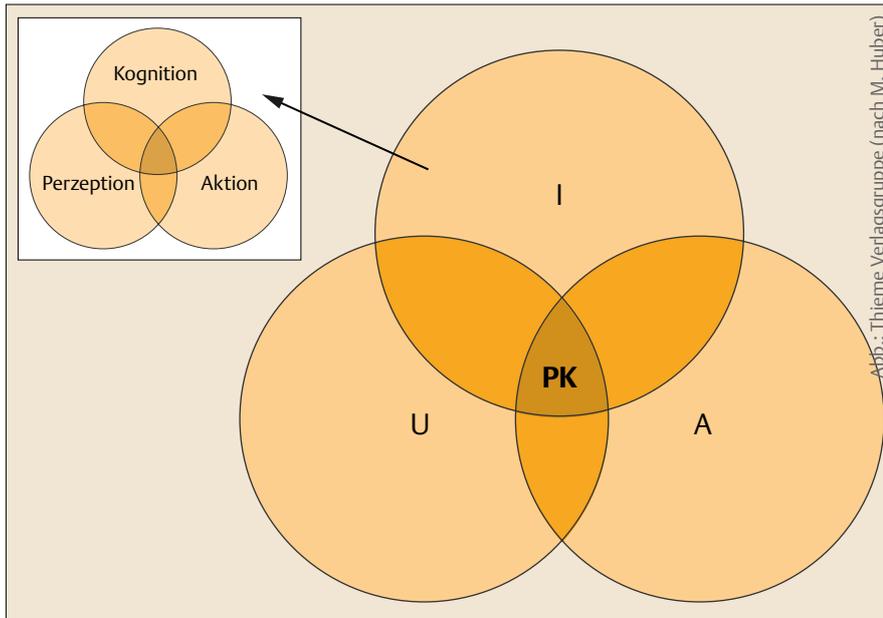


Abb.: Thieme Verlagsgruppe (nach M. Huber)

Abb. 1 Bezugsrahmenmodell in Anlehnung an Shumway-Cook / Woollacott [12]

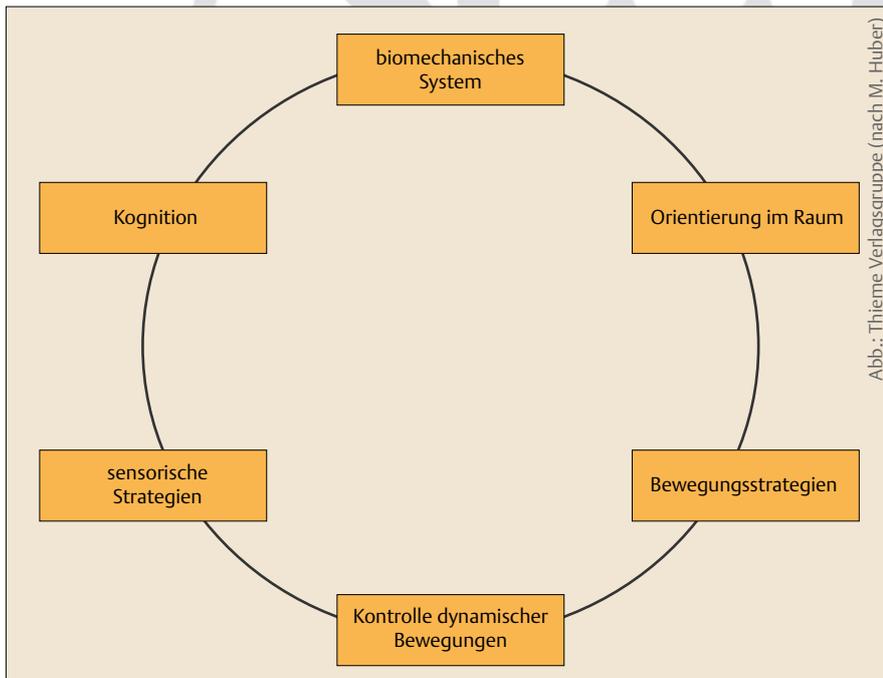


Abb.: Thieme Verlagsgruppe (nach M. Huber)

Abb. 2 Bezugsrahmenmodell in Anlehnung an Horak [9, 10]
A = Aktion, I = Individuum, PK = posturale Kontrolle, U = Umwelt

hierfür der Begriff „Interaktionsmodell“ verwendet. Vonseiten des Individuums sind drei grundlegende Aspekte gefordert: Aktion (Motorik), Perzeption (Sensorik) und Kognition.

Aktion

Unter den motorischen Aspekten wird u. a. ganz grundsätzlich der „Output des Nervensystems zu den Effektoren (Muskeln)“ verstanden [30]. Näher betrachtet gehören dazu

- die „posturale Stabilität“ (Aufrichtung gegen die Schwerkraft),
- Anteile der „posturalen Orientierung“ (biomechanische Voraussetzungen, angemessene Stellung der Körperabschnitte zueinander und zur Umwelt) und
- die „posturalen Synergien“ [12].

Es werden hauptsächlich drei Formen von posturalen Synergien beschrieben: die Sprunggelenk- und Hüftgelenkstrategie und

Schutzreaktionen (Schritte oder abstützen). Sie sind sowohl für die antizipative als auch für die reaktive posturale Kontrolle nötig [30].

Die antizipativen Anpassungen werden auch als „anticipatory postural adjustments“ (APAs) bezeichnet [22]. Sie sorgen für posturale Anpassungen vor der Durchführung einer fokalen Bewegung (z. B. eine Armhebung im Stehen). Die Extremitätenbewegung versetzt den Körperschwerpunkt in Bewegung. Diese „Störung“ wird im Voraus berechnet, und die entsprechenden Muskeln werden zur Sicherung der posturalen Kontrolle aktiviert. Wie weiter oben bereits beschrieben wurde, werden dabei u. a. Bereiche im motorischen Kortex und im Hirnstamm tätig. Das Kleinhirn sorgt für die angemessene Skalierung der Muskelaktivität, je nach (erwarteten) einwirkenden Kräften. Ebenso bringt es die bereits erlernten Erfahrungen mit dieser Aufgabe ein.

Daneben ist im Alltagsleben noch die reaktive posturale Kontrolle nötig. Sie sorgt für eine adäquate Kontrolle des Körperschwerpunkts in unvorhersehbaren Situationen (also „nicht antizipiert“). Solche Situationen können entstehen, wenn man ausrutscht, mit dem Fuß hängen bleibt, gestoßen wird u. Ä., aber auch wenn man etwas vom Boden aufhebt, beim Drehen oder bei Reichbewegungen. Die reaktive PK ist dann besonders wichtig zur Vermeidung von Stürzen [21].

Perzeption

Die Aufgabe der Perzeption besteht in der Integration des sensorischen Inputs. Dazu gehören Verarbeitungsprozesse auf verschiedenen Ebenen des Nervensystems (von der Peripherie über das Rückenmark zum Zwischenhirn und weiter zum Kortex). Die Verarbeitung der zahlreichen sensorischen Informationen (Visus, Vestibularorgane und Somatosensorik) hat u. a. die „sensorische Gewichtung“ (die der Situation angepasste Bewertung und Auswahl der sensorischen Informationen) [1] und das „Körperschema“ (innere Repräsentation des Körpers) zum Ergebnis [12]. Manche Autoren [9] verwenden den Begriff „posturale Orientierung“ (Orientierung im Körper und Orientierung im Raum) auch in diesem Zusammenhang. Die Sensorik ist aufs Engste mit der Motorik verknüpft. Beide Aspekte beeinflussen sich gegenseitig.

Kognition

Zu den kognitiven Aspekten gehört die Fähigkeit des ZNS, kognitive Ressourcen (in

Form von [auch unbewusster] „Aufmerksamkeit“ in ausreichendem Ausmaß zur Verfügung zu stellen. Im Alltag sind wir gefordert, uns an eine sich ständig verändernde Umwelt anzupassen [29]. Dazu ist eine Teilung der Aufmerksamkeit unerlässlich. Ein Teil der Aufmerksamkeit „bleibt“ bei der PK, ein anderer Teil ist der Umwelt zugewandt. Man spricht hier von der Dual- bzw. Multiple-Task-Fähigkeit. Im Normalfall wird nicht nur die Aufmerksamkeit geteilt, sondern wir verfügen auch über die Fähigkeit, mit der Aufmerksamkeit zu „shiften“ (das heißt, einmal mehr Konzentration auf die Gleichgewichtskontrolle und einmal mehr Konzentration auf die kognitive oder motorische Zusatzaufgabe zu richten). Diese Voraussetzungen sind nötig, um beispielsweise sicher eine befahrene Straße zu überqueren oder ein Tablett mit Essen in der Kantine zu transportieren. Nahezu alle Alltagsaktivitäten erfordern Kognition in diesem Sinne.

Einfluss der Umwelt

Da Bewegungen immer in einer Umwelt stattfinden, beeinflusst auch dieser Aspekt maßgeblich die posturale Kontrolle. Therapeutisch gesehen besteht die Herausforderung darin, einzuschätzen, welche Umweltfaktoren relevant und damit besonders zu berücksichtigen sind. So hat die Art des Untergrunds große Auswirkungen auf die PK. Unterschiedliche Situationen entstehen, wenn der Untergrund beispielsweise labil oder stabil, eben oder schräg, rutschig oder fest usw. ist. Beeinflussend können auch Ablenkungen (andere Menschen), der Einsatz von Hilfsmitteln oder die Lichtverhältnisse sein.

Die Aufgabe bezüglich der posturalen Kontrolle kann nach folgenden Kriterien strukturiert werden: Steady State (statisch), dynamisch-antizipativ und dynamisch-reaktiv [30]. So bezeichnen die beiden Autorinnen die sog. „Balancemechanismen“. Mit ihnen kann die ganz grundlegende „Natur“ der (Balance-)Aufgabe benannt werden. Weitere Aspekte der Aufgabe sind Einsatz der oberen Extremitäten oder verschiedene Arten des Gehens etc.

Framework von Horak

Der zweite bedeutsame Bezugsrahmen wurde von Horak [9] entwickelt (Abb. 2). Darin werden sechs wesentliche Teilbereiche der posturalen Kontrolle festgelegt:

- biomechanisches System: Kraft (v. a. im OSG und Hüftgelenkbereich), Beweglichkeit (posturales Alignment), Stabilitätsgrenzen
- Orientierung im Raum: Wahrnehmung von Vertikalität und Schwerkraft
- Bewegungsstrategien: antizipativ und reaktiv
- Kontrolle dynamischer Bewegungen: Gehen
- sensorische Strategien: sensorische Integration (interne Repräsentation) und sensorische Gewichtung
- Kognition: Aufmerksamkeit und Lernfähigkeit

Weiter differenziert wurde dieser Ansatz von Sibley [31]. Sie verfeinerte das sechsgliedrige Modell und legt neun wesentliche Komponenten der PK fest:

- funktionelle Begrenzungen der Stabilität: Kontrolle des Schwerpunkts in anteroposteriorer und mediolateraler Richtung
- zugrunde liegende motorische Systeme: Kraft, Koordination usw.
- statische Stabilität
- Vertikalität: Fähigkeit, sich angemessen in Relation zur Schwerkraft auszurichten
- reaktive posturale Kontrolle
- antizipative posturale Kontrolle
- Kontrolle dynamischer Bewegungen: Gehen
- sensorische Integration
- kognitive Einflüsse

Verglichen mit dem Rahmenmodell von Shumway-Cook und Woollacott fokussieren die Modelle von Horak und Sibley v. a. den Bereich des Individuums. Die beschriebenen Modelle sind miteinander kompatibel und ergänzen sich zu einem ganzheitlichen Ansatz. Eine zeitgemäße Sichtweise der PK sollte also im Sinne der o. g. Modelle multifaktoriell sein.

Arbeiten mit Bezugsmodellen

Das Arbeiten mit Rahmenmodellen bringt viele Vorteile mit sich. Größter Pluspunkt ist sicherlich die damit verbundene Systematisierung der Herangehensweise. PK wird systematisch betrachtet und nicht mehr nur in Einzelaspekten. In der neueren Therapieliteratur wird zunehmend diese umfassende Perspektive eingenommen [31, 29, 27].

Ausgehend von einem Rahmenmodell können innovative Assessmentverfahren [7, 10] und Behandlungsansätze entwickelt werden. Außerdem bieten sie den Hintergrund für eine kritische Reflexion bestehender Testverfahren und Therapieinterventionen [35]. Beispiele dafür sind die Hinterfragung der zugrunde liegenden Konstrukte der Berg Balance Scale [8] und des Functional-Reach-Tests [15]. Mithilfe der ganzheitlichen Perspektive der Rahmenmodelle können die Stärken und Schwächen bestehender Verfahren analysiert werden. Aufbauend auf dieser Sichtweise können umfassende Interventionen zur Therapie der posturalen Kontrolle entwickelt werden [16].

Posturale Kontrolle und Sturzgefahr bei neurologischen Patienten

Menschen mit neurologischen Erkrankungen haben sehr häufig ein erhöhtes Sturzrisiko [33]. Nach einem Schlaganfall zieht sich diese Tatsache durch alle Phasen der Rehabilitation. In der akuten Phase stürzen 14–25%, in der subakuten (Rehabilitations-)Phase 9–39% und in der chronischen Phase (im häuslichen und außerhäuslichen Umfeld) 23–37% der Patienten [4]. Andere Quellen nennen eine Sturzhäufigkeit von über 70% der Patienten in den ersten sechs Monaten nach einem Schlaganfall [5].

Bis zu 50% der Menschen mit Multipler Sklerose stürzen [23, 24]. Bei Menschen mit Morbus Parkinson wird sogar eine Quote von 60% beschrieben [25].

Hierbei ist jedoch nicht die Korrektheit der Zahlen interessant, sondern die Tendenz, die deutlich macht, dass eine eingeschränkte PK zu den wichtigsten Therapiebereichen innerhalb der Neurorehabilitation zählt.

Risikofaktoren und Sturzursachen

Die Risikofaktoren und die Sturzursachen sind multifaktoriell. Stolze [33] teilt die Risikofaktoren in intrinsisch und extrinsisch auf:

- Intrinsische Ursachen sind: eingeschränkte Durchführung von ADLs, vorhandene Gangstörung, eingeschränkte Balancefähigkeit, vorgängige Stürze, Muskelschwäche, Sensibilitätsstörungen, Neglekt, Aphasie, kognitive Einschränkungen, Depression, Urininkontinenz, Fallangst, Alter [4, 2, 23].

▪ Extrinsische Faktoren sind u. a.: Umgebung (Hindernisse), Medikation (Antihypertensiva, Diuretika, Antidepressiva, Sedativa oder eine Mischung aus verschiedenen Medikamenten) [4, 2]. Vor allem Antihypertensiva erhöhen das Sturzrisiko. Diese Faktoren lassen sich gut mit den o. g. Rahmenmodellen erfassen und einordnen sowie durch weitere Einflussfaktoren ergänzen.

Stürze sind gewissermaßen die Spitze des Eisbergs der Störungen der PK. Denn Störungen der PK haben auch schon weitreichende Auswirkungen, ohne dass Patienten tatsächlich stürzen: Sie können zu kompensatorischen Anpassungen im Bewegungsverhalten (z. B. asymmetrische Gewichtsverlagerung), zu Vermeidungsstrategien (lieber den Rollstuhl benutzen als zu gehen) und zur Entstehung von Fallangst führen [2]. Daraus kann ein Teufelskreis entstehen, der zu einer stetigen Verschlechterung der PK beiträgt [36]. Diese Zusammenhänge machen ersichtlich, dass eine eingeschränkte PK zu einer Verschlechterung der Lebensqualität beitragen kann [26, 36].

Fazit

Posturale Kontrolle ist integraler Bestandteil der meisten Alltagshandlungen. Sie ist bei neurologischen Erkrankungen einer der wichtigsten Problembereiche und deshalb zentraler Ansatzpunkt in der Neurorehabilitation. Eine differenzierte Behandlung der PK setzt ein ganzheitliches Verständnis sowohl der neurophysiologischen als auch der funktionellen, multifaktoriellen Zusammenhänge voraus (Stichworte Netzwerk und Bezugsmodelle).

Autor



Martin Huber ist Physiotherapeut seit 1994; 1995–2010 Tätigkeit in einer großen Klinik für Neurorehabilitation am Bodensee, vorwiegend Behandlung von Patienten mit Schädigungen des ZNS. Seit 2001 Dozent an der Physiotherapieschule Konstanz (D), seit 2008 Dozent an der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW), Winterthur (CH) im Bachelorstudiengang Physiotherapie. Physiotherapeutische Tätigkeit in der ambulanten häuslichen Versorgung. Referent im Rahmen der Weiterbildung „Neurorehabilitation und -therapie“, Physio-Akademie Bildungswerk.

Martin Huber PT, MSc
E-Mail: huber-physiotherapie@gmx.de

Literatur

1. Assländer L. Sensory reweighting dynamics in human postural control. *J Neurophysiol* 2014; 111: 1852–1864
2. Batchelor FA. Falls after stroke. *Int J Stroke* 2012; 7: 482–490
3. Ceballos-Baumann A. Aktivierende Therapie bei Parkinson-Syndromen. 2. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2012
4. Czernuszenko A. Risk factors for falls in stroke patients during inpatient rehabilitation. *Clin Rehabil* 2009; 23: 176–188
5. Forster A. Incidence and consequences of falls due to stroke: A systematic inquiry. *BMJ* 1995; 11: 83–86
6. Fling BW, Dutta GG, Schlueter H et al. Associations between proprioceptive neural pathway structural connectivity and balance in people with multiple sclerosis. *Front Hum Neurosci* 2014; 8: 814
7. Gorman SL. Development and validation of the function in sitting test in adults with acute stroke. *Journal of Neurologic Physical Therapy* 2010; 34(3): 150–160
8. Harris J. Relationship of balance and mobility to fall incidence in people with chronic stroke. *Phys Ther* 2005; 85: 150–158
9. Horak FB. Postural orientation and equilibrium: What do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age and Ageing* 2006; 35 (S2)
10. Horak FB. The Balance Evaluation Systems Test (BES-Test) to differentiate balance deficits. *Phys Ther* 2009; 89: 484–498
11. Horak FB. Postural Control. In: Binder MD, Hirokawa N, Windhorst U, eds. *Encyclopedia of Neuroscience*. Berlin: Springer; 2009: 3212–3219
12. Huber M. Posturale Kontrolle. *pt Zeitschrift für Physiotherapeuten* 2014; 66(5): 12–23
13. Hyndman D. „Stops walking when talking“ as a predictor of falls in people with stroke living in the community. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2004; 75: 994–997
14. Jacobs JV. Cortical control of postural responses. *J Neural Transm* 2007; 114: 1339–1348
15. Jonson E. Does the Functional Reach Test reflect stability limits in elderly people? *J Rehabil Med* 2002; 35: 26–30
16. King LA. Delaying mobility disability in people with Parkinson disease using a sensorimotor agility exercise program. *Phys Ther* 2009; 89: 384–393
17. Lisberger SG. The Cerebellum. In: Kandel E, ed. *Principles of Neural Science*. 5th ed. McGraw-Hill; 2013
18. Lovejoy O. Evolution of human walking. *Scientific American* 1989
19. Macpherson JM, Horak F. Posture. In: Kandel E, ed. *Principles of Neural Science*. 5th ed. McGraw-Hill; 2013
20. Mancini M, Horak FB. The relevance of clinical balance assessment tools to differentiate balance deficits. *Eur J Phys Rehabil Med* 2010; 46(2): 239–248
21. Mansfield A. (2007) A perturbation-based balance training program for older adults: Study protocol for a randomised controlled trial. *BMC Geriatr* 2007; 7: 12
22. Massion J. Movement, posture and equilibrium: Interaction and coordination. *Prog Neurobiol* 1992; 38: 35–56
23. Matsuda PN, Shumway-Cook A, Bamer AM et al. Falls in multiple sclerosis. *PM R* 2011; 3(7): 624–632
24. Matsuda PN, Shumway-Cook A, Ciol MA et al. Understanding falls in multiple sclerosis: Association of mobility status, concerns about falling, and accumulated impairments. *Phys Ther* 2012; 92(3): 407–415
25. Park JH et al. What is wrong with balance in Parkinson's Disease? *J Mov Disord* 2015; 8(3): 109–114
26. Pollock A et al. What is balance? *Clinical Rehabilitation* 2000; 14: 402–406
27. Rinalduzzi S et al. Balance dysfunction in Parkinson's Disease. *BioMed Research International* 2015: 1–10
28. Rothwell JC. Overview of neurophysiology of movement control. *Clin Neurol Neurosurg* 2012; 114(5): 432–435
29. Schoneburg B. Framework for understanding balance dysfunction in Parkinson's disease. *Mov Disord Early View* 2013
30. Shumway-Cook A, Woollacott M. *Motor Control*. 4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2011
31. Sibley KM, Beauchamp MK, Van Ooteghem K et al. Using the systems framework for postural control to analyze the components of balance evaluated in standardized balance measures: A scoping review. *Arch Phys Med Rehabil* 2015 96: 122–132
32. Sousa A. Biomechanical and neurophysiological mechanisms related to postural control and efficiency of movement: A review. *Somatosensory & Motor Research* 2012; 29(4): 131–143
33. Stolze H. Falls in frequent neurological diseases – prevalence, risk factors and aetiology. *J Neurol* 2004; 251: 79–84
34. Taube W. Neuronale Mechanismen der posturalen Kontrolle und der Einfluss von Gleichgewichtstraining. *J Neurol Neurochir Psychiatr* 2013; 14(2): 55–56
35. Tyson S. How to measure balance in clinical practice. A systematic review of the psychometrics and clinical utility of measures of balance activity for neurological conditions. *Clin Rehabil* 2009; 23(9): 824–840
36. Weerdesteijn V, de Niet M, van Duijnhoven HJ, Geurts AC. Falls in individuals with stroke. *J Rehabil Res Dev* 2008; 1195–1213
37. Yogeve-Seligman G. Do we always prioritize balance when walking? Towards an integrated model of task prioritization. *Movement Disorders* 2012; 27(6): 765–770

Bibliografie

DOI 10.1055/s-0042-118059
neuroreha 2016; 8: 158–162
© Georg Thieme Verlag KG
Stuttgart · New York · ISSN 1611-6496