

# Sensomotorik der Halswirbelsäule

<https://doi.org/10.1055/a-1986-6145>

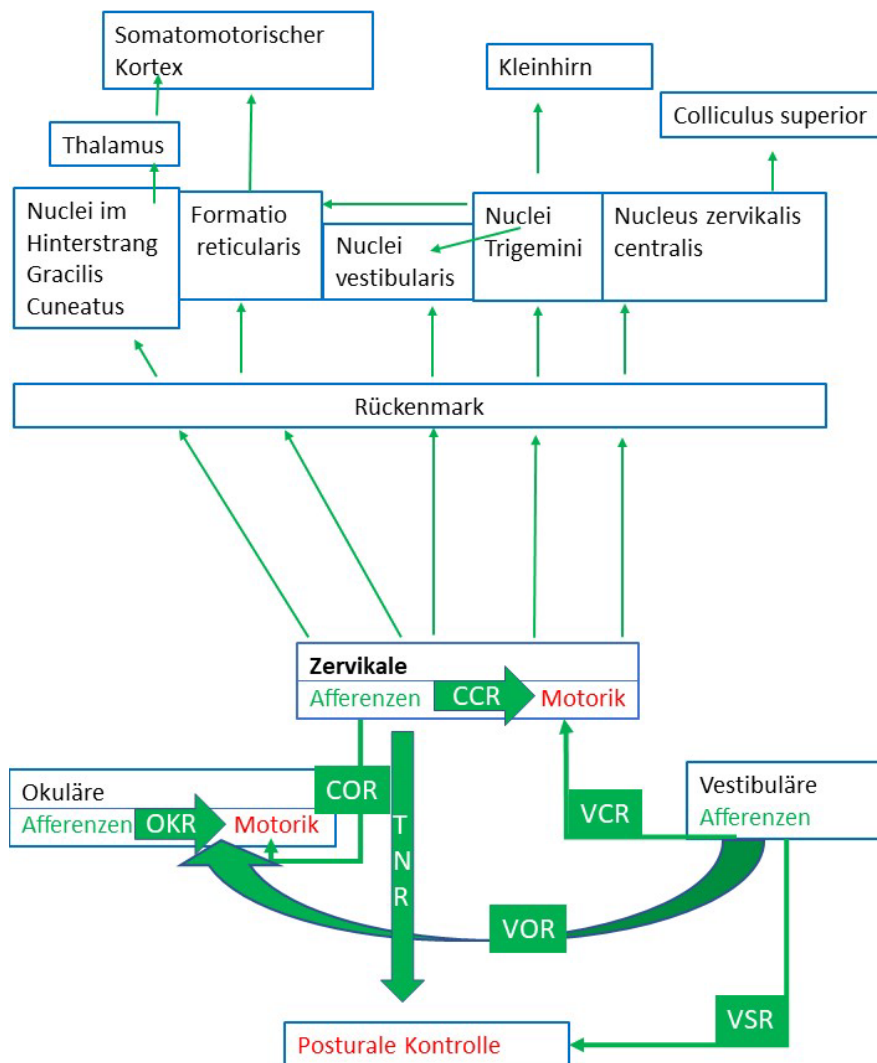
Markus J. Ernst

## Einleitung

Sportler\*innen in verschiedenen Sportarten müssen innerhalb kurzer Zeit Entscheidungen treffen, basierend auf ihrer Wahrnehmung der jeweiligen Sport-, und/oder Spielsituation. Dafür benötigen sie unter anderem ein optimal funktionierendes sensomotorisches System, das verschiedene Sinneswahrnehmungen integrieren muss, z.B. in Bezug auf den eigenen Körper, inklusive dessen Position im Raum, sowie der Sport-/Spielsituation, inklusive einem möglicherweise beteiligten Sportgerät (Ball, Schläger etc.) sowie Mitspieler\*innen und/oder Gegner\*innen. Dieses sensomotorische System muss innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde verschiedene sensorische Informationen, z.B. visuelle oder propriozeptive, aufnehmen, diese gewichten und so verarbeiten, dass eine angepasste motorische Reaktion unterschiedlicher motorischer Systeme ausgelöst wird. Diese Reaktion bedient sich dabei, je nach Begabung und Geschicklichkeit der Sportlerin oder des Sportlers abgespeicherter Bewegungsmuster, die jedoch laufend der sich ändernden Situationen angepasst werden müssen. Eine wichtige Säule des sensomotorischen Systems ist die Halswirbelsäule, die auch durch ihre Beweglichkeit die beteiligten Sensoren in die optimale Stellung bringen kann.

## Kopf und Hals: Schnittstellen wichtiger Sinnesfunktionen

Die Halswirbelsäule (HWS) ist jenes wichtige Glied innerhalb des sensomotorischen Systems, das sowohl sensorischen Input aufnehmen als auch motorischen Output auslösen kann. Aus Muskelspindeln und Gelenksrezeptoren, vor allem im Bereich der oberen HWS treffen Informationen zur Muskellänge und -spannung sowie Gelenkspositionen zusammen mit sensorischen Informationen der Augen und des Vestibularorgans im Hirnstamm ein. Ein Netzwerk von Zellkernen ist dabei beteiligt, u.a. die Nuclei gracilis und cuneatus im Hinterstrang, die Nuclei vestibularis und trigemini, die Formatio reticularis und der Thalamus, bevor die sensorischen Informationen im Kleinhirn und Motorcortex enden (**Abb. 1**)(37). Absteigend gehen motorische Impulse dann über unterschiedliche Reflexwege, wie den zerviko-spinalen, oder den zerviko-okulären Reflex an entsprechende Nacken- bzw. Augenmuskeln (22, 30). Dies geschieht zusammen mit weiteren Hirnstammreflexen, wie dem vestibulo-okulären Reflex, der z.B. die Augen bei schnellen Kopfbewegungen positioniert (38).



**Legende:** CCR= Zerviko-colic Reflex/Reaktion, COR= zerviko-okulärer Refle.  
 OKR= Optokinetischer Reflex, TNR: Tonischer Nackenreflex, nur bei  
 Neugeborenen als "asymmetrischer Tonischer Nackenreflex (ATNR) noch  
 nachweisbar, VCR= Vestibulärer- collic Reflex, VOR = Vestibulo-okulärer  
 Reflex, VSR= Vestibulo-spinaler Reflex.

**Referenzen:** Jull G et al. Sensorimotor control disturbances in neck pain disorders. In: Management of Neck pain disorders. Elsevier; 2018: 71–85.

Von Piekartz H et al. Kiefer, Gesichts- und Zervikalregion: neuromuskuloskelettales Assessment und Behandlungsstrategien. Georg Thieme Verlag 2015

Abbildung 1 Sensomotorisches System

Insbesondere bei Nackenschmerzen nach einem traumatischen Ereignis finden sich Einschränkungen in unterschiedlichen sensomotorischen Bereichen (8, 19, 28, 30), die sich auch kinematisch manifestierten, wenn mehr oder weniger gezielte Bewegungsaufgaben gestellt werden (15).

So haben Patientinnen nach **traumatischen** Halswirbelsäulenverletzungen, und insbesondere diejenigen mit schwindelartigen Symptomen, sehr wahrscheinlich verminderte Fähigkeiten,

- ihren Kopf und Hals, nach Bewegung, zu repositionieren (8);
- ihren Kopf still zu halten wenn sie dazu aufgefordert werden, „nur“ die Augen zu bewegen (19);
- den Kopf präzise entlang einer Trajektorie zu bewegen, z.B. mit einem Laser-pointer auf dem Kopf (11);
- den Kopf schnell zu bewegen; und
- auf Bewegungsaufforderungen schnell zu reagieren (15).

Bei **idiopathischen** Nackenschmerzen zeigt sich die Evidenzlage weniger deutlich. Sie scheinen aber auch:

- mehr Zeit zu benötigen, um eine Bewegungsaufgabe durchzuführen;
- eine geringere Bewegungsgenauigkeit zu haben;
- Nackenbewegungen langsamer zu beschleunigen oder zu bremsen (15).

### Assessment der sensomotorischen Funktionen im Bereich von Kopf und Hals

Ein isoliertes Testen einzelner Systeme und Funktionen ist nicht immer möglich, da Nackenbewegungen meist auch Kopfbewegungen beinhalten, und wenn sie denn auch noch aktiv ausgeführt werden, beinhalten sie eindeutig auch motorische, statt nur sensorische Komponenten. Testbezeichnungen mit dem Wort „sense“ wie in „Joint Position Sense Test“ oder „Movement Sense Test“ scheinen deshalb nicht ganz korrekt, weil doch immer auch die Muskeln („motor“) beteiligt sind. Ein wirklicher Ausschluss des Vestibularorgans, z.B. beim „Joint Position Sense Test“ durch langsame Kopfbewegungen kann zumindest angezweifelt werden.

Um die Beteiligung der HWS für unterschiedliche sensomotorische Funktionen besser von vestibulären Einfluss zu isolieren, nutzen neuste Studien z.B. die Rumpfrotation bei stabiler Kopfstellung im Raum (6, 10, 17, 21, 27, 41). So konnte z.B. gezeigt werden, dass Patientinnen mit Nackenbeschwerden, wenn der Rumpf unterhalb des Halses und Kopfs gedreht wird:

- eine verminderte Augen-Kopf Kontrolle, bzgl. Blickstabilität oder Geschwindigkeit der Augenbewegungen haben (10, 21, 27),
- eine erhöhte „Nahpunkt-Konvergenz“ haben, d.h. ein Objekt wird früher, als „doppelt“ wahrgenommen, wenn es auf die Nase zubewegt wird (17),
- den Kopf mitbewegen, wenn sie z.B. aufgefordert werden, diesen still zu halten, während sie den Rumpf dynamisch nach rechts und links dreht(41). (**Abb. 2**)



*Abbildung 2 Rumpfrotation bei stabilem Kopf*

Eine Vielzahl unterschiedlicher Assessments werden mittlerweile in der Literatur beschrieben, wie bereits erwähnt, kann dabei meist nicht eine Funktion isoliert untersucht werden. Das jeweils geeignete Assessment zu wählen, das idealerweise wissenschaftliche Gütekriterien wie Reliabilität, Validität und Responsivität erfüllt (18, 42), und auch noch praktikabel, ist die große Kunst im klinischen Alltag.

Es empfiehlt sich immer zuerst eine standardisierte Anwendung des Assessments durchzuführen, z.B. den Repositionssinn im Sitzen zu untersuchen, und dabei die Repositionsfähigkeit in Richtung Neutralstellung. Das macht einen Vergleich mit Normdaten möglich. Ein den Patient\*innen und ihrem funktionellen Problem angepasstes Assessment ist dann zusätzlich möglich, z.B. den Repositionssinn im Ein-Bein Stand zu untersuchen, und dabei den Kopf z.B. in 40° zu repositionieren, idealerweise von kaudal via Rumpf initiiert.

Zu den klassischen **sensomotorischen Assessments der Halswirbelsäule** gehören:

- Repositionsfähigkeit von Gelenksstellungen („Joint Position Error Test“) (8, 9): Mindestens 2–6-malige Wiederholungen pro Richtung sollten für eine stabile Messung durchgeführt werden (31). **(Abb. 3)**.
- Bewegungsgenauigkeit z.B. entlang eines vorgegebenen Musters („Movement Accuracy Test“) (11, 25, 35) **(Abb 4)**
- Die Fähigkeit mit der Nackenmuskulatur vorgegebene Kräfte zu reproduzieren («force sense»), ähnlich der genauen Gelenksrepositionierung (7, 23, 26). Dies kann z.B. mit der „Pressure Biofeedback Unit“ (Stabilizer) oder einem Dynamometer untersucht werden (23, 26). Wie genau können Patient\*innen eine vorher eingeübte isometrische Kraft entweder

mit den Nackenflexoren oder mit den Nackenextensoren wieder erzeugen, wenn sie kein Echtzeit-Feedback darüber erhalten?



Abbildung 3 Klassischer Joint position error test

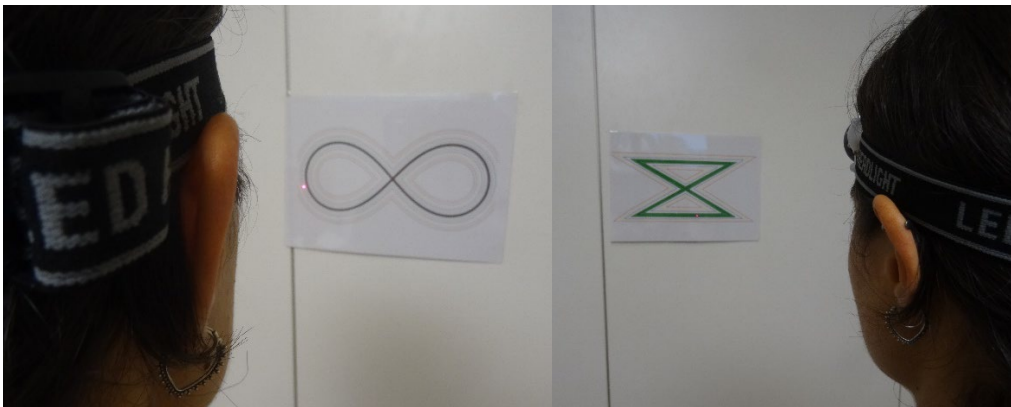


Abbildung 4: Movement accuracy tests

Um den **Einfluss der Halswirbelsäule auf unterschiedliche Augenfunktionen** zu untersuchen, empfiehlt es sich, diese in Kopf- und Halsneutralstellung sowie in Rotationsstellung der HWS zu untersuchen. Dabei sollten die nicht endgradigen Rotationspositionen wie schon erwähnt bei stabil gehaltenem Kopf vom Rumpf erzeugt werden, um die Wirkung des Vestibularorgans auf die Augenfunktionen via vestibulookulärem Reflex (VOR) möglichst gering zu halten. Zu den oft untersuchten Funktionen zählen:

- Langsame Augenfolge-bewegungen („Smooth pursuit“). Dabei können schnelle, ruckartige Augenbewegungen, sogenannte Sakkaden, wenn sie nur in der Torsionsstellung (Rotation vom Rumpf gegenüber dem Kopf) auftreten, Hinweise geben, dass primär die HWS via zervikookulärem Reflex eine Wirkung auf die Augenbewegungen hat. Auch hier scheinen insbesondere die traumatischen HWS Patient\*innen größere Einschränkungen zu zeigen (19, 21). Es werden meist horizontale Augenbewegungen untersucht, aber es spricht nichts dagegen, je nach Befund auch vertikale oder Kombinationen beider Richtungen zu untersuchen. **(Abb. 5)**.
- Frühere Nahpunkt-Konvergenz („near Point convergence“) in Torsionsstellungen (17).
- Blickstabilität („gaze stability“) bei Bewegungen des Rumpfes unter dem stabilen Kopf wurden bisher noch nicht untersucht.





*Abbildung 5: Smooth pursuit Test, auch in HWS-Rotation, eingeleitet vom Rumpf*

Im Vergleich zu den sensomotorischen Assessments der Halswirbelsäule, sind mögliche Einschränkungen von Augenbewegungen nur schwer quantifizierbar. Sie werden oft nur als „positiv“ oder „negativ“ beurteilt, oder mit davon nur leichten abweichenden Kriterien wie bei della Casa et al. (negativ, moderat positiv, positiv) (10). Deshalb sollte auch nach möglichen Provokationen „schwindelartiger“ Symptomen gefragt werden, wobei schon ein kurzes „wackelig“ oder „benebelt sein“, ein möglicher Hinweis auf eine mögliche Dysfunktion sein kann. Neben den erwähnten Augenbewegungen sollten Physiotherapeut\*innen auch auf unkontrolliertes oder stärkeres Augenblinzeln achten (39).

Auch bei diesen Assessments gilt, zuerst die standardisierten Versionen, meist im Sitzen anzuwenden. Zusätzlich können dann auch funktionellere Variationen- im Stehen, Gehen, beim Laufen etc.- untersucht werden.

Das gleiche gilt für **Gleichgewichtsuntersuchungen**. Auch hier kann durch eine von distal eingeleitete Rumpftorsion auf einen möglichen Einfluss der Halswirbelsäule auf die posturale Kontrolle, untersucht werden können (14, 40).

### Training oder Therapien, mehr oder weniger (sportart-)spezifisch

Frühe klinisch randomisierte und kontrollierte Studien hatten oft einen hohen „Risk of Bias“ und konnten keine oder nur geringe Gruppenunterschiede zwischen „sensomotorischem Training“ und anderen physiotherapeutischen Interventionen bei Nackenpatient\*innen und auf Outcomes wie Schmerzen oder Alltagseinschränkungen zeigen (29). Die Frage ist auch: Welche Interventionen fallen unter sensomotorisches Training? Dem Begriff nach gehören auch Motorkontrolle (13) oder Bewegungskontrollinterventionen (24), ebenso wie Augen-Kopfkontroll-Training (30) zum „Sensomotorischem Training“. Eine Abgrenzung zu Ausdauer- oder Krafttraining der Nackenmuskulatur erscheint nicht immer eindeutig.

Neuere Studien zeigten zwar deutlich weniger Bias, jedoch weiterhin nur geringe und möglicherweise klinisch wenig relevante Gruppenunterschiede von z.B. 1–4° für den JPE, die teilweise unter dem „minimal detectable change“ liegen (2). So scheint zumindest sensomotorisches Training mit Laserpointer und Zielscheibe oder Bewegungsmustern im Vergleich zu normaler physischer Aktivität (5) für zervikales Beweglichkeitstraining (12) oder Haltungsschulungen (34) nicht besser zu sein. Auch ein variables sensomotorisches Training in einer virtuellen Realität (VR) zeigte gleiche Effekte auf Beweglichkeit, Schmerz und Funktionseinschränkung gegenüber einem ähnlichen, jedoch nicht-

virtuellen Training (36). Das gleiche galt für ein „propriozeptives“ Training, welches u.a. Augen-Kopfkontroll-Übungen beinhaltete, im Vergleich zu einem kraniozervikalen Training (20).

Dennoch könnte der Einsatz von VR neue Möglichkeiten in der sensomotorischen Rehabilitation gerade auch im Sportbereich eröffnen. Mit virtuellem Training ließen sich Bewegungsaufgaben in Bezug auf zusätzliche Bewegungsparameter von Kopf und Augen, wie Geschwindigkeit, Ausmaß oder Genauigkeit noch gezielter beeinflussen (36). Zu einer funktionellen Nackenrehabilitation zählen u.a. zielorientierte Bewegungen, d.h. den Kopf in eine Position zu führen, damit z.B. die Augen weitere sensorische Informationen erfassen um beispielsweise Gefahren auszuweichen oder im Sport ein Spielgerät zu kontrollieren und möglichst schnell weiterzuspielen (43). **(Abb.6)**. Also deutlich mehr als ein eher vom Ziel losgelöstes isoliertes Trainieren einer Muskelgruppe oder Bewegungsrichtung, wie dies z.B. beim kraniozervikalen Flexionstraining praktiziert wird (43).



*Abbildung 6: Schnelle und gezielte Kopfbewegungen zu definierten Zielen/Sportartspezifisches Training*

Bei jugendlichen Elitefußballern hatten diejenigen mit den häufigsten Kopf-Auge-Bewegungen, um im Wettkampf ihre Umgebung fortlaufend zu scannen, die beste Passquote (1). VR könnte künstliche Sport- und Spielsituationen simulieren, wodurch bestenfalls reale (Re-)Aktionen folgen, wie sie z.B. im „Footbonaut“ bei Fußballer\*innen, trainiert werden (3). Aktuell klagen aber noch einige Nackenpatient\*innen über Übelkeit beim Einsatz von VR, evtl. auch als Folge der Verletzung und/oder des spezifischen Trainings (36).

In den meisten bisherigen Studien bestand sensomotorisches Training, wie oben beschrieben, aus Repositionstrainings und/oder dem Verfolgen von Bewegungstrajektorien, z.B. mit einem Laserpointer auf dem Kopf ähnlich wie in den entsprechenden Assessments (12, 34). Dies ist kaum ausreichend, um der Komplexität vieler Sportsituationen gerecht zu werden, und kann maximal als möglicher sensomotorischer Trainingsstart angesehen werden.

Neben sensomotorischem Trainings zeigten auch manualtherapeutische Interventionen, z.B. nach Maitland oder Mulligan, gegenüber einer Placebo Lasertherapie und für subjektive Schwindel-Outcomes auch ein Jahr nach der Intervention noch bessere Resultate bei Patient\*innen mit zervikalen Schwindelsymptomen, jedoch nicht auf die Repositionsfähigkeit der HWS (32, 33). Manipulationen mit Impuls auf Höhe C3/4 wiesen zumindest kurzfristig (eine Woche) einen verbesserten „Joint Position Error“ nach, als „Placebo“-Manipulationen (16). Ähnliches gilt auch für die lokale Vibration der Nackenmuskulatur, die einen Trend zu verbesserten Repositionsfähigkeiten der HWS im Vergleich zu Bewegungsvorstellungen („Motor Imagery“) zeigten (4).

## Take Home Message

Sportphysiotherapeut\*innen sollten bei Patient\*innen mit Nackenbeschwerden und besonders nach traumatischen Verletzungen frühzeitig sensomotorische Assessments in standardisierter, aber auch an Patient\*in und Sportart und/oder funktionellem Problem angepasste Form, verwenden.

Die Nackenrehabilitation sollte sportartspezifische, zielgerichtete Elemente von Kopf- und Augenbewegungen beinhalten und oft wiederholen. Dabei darf zumindest mittelfristig auch der ganze Körper (entsprechend der Sportart) inklusive des spezifischen Sportgeräts, wenn denn vorhanden, zum Einsatz kommen.

Autorinnen/Autoren

Markus Ernst

## Literatur

1. Aksum KM, Pokolm M, Bjørndal CT, Rein R, Memmert D, Jordet G. 2021. Scanning activity in elite youth football players. *Journal of Sports Sciences*. 39(21):2401–10
2. Alahmari K, Reddy RS, Silvian P, Ahmad I, Nagaraj V, Mahtab M. 2017. Intra- and inter-rater reliability of neutral head position and target head position tests in patients with and without neck pain. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. 21(4):259–67
3. Beavan A, Fransen J, Spielmann J, Mayer J, Skorski S, Meyer T. 2019. The Footbonaut as a new football-specific skills test: reproducibility and age-related differences in highly trained youth players. *Science and Medicine in Football*. 3(3):177–82
4. Beinert K, Preiss S, Huber M, Taube W. 2015. Cervical joint position sense in neck pain. Immediate effects of muscle vibration versus mental training interventions: a RCT. *Eur J Phys Rehabil Med*. 51(6):825–32
5. Beinert K, Taube W. 2013. The Effect of Balance Training on Cervical Sensorimotor Function and Neck Pain. *Journal of Motor Behavior*. 45(3):271–78
6. Chen X, Treleaven J. 2013. The effect of neck torsion on joint position error in subjects with chronic neck pain. *Manual Therapy*. 18(6):562–67
7. de Koning CH, Heuvel SP van den, Staal JB, Smits-Engelsman BC, Hendriks EJ. 2008. Clinimetric evaluation of methods to measure muscle functioning in patients with non-specific neck pain: a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord*. 9(1):142



8. de Vries J, Ischebeck BK, Voogt LP, van der Geest JN, Janssen M, et al. 2015. Joint position sense error in people with neck pain: A systematic review. *Manual Therapy*. 20(6):736–44
9. de Zoete RMJ, Osmotherly PG, Rivett DA, Farrell SF, Snodgrass SJ. 2017. Sensorimotor Control in Individuals With Idiopathic Neck Pain and Healthy Individuals: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 98(6):1257–71
10. Della Casa E, Affolter Helbling J, Meichtry A, Luomajoki H, Kool J. 2014. Head-Eye movement control tests in patients with chronic neck pain; Inter-observer reliability and discriminative validity. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 15(1):16
11. Ernst MJ, Williams L, Werner IM, Crawford RJ, Treleaven J. 2019. Clinical assessment of cervical movement sense in those with neck pain compared to asymptomatic individuals. *Musculoskeletal Science and Practice*. 43:64–69
12. Espí-López GV, Aguilar-Rodríguez M, Zarzoso M, Serra-Añó P, Martínez De La Fuente JM, et al. 2021. Efficacy of a proprioceptive exercise program in patients with nonspecific neck pain: a randomized controlled trial. *Eur J Phys Rehabil Med*. 57(3):
13. Falla D, Lindstrøm R, Rechter L, Boudreau S, Petzke F. 2013. Effectiveness of an 8-week exercise programme on pain and specificity of neck muscle activity in patients with chronic neck pain: A randomized controlled study. *European Journal of Pain*. 17(10):1517–28
14. Field S, Treleaven J, Jull G. 2008. Standing balance: A comparison between idiopathic and whiplash-induced neck pain. *Manual Therapy*. 13(3):183–91
15. Franov E, Straub M, Bauer CM, Ernst MJ. 2022. Head kinematics in patients with neck pain compared to asymptomatic controls: a systematic review. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 23(1):156
16. García-Pérez-Juana D, Fernández-de-las-Peñas C, Arias-Burúa JL, Cleland JA, Plaza-Manzano G, Ortega-Santiago R. 2018. Changes in Cervicocephalic Kinesthetic Sensibility, Widespread Pressure Pain Sensitivity, and Neck Pain After Cervical Thrust Manipulation in Patients With Chronic Mechanical Neck Pain: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*. 41(7):551–60

17. Giffard P, Daly L, Treleaven J. 2017. Influence of neck torsion on near point convergence in subjects with idiopathic neck pain. *Musculoskeletal Science and Practice*. 32:51–56
18. Hüter-Becker A, Dölken M, Bie R de, eds. 2004. *Beruf, Recht, wissenschaftliches Arbeiten: 25 Tabellen*. Stuttgart: Thieme. 249 pp.
19. Ischebeck BK, de Vries J, Van der Geest JN, Janssen M, Van Wingerden JP, et al. 2016. Eye movements in patients with Whiplash Associated Disorders: a systematic review. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 17(1):441
20. Izquierdo T, Pecos-Martin D, GirbÃ©s E, Plaza-Manzano G, Caldentey R, et al. 2016. Comparison of cranio-cervical flexion training versus cervical proprioception training in patients with chronic neck pain: A randomized controlled clinical trial. *J Rehabil Med*. 48(1):48–55
21. Janssen M, Ischebeck BK, de Vries J, Kleinrensink G-J, Frens MA, van der Geest JN. 2015. Smooth Pursuit Eye Movement Deficits in Patients With Whiplash and Neck Pain are Modulated by Target Predictability. *Spine*. 40(19):E1052
22. Jull G. 2019. *Management of neck pain disorders: a research-informed approach*. London: Elsevier. 270 pp.
23. Jull G, Kristjansson E, Dall’Alba P. 2004. Impairment in the cervical flexors: a comparison of whiplash and insidious onset neck pain patients. *Manual Therapy*. 9(2):89–94
24. Khosrokiani Z, Letafatkar A, Sokhanguie Y. 2018. Long-term effect of direction-movement control training on female patients with chronic neck pain. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 22(1):217–24
25. Kristjansson E, Dall’alba P, Jull G. 2001. Cervicocephalic kinaesthesia: reliability of a new test approach. *Physiotherapy Research International*. 6(4):224–35
26. Li DE, David KEB, O’Leary S, Treleaven J. 2019. Higher variability in cervical force perception in people with neck pain. *Musculoskeletal Science and Practice*. 42:6–12
27. Majcen Rosker Z, Vodicar M, Kristjansson E. 2022. Oculomotor performance in patients with neck pain: Does it matter which angle of neck torsion is used in smooth pursuit eye movement

- test and is the agreement between angles dependent on target movement amplitude and velocity? *Musculoskeletal Science and Practice*. 59:102535
28. Mazaheri M, Abichandani D, Kingma I, Treleaven J, Falla D. 2021. A meta-analysis and systematic review of changes in joint position sense and static standing balance in patients with whiplash-associated disorder. *PLOS ONE*. 16(4):e0249659
  29. McCaskey MA, Schuster-Amft C, Wirth B, Suica Z, de Bruin ED. 2014. Effects of proprioceptive exercises on pain and function in chronic neck- and low back pain rehabilitation: a systematic literature review. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 15(1):382
  30. Piekartz-Doppelhofer D von, Piekartz H von, Hengeveld E. 2012. Okuläre Dysfunktionen bei WAD: Behandlungsmöglichkeiten und Effekte neuromuskuloskelettaler Therapie. *manuelletherapie*. 16(1):42–51
  31. Quartey J, Ernst M, Bello A, Oppong-Yeboah B, Bonney E, et al. 2019. Comparative joint position error in patients with non-specific neck disorders and asymptomatic age-matched individuals. *South African Journal of Physiotherapy*. 75(1):
  32. Reid SA, Callister R, Katekar MG, Rivett DA. 2014. Effects of Cervical Spine Manual Therapy on Range of Motion, Head Repositioning, and Balance in Participants With Cervicogenic Dizziness: A Randomized Controlled Trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 95(9):1603–12
  33. Reid SA, Callister R, Snodgrass SJ, Katekar MG, Rivett DA. 2015. Manual therapy for cervicogenic dizziness: Long-term outcomes of a randomised trial. *Manual Therapy*. 20(1):148–56
  34. Saadat M, Salehi R, Negahban H, Shaterzadeh MJ, Mehravar M, Hessam M. 2019. Traditional physical therapy exercises combined with sensorimotor training: The effects on clinical outcomes for chronic neck pain in a double-blind, randomized controlled trial. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 23(4):901–7
  35. Sarig Bahat H, Chen X, Reznik D, Kodesh E, Treleaven J. 2015. Interactive cervical motion kinematics: sensitivity, specificity and clinically significant values for identifying kinematic impairments in patients with chronic neck pain. *Man Ther*. 20(2):295–302

36. Sarig Bahat H, Takasaki H, Chen X, Bet-Or Y, Treleaven J. 2015. Cervical kinematic training with and without interactive VR training for chronic neck pain – a randomized clinical trial. *Manual Therapy*. 20(1):68–78
37. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, eds. 2015. *Kopf, Hals und Neuroanatomie: LernAtlas Anatomie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag. 4th ed.
38. Treleaven J. 2017. Dizziness, Unsteadiness, Visual Disturbances, and Sensorimotor Control in Traumatic Neck Pain. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 47(7):492–502
39. Treleaven J, Joloud V, Nevo Y, Radcliffe C, Ryder M. 2019. Normative Responses to Clinical Tests for Cervicogenic Dizziness: Clinical Cervical Torsion Test and Head-Neck Differentiation Test. *Physical Therapy*, p. pzz143
40. Treleaven J, Jull G, Lowchoy N. 2005. Standing balance in persistent whiplash: a comparison between subjects with and without dizziness. *Journal of Rehabilitation Medicine*. 37(4):224–29
41. Treleaven J, Tan A, Da Cal J, Grellman A, Pickering R. 2020. Can a simple clinical test demonstrate head-trunk coordination impairment in neck pain? *Musculoskeletal Science and Practice*. 49:102209
42. Verra M, Oesch P, Baierle T, Berge M, eds. 2020. *Muskuloskelettale Physiotherapie: 23 Fälle aus der evidenzbasierten Praxis*. Stuttgart New York: Georg Thieme Verlag. 408 pp.
43. Worsfold C. 2020. Functional rehabilitation of the neck. *Physical Therapy Reviews*. 25(2):61–72