

Aus der Klinik und Hochschulambulanz für  
Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde  
Campus Charité Mitte  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Grundlagenuntersuchung der zervikovestilären Afferenzen in  
Abhängigkeit zu Schwerkraftrichtung und Probandenalter

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Annabelle Victoria Lappat

aus Offenbach am Main

Datum der Promotion: 11.12.2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstrakt</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
1.1 Einführung .....	8
1.2 Das Gleichgewichtssystem im Erdschwerefeld .....	10
1.2.1 Die Perzeption von Beschleunigung .....	10
1.2.2 Die zervikale Propriozeption .....	13
1.2.3 Die zentrale Integration peripherer Sensorinformationen .....	16
1.3 Stand der Forschung zur Gleichgewichtsfunktion im Erdschwerefeld .....	19
1.3.1 Der Schwerkrafteffekt auf die räumliche Orientierung .....	19
1.3.2 Der Alterseffekt auf die räumliche Orientierung .....	21
1.3.3 Die zervikalen Funktionsstörungen .....	23
<b>2 Herleitung der Fragestellung</b> .....	<b>31</b>
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>33</b>
3.1 Einführung .....	33
3.2 Die posturale Kontrolle .....	33
3.2.1 Der Romberg-Stehversuch .....	34
3.2.2 Der Unterberger-Tretversuch .....	37
3.3 Die dreidimensionale Videookulographie .....	37
3.3.1 Funktionsweise und Anwendungsmöglichkeiten .....	37
3.3.2 Vor- und Nachteile .....	39
3.4 Schwerkraftabhängige zervikotonische Provokation .....	42
3.4.1 Der dreidimensionale Halsdrehtest .....	42
3.4.2 Vor- und Nachteile .....	42
3.5 Schwerkraftunabhängige zervikotonische Provokation .....	43
3.5.1 Der dreidimensionale Rumpfkursionsstuhl .....	43
3.5.2 Die Bestimmung der Winkelabweichung im Helm .....	47
3.5.3 Vor- und Nachteile .....	48
3.6 Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität .....	49
3.7 Versuchsablauf .....	50
3.8 Ein- und Ausschlusskriterien .....	52
3.9 Stichprobenbeschreibung .....	54
3.10 Datenanalyse .....	55
3.10.1 Auswertung des Nystagmus .....	55
3.10.2 Statistik .....	59
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>60</b>
4.1 Diagnostische Voruntersuchungen .....	60

4.1.1	Die posturale Kontrolle .....	60
4.1.2	Die Baseline der Videookulographie .....	63
4.2	Analyse der Provokationspositionen im Vergleich zur Baseline.....	64
4.2.1	Schwerkraftabhängige zervikotonische Provokation .....	65
4.2.2	Schwerkraftunabhängige zervikotonische Provokation .....	72
4.3	Analyse des Schwerkrafteffekts auf die Nystagmusmodulation .....	76
4.3.1	Das Gesamtkollektiv.....	77
4.3.2	Die Altersgruppen.....	79
4.4	Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität .....	82
4.4.1	Das Gesamtkollektiv.....	83
4.4.2	Die Altersgruppen.....	83
<b>5</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>85</b>
5.1	Einführung .....	85
5.2	Methodenkritik .....	86
5.2.1	Diagnostische Voruntersuchungen.....	86
5.2.2	Die dreidimensionale Videookulographie .....	89
5.2.3	Schwerkraftabhängige zervikotonische Provokation .....	90
5.2.4	Schwerkraftunabhängige zervikotonische Provokation .....	91
5.3	Analyse der Provokationspositionen im Vergleich zur Baseline.....	92
5.3.1	Das Gesamtkollektiv.....	92
5.3.2	Die Altersgruppen.....	95
5.3.3	Der Vertikalnystagmus .....	98
5.4	Analyse des Schwerkrafteffekts auf die Nystagmusmodulation .....	101
5.4.1	Das Gesamtkollektiv.....	101
5.4.2	Die Altersgruppen.....	102
5.5	Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität .....	103
5.5.1	Das Gesamtkollektiv.....	103
5.5.2	Die Altersgruppen.....	105
5.6	Schlussfolgerung und Ausblick.....	106
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>110</b>
<b>7</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>122</b>
7.1	Abkürzungsverzeichnis.....	122
7.2	Abbildungsverzeichnis .....	123
7.3	Tabellenverzeichnis.....	125
7.4	Eidesstattliche Versicherung .....	127
7.5	Lebenslauf .....	128
7.6	Danksagung .....	129

# **Abstrakt**

## **Einleitung**

Der Stellenwert zervikaler Propriozeption für das menschliche Gleichgewichtsempfinden ist bis heute nicht zufriedenstellend geklärt. Anhand eigener Voruntersuchungen wurde bereits mit dem dreidimensionalen Halsdrehtest (3D-HDT) mittels der 3D-Videookulographie (3D-VOG) die vestibulär relevante suboccipitale Region tonisch in den sechs Kopfauslenkpositionen exploriert. Hier ergaben sich Interpretationsschwierigkeiten bei der Beurteilung des Zielparameters, dem zervikotonischen Provokationsnystagmus (CPN). Es konnte dabei prinzipiell nicht ausgeschlossen werden, dass es in den gehaltenen Kopfauslenkungen durch die Verlagerung des Schwerkraftvektors zu einer Mitstimulation des Otolithenorgans kam. Ziel der vorliegenden Arbeit war deshalb die selektive zervikovestiläre Provokation mithilfe eines neuen und eigens konstruierten dreidimensionalen Rumpfxkursionsstuhls (3D-RES). Dieser sollte bei fixiertem Kopf und isolierter Rumpfauslenkung eine Beurteilung zervikookulärer Reaktionen, der Effekte von Alterungsprozessen sowie der dynamischen kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität (KKS) in einem vestibulär gesunden Kollektiv ermöglichen.

## **Methodik**

Die bisher verwendete 3D-HDT-Methode wurde der 3D-RES-Methode statistisch gegenübergestellt. Mit beiden Methoden wurden 100 Probanden zweier Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup> [Altersmedian= 26; n= 50]; Gruppe<sup>50</sup> [Altersmedian= 50; n= 50]) einander randomisiert in den jeweils vergleichbaren Kopf-zu-Rumpf-Positionen gegenübergestellt. Mithilfe der verwendeten 3D-VOG waren Nystagmusmodulationen digital registrierbar. Bei der Auswertung wurden die Vertikal- und Horizontalnystagmen anhand eines Scoresystems verglichen.

## **Ergebnisse**

In der 3D-HDT-Methode war eine signifikante Nystagmusmodulation in horizontaler und vertikaler Nystagmusdimension statistisch nachzuweisen. In der rein zervikalen Provokation mittels der 3D-RES-Methode war diese nur in der horizontalen Nystagmusdimension bei Rumpftorsion signifikant. Im Methodenvergleich bestätigte sich eine signifikant stärkere Nystagmusmodulation bei Kopfauslenkung. Gruppe<sup>50</sup> zeigte in der 3D-HDT-Methode signifikant mehr Vertikalnystagmusaktivität als Gruppe<sup>26</sup>.

In der 3D-RES-Methode hingegen war kein signifikanter Unterschied zwischen den Altersgruppen ableitbar. Im gruppenselektiven Methodenvergleich war in Gruppe<sup>26</sup> nur eine vermehrte Horizontalnystagmusmodulation in Kopfauslenkung gegenüber Rumpfauslenkung zu verzeichnen. Gruppe<sup>50</sup> zeigte generell eine signifikant stärkere Reizreaktion auf Kopfauslenkung in der 3D-HDT-Methode. Bei der Auswertung der signifikanten Vertikalnystagmusmodulation in der 3D-HDT-Methode zeigte sich ein signifikant häufigeres Auftreten des Upbeat-Nystagmus (UBN) gegenüber dem Downbeat-Nystagmus (DBN). Der DBN trat bei Kopfauslenkung in der 3D-HDT-Methode in Gruppe<sup>50</sup> häufiger auf als in Gruppe<sup>26</sup>. Im UBN war keine signifikante Altersdifferenz ableitbar. Bei der Untersuchung der KKS wich Gruppe<sup>26</sup> lediglich in der Flexion signifikant weniger von der Nullposition ab als Gruppe<sup>50</sup>.

### **Schlussfolgerung**

Wir schlussfolgern aus den Ergebnissen der Pilotstudie, dass sich Kopf-zu-Rumpf Provokationshaltungen prinzipiell eignen, um zervikotonische Nystagmusmodulationen nachzuweisen. Die methodische Exklusion periphervestibulärer Sensorreize anhand der 3D-RES-Methode erwies sich hierbei als vorteilhaft. Das Alter schien einen relevanten Einfluss auf die Nystagmusmodulation auszuüben. Der Zusammenhang zur zervikalen Afferenz muss weiter belegt werden. Die Untersuchung der KKS im 3D-RES ermöglichte die altersspezifische Überprüfung der zervikalen Sensorleistung. Erst durch Evaluation der adäquaten Auslenkungsgrenzen und Folgeuntersuchungen an zervikal defizitären Patienten können die Effekte der 3D-RES-Methode weiter beurteilt werden.

## **Abstract**

A Pilot Study of Cervico-Vestibular Afferences in Relation to the Gravitational Vector and Study Group Age

### **Introduction**

The significance of cervical proprioception for human balance has thus far not been sufficiently elucidated. Drawing on our own preliminary research using the three-dimensional neck-torsion-test (3D-NTT) and 3D-video-oculography (3D-VOG) the suboccipital region relevant to the vestibular system was examined with reference to tonic head excursions. Exact interpretation of the target parameter, the cervicotonic provocation nystagmus (CPN), proved difficult as in principle it could not be excluded that the shift of the gravity vector caused by tonic head excursion was causing additional stimulation of the otoliths. Thus the aim of this study was to provoke selective cervico-vestibular stimulation using the novel three-dimensional trunk excursion chair (3D-TEC) we ourselves constructed. This chair is designed to enable both evaluation of cervico-ocular reactions during isolated trunk excursion, and evaluation of the effects of aging and dynamic cranioccephalic kinesthetic sensibility (CKS) in a group with healthy vestibular systems.

### **Methods**

The previously used 3D-NTT-method was statistically compared to the 3D-TEC-method. In both methods 100 healthy subjects of two age groups (group<sup>26</sup> [md= 26; n= 50]; group<sup>50</sup> [md= 50; n= 50]) were randomized for comparison of similar neck-to-trunk-positions. Use of 3D-video-oculography (3D-VOG) enabled digital recording of nystagmus modulations. The relevant vertical and horizontal nystagmuses were classified and compared using a specially developed scoring system.

### **Results**

Use of the conventional 3D-NTT-method enabled detection of significant nystagmus modulation in horizontal and vertical dimensions, whereas in pure cervical stimulation using the new 3D-TEC-method this was only evident in the horizontal dimension and only during trunk torsion. Comparison of the two methods confirmed significantly stronger nystagmus modulation through head excursion. In terms of the 3D-NTT-method, group<sup>50</sup> showed significantly more vertical nystagmus activity than group<sup>26</sup>. However, no significant difference was found between the groups in terms of their

reactions to trunk excursion in the 3D-TEC-method. In a group-specific comparison of the methods, group<sup>26</sup> showed a significant increase of the horizontal nystagmus in head over trunk excursion, whereas group<sup>50</sup> generally displayed a significantly greater response to provocation by head excursion in 3D-NTT. Analysis of the significant vertical nystagmus modulation produced with the 3D-NTT-method showed predominance of upbeat- (UBN) over downbeat-nystagmus (DBN). Through head excursion with the 3D-NTT-method the DBN was more frequently evoked in group<sup>50</sup> than in group<sup>26</sup>. In UBN no significant age difference could be derived. Examination of the CKS showed that only in terms of flexion were group<sup>26</sup> significantly closer to the starting position than group<sup>50</sup>.

## **Conclusion**

The results of the pilot study lead us to conclude that head-to-trunk provocation is in principle a suitable means of proving cervicotonic nystagmus modulation. Exclusion of peripheral vestibular stimulation allowed by the 3D-TEC-method proved to be beneficial. Age seemed to have a marked influence on nystagmus modulation yet its relation to cervical afference still needs further exploration. Examination of the CKS in the 3D-TEC enabled age-specific inspection of cervical sensor performance. Only by evaluation of adequate excursion limits and consistent analysis of patients with cervical deficiency can the effects of the method be further assessed.

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung

Unter Schwindel versteht man das subjektive Empfinden einer Scheinbewegung zwischen sich und der Umwelt<sup>1</sup>. Diese wird oft als Lift-, Dreh-, oder Schwankgefühl beschrieben und geht häufig mit einer Störung der Haltungsregulation einher. Es handelt sich dabei in unserer Gesellschaft um ein häufiges Leitsymptom<sup>2-4</sup>. Kruschinski et al. als auch Strupp et al. beschreiben eine Lebenszeitprävalenz von Schwindel in der ärztlichen Praxis in Abhängigkeit vom Alter von 20 bis 30 %<sup>5,6</sup>. In einer Studie zu Häufigkeiten von Gesundheitsstörungen in 10 Jahren Allgemeinpraxis wurde aufgezeigt, dass Schwindelbeschwerden auf Platz 12 der 50 häufigsten Diagnosen liegen<sup>7</sup>. Besonders Patienten im höheren Alter scheinen von Störungen des Gleichgewichts betroffen<sup>8,9</sup>.

Die Ursachenklärung bei Schwindelbeschwerden ist komplex, da das vestibuläre System dem Einfluss vieler Impulse unterliegt und ebenso nicht-vestibuläre Erkrankungen diesen Symptomkomplex verursachen können. Bei dem multifaktoriellen, fächerübergreifenden Befund „Schwindel“ entscheiden Ärzte sich häufig nicht für eine spezifische Erkrankung oder Diagnostik<sup>5</sup>. Es wurde mehrfach kritisiert, dass ein Großteil der Patienten folglich keine angepasste Diagnose und somit auch keine korrekte Therapie erhalten würden<sup>6,10</sup>. Da die Form und Ätiopathogenese des Schwindels so verschiedenartig sein kann, ist eine differenzierte Sensordiagnostik entscheidend, um eine protrahierte Behandlungsdauer und daraus resultierende hohe Kosten zu vermeiden.

Das Gleichgewichtsempfinden des Menschen setzt sich aus den Sensorinformationen der Augen, des Gehörs, des Vestibularorgans, der Somatosensorik und des zentralen Nervensystems zusammen. Im Schwerfeld der Erde werden diese Informationen in ihrer physiologisch absteigenden Hierarchie vorwiegend aus 1. dem visuellen, 2. dem vestibulären und 3. dem propriozeptivem System bezogen<sup>11</sup>. Sie werden im zentralvestibulären System vereint und tragen so gemeinsam zur Stabilisierung des Äquilibrium bei. Im Falle einer gestörten neuronalen Entladung in den Sinnesrezeptorzellen eines Sensors kommt es zu einem Mismatch der Informationen in den zentral-vestibulären Projektionsgebieten und eine Bewegungsillusion oder Schwindel können entstehen<sup>12</sup>.



## Einleitung

Die Funktionen des Vestibularorgans wurden in den letzten Jahren anhand von spezifischen Tests weiter entschlüsselt<sup>13</sup>. Lineare Beschleunigungen durch Translation des Kopfes oder Neigung des Kopfes zur Richtung der Schwerkraft werden von den Otolithenorganen in afferente Signale umgesetzt<sup>14</sup>. Als Beispiel einer Funktionsstörung des Gleichgewichtsorgans sei hier der benigne paroxysmale Lagerungsschwindel genannt, welcher sich klassischerweise durch den Eindruck einer horizontalen Drehbewegung äußert. Hierbei kommt es, durch von den Otolithenorganen abgelösten, frei flottierenden Otokonien, zu einer fehlerhaften Bewegungsmeldung im Gehirn, welche nicht zu den Informationen der anderen Sinnessysteme passt. Aus diesem sogenannten vestibulären Mismatch resultiert der Drehschwindel. Nicht immer sind die Symptome von Sinnessystemstörungen so gut zu dokumentieren oder einem bestimmten Rezeptor zuzuordnen.

Ein besonderes Problem ergibt sich, wenn zentralvestibulär relevante propriozeptive Rezeptorstörungen Auslöser eines Mismatches sind. Die Relevanz der zervikalen Propriozeption an Gleichgewichtsbeschwerden ist aufgrund der Schwierigkeit von und Mangel an objektiven klinischen Untersuchungen weiterhin Gegenstand kontroverser Diskussionen. In neuroanatomischer Grundlagenforschung konnte gezeigt werden, dass Projektionen zwischen den propriozeptiven Afferenzen der Nackenmuskulatur und den zentralen Gleichgewichtskernen existieren (Kapitel 1.2.3)<sup>15</sup>. In Frage gestellt wird jedoch weiterhin die klinische Relevanz dieser Sensorinformation. Für ihre Wichtigkeit wiederum sprechen beispielsweise neue Forschungserkenntnisse aus der Schwerelosigkeit. Mitunter Clarke et al., Mulavara et al. und Ceyte et al. beschrieben, dass in Mikrogravität dynamische Veränderungen der zuvor beschriebenen Rezeptorhierarchie beobachtet werden konnten und der Propriozeption des Nackens bei fehlender Information anderer Afferenzen eine wichtige Ersatzfunktion zukommen würde (Kapitel 1.2.2)<sup>16-19</sup>.

Kritiker der Theorie der Schwindelentstehung durch funktionelle Störungen der Nackenmuskulatur stellen die Bedeutsamkeit der zervikalen Afferenzen im Vergleich zu den anderen vestibulären Rezeptorsystemen in Frage. Sie betonen die ungenügende Nachweisbarkeit und Aussagekraft bisheriger Studien<sup>12,20-24</sup>. Die zentralvestibuläre Verschaltung vestibulärer und zervikaler Afferenzen im Hirnstamm und höher gelegenen Zentren ist komplex und anatomisch schwer zu untersuchen. Die Ableitung von typischen pathologischen Augenbewegungen, den sogenannten Nystagmen, als Effektorreaktion hat in der Diagnostik bei Störungen des Gleichgewichtes eine wichtige

## Einleitung

Rolle eingenommen<sup>25</sup>. Durch neue Techniken, wie der Videookulographie, können mit der Nystagmusauswertung reliable, valide und standardisierte Untersuchungen durchgeführt werden. Ein mögliches Hindernis bei der Untersuchung der zervikookulären Bahnen stellt die gleichzeitige Reizung des vestibulären Systems und dadurch eine eventuelle Ergebnisverzerrung dar<sup>26</sup>.

Mit dieser Arbeit wird ein neues Untersuchungsinstrument, der dreidimensionale Rumpfxkursionsstuhl, vorgestellt. Anhand dessen soll erstmals zwischen dem Einfluss der Schwerkraft und der propriozeptiven Reizung auf das vestibuläre System differenziert werden. Durch eine Fixierung des Kopfes bei Auslenkung des Rumpfes wird ein unveränderter Schwerkraftvektor erhalten und so das Entstehen eines redundanten Signals aus dem peripheren Vestibularorgan bei der Ableitung von Nystagmen verhindert. Ebenfalls soll das Augenmerk auf altersbedingte Veränderungen in der Reaktion auf propriozeptive und vestibuläre Reizung gerichtet werden.

Einleitend wird im Folgenden das Gleichgewichtssystem erläutert. Es stellt ein komplexes Konstrukt der Generierung, Weiterleitung und Verschaltung von Informationen aus der Peripherie und den Hirnnervenkernen bis hin zu Reflexantworten sowie Wahrnehmung von Körperposition bzw. -bewegung im Raum dar<sup>27</sup>. Die Stabilisierung des Blickfelds durch den vestibulookulären Reflex (VOR) und die Aufrechterhaltung der Körperhaltung über die vestibulospinalen Bahnen sind für die räumliche Orientierung essentiell<sup>14</sup>. Zunächst werden anatomische und physiologische Grundlagen des vestibulären Systems, Erkenntnisse der Forschung und abschließend die sich daraus ergebende Fragestellung dargestellt.

## **1.2 Das Gleichgewichtssystem im Erdschwerefeld**

### **1.2.1 Die Perzeption von Beschleunigung**

Das Innenohr liegt als anatomische Einheit in einem Hohlraumssystem, dem knöchernen Labyrinth, im Felsenbein (Abb. 1). In ihm befindet sich das, von Lymphe ausgefüllte, häutige Labyrinth. Es besteht aus zwei Sinnesorganen, dem Gleichgewichtsorgan (Labyrinthus vestibularis) und dem Gehörorgan (Labyrinthus cochlearis). Das Gleichgewichtsorgan des Menschen gliedert sich in die drei Bogengänge (Ductus semicircularis lateralis, posterior und anterior) und die

## Einleitung

Otolithenorgane (Utriculus und Sacculus). Beschleunigung, zu welcher ebenfalls die Erdanziehung zählt, stellt die zentrale Referenz für dieses Organ dar <sup>13</sup>.

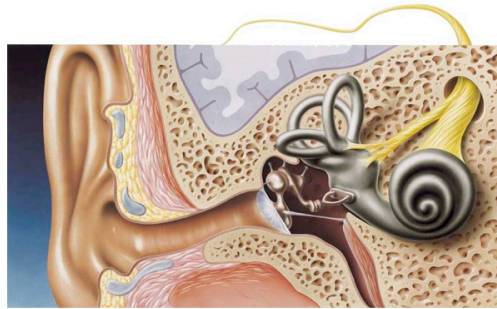


Abbildung 1: Darstellung der Lage des Innenohrs

*(Mit freundlicher Genehmigung der Firma Hennig Arzneimittel)*

Bei den Bogengängen handelt es sich um mit Endolymphe gefüllte ovale Kapillaren, welche für die Drehbeschleunigungsmessung um alle möglichen Raumachsen zuständig sind. Sie stehen in einem 90° Winkel zueinander, wobei ein nach vorne offener Winkel von 30° besteht, welcher der natürlichen leichten Anteflexionshaltung des Kopfes entspricht. Ihr Durchmesser beträgt 0,2 x 0,3 mm. In jedem Bogengang befindet sich die Crista ampullaris (Abb. 2), welche in das Lumen der Kapillare reicht <sup>28</sup>. Die auf der Ampulle sitzenden Sinneshärchen sind von einer Gallertmembran umgeben, der Cupula. Die Rezeptorzelle besitzt circa 70 Stereozilien und ein Kinozilium, welches länger als die anderen Zilien ist. Entsteht eine Winkelbewegung, fließt die Endolymphe des Bogengangs der Bewegungsebene, ihrer Trägheit wegen, gegen die Drehrichtung <sup>14</sup>.

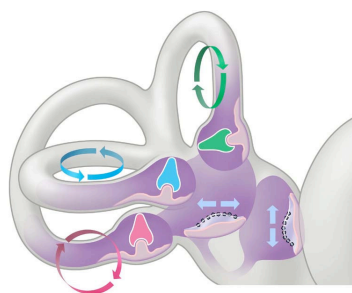


Abbildung 2: Darstellung der Reaktion von Ampulle und Cupula bei Drehbewegung des Kopfes

*(Mit freundlicher Genehmigung der Firma Hennig Arzneimittel)*

Dadurch werden die Sinneshärchen ausgelenkt, dies stellt richtungsabhängig eine Aktivierung oder Hemmung für die primäre Sinneszelle dar. Eine Aktivierung führt zu einer Drehempfindung. Gianna et al. fanden heraus, dass erst Winkelgeschwindigkeiten von ca. 2 °/sec bei Drehbeschleunigungen als Entladungsreiz dienen <sup>29</sup>. Da die Cupula

## Einleitung

die gleiche Dichte wie die Endolymphe aufweist, hat die Erdanziehungskraft oder eine andere lineare Beschleunigung keinen Einfluss auf die afferente Bogengangsentladung<sup>14</sup>.

Das Otolithenorgan gliedert sich in den Sacculus, welcher senkrecht, und den Utriculus, welcher waagrecht zur Körperachse steht. Beide registrieren die Linearbeschleunigung des Kopfes und die Richtungsänderung der Schwerkraft, also die Abweichung des Kopfes von der Senkrechten. Sacculus und Utriculus enthalten die Sinneszellen, die sogenannten Makulae. Auch hier reichen die Zilien in die gallertige Membran aus Mukopolysacchariden. Dieser Membran liegen Kalzitkristalle auf, welche die Dichte der Membran erhöhen und so die Erfassung linearer Beschleunigung erst möglich machen. Kommt es zu einer Tangentialverschiebung der Membran und so zur Auslenkung der Sinneszellen, werden diese aktiviert oder gehemmt<sup>30</sup>.

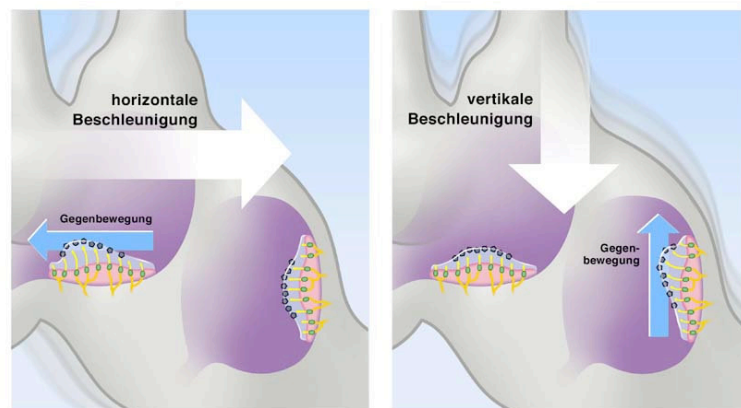


Abbildung 3: Darstellung der Auswirkung von Beschleunigung auf Macula utriculi und sacculi  
(Mit freundlicher Genehmigung der Firma Hennig Arzneimittel)

Die Otolithenmembran des Utriculus lastet im Stand senkrecht auf den Stereozilien. Die horizontale Verschiebung und Neigung des Kopfes sowie lineare Beschleunigung neben der senkrechten Kopfhaltung werden vom Utriculus wahrgenommen. Die Haarzellen des Sacculus sind bei aufrechtem Stand horizontal angeordnet und werden folglich durch Änderungen der Gravitation erregt (Abb. 3). Die Erdanziehungskraft stellt so konstant eine lineare Beschleunigung dar, welche als Referenz zu weiteren vertikalen Bewegungen, wie beispielsweise dem Fahren eines Fahrstuhls, dient. Untersuchungen zu Reaktionen bei Körperbeschleunigungen am Menschen von Mergner et al. zeigten eine Rezeptorentladungen ab Linearbeschleunigungen über

## Einleitung

4 cm/s<sup>2</sup> <sup>31</sup>. Bereits 1975 fanden Fernández und Goldberg anhand von neuroanatomischen Untersuchungen am Affen heraus, dass eine gehaltene Neigung des Kopfes zur Schwerkraft eine konstante lineare Beschleunigung darstellt und gesteigerte Entladungsraten erhalten bleiben <sup>32</sup>. Dies deutet die Problematik der otolithären Differenzierung zwischen Translation und Kopfauslenkung zur Erdbeschleunigung an. Mechanismen, um die räumliche Orientierung in Beschleunigungssituationen des Kopfes zu ermöglichen, stellen Augenbewegungen wie der otolithokuläre Reflex (OOR), der vestibulookuläre Reflex (VOR) und die vestibulospinalen Reflexe dar <sup>33-35</sup>. Werden der Kopf und Körper während einer Beschleunigung statisch gehalten, dient nur noch der OOR mittels Augengegenrollen der Blickfixation <sup>14</sup>. Bei Bewegungen der Halswirbelsäule bzw. des Rumpfes ergänzen diese propriozeptive Informationen ebenfalls die Gleichgewichtsstabilisierung. Beispielsweise während der Kippbewegung des Kopfes und Halses scheinen sich die verschiedenen Reflexe zu ergänzen <sup>11,13</sup>.

### 1.2.2 Die zervikale Propriozeption

Die propriozeptive Information wird in Stellungs-, Bewegungs- und Kraftsinn bzw. nach ihren Rezeptortypen unterteilt. Somit kann zum einen die Position des Körpers im Raum und die Richtung einer Positionsänderung auch im Dunkeln erfasst werden. Zum Anderen misst der Kraftsinn wie viel Muskel eingesetzt werden muss, um einen Positionserhalt oder eine Änderung durchzuführen. Propriozeptoren sind Muskelspindeln, Golgi-Sehnenorgane (GSO) und Gelenksensoren (Tab. 1).

Tabelle 1: Die Rezeptortypen und ihre Afferenzen

Rezeptortyp	Afferenz	Adäquater Reiz	Sinnesmodalität
Muskelspindel primär	Ia	Muskeldehnung	Propriozeption (dynamisch)
Golgi-Sehnenorgan	Ib	Sehnenspannung	Muskelentspannung
Muskelspindel sekundär	II	Muskeldehnung	Propriozeption (statisch)
Gelenkrezeptoren	II, III	Gelenkbewegung	Propriozeption

Die Muskelspindeln werden efferent von  $\alpha$ -Motoneurone und  $\gamma$ -Fasern innerviert und regulieren so auch die Vorspannung und Empfindlichkeit des Dehnungsrezeptors. Afferent werden sie von schnellleitenden Ia und langsameren II Fasern innerviert. Es handelt sich dabei um Proportional-Differential-Fühler. Die GSO werden von afferenten Ib Fasern innerviert und melden als Proportionalfühler die Spannung des Muskels in der

## Einleitung

dynamischen Bewegung, wie zum Beispiel der Dehnung. Die Gelenksensoren sind den Sehnenorganen und den Muskelspinden ähnlich. Die Fasern laufen im ipsilateralen Hinterstrang des Rückenmarks (RM). Diese spinovestibulären Bahnen erreichen den VKK der Medulla oblongata. Die Weiterleitung der Ia und II Afferenzen erfolgt im Hinterhorn des Rückenmarks. Sie enden außerdem an den  $\alpha$ -Motoneuronen, was zur Aktivierung der Efferenz und zur reflexiven Muskelkontraktion führt (Abb. 4) <sup>36</sup>.

Nach zentraler Verarbeitung der eintreffenden Afferenzen mit ihrer Information über den Ist-Zustand kann eine efferente Befehlsmeldung zur Umpositionierung in den Soll-Zustand gesendet werden <sup>37</sup>. Die vestibulospinalen und retikulospinalen Bahnen bilden mithilfe der statischen Halte- und Stellreflexe die supraspinale Kontrolle der Gang-, Stütz- und Zielmotorik <sup>28</sup>.

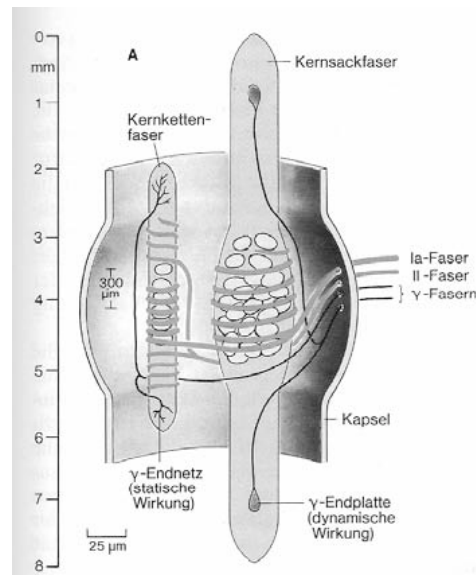


Abbildung 4: Afferente und efferente Verschaltung der Muskelspinde <sup>36</sup>

Der Mensch besitzt etwa 20.000 Propriozeptoren, deren Verteilung im Körper unterschiedlich ist. Eine besonders hohe Dichte an Muskelspindelafferenzen findet sich in den äußeren Augenmuskeln, der Larynxmuskulatur und den Nackenmuskeln. Laut verschiedener Autoren seien 300 bis 500 Muskelspindeln pro Gramm Nackenmuskulatur zu finden <sup>38,39</sup>. Die atlantospinale sowie die atlantooccipitale Muskulatur sind, nicht zuletzt wegen ihres uneffektiven mechanischen Hebels, eher als eine Art Dehnungsmesser zu interpretieren.

Die Verbindung der Nackenregion mit den Vestibulariskernen wurde in Tierversuchen bestätigt. Richmond et al. untersuchten dies an der Katze, Voss et al. am Menschen <sup>40,41</sup>. Ebenso ist laut Neuhuber et al. die Zahl der Lamellenkörperchen pro

## Einleitung

Gramm Muskel, welche als Mechanosensoren dienen, in dem Bereich sehr hoch <sup>15</sup>. Insbesondere die kurzen, gelenknahen Muskeln und Sehnenspindeln stellen den Ursprungsort der supraspinal relevanten Propriozeptoren dar <sup>42</sup>. Laut Hülse et al. liegt im Bereich der oberen drei Zervikalnerven, in der suboccipitalen Muskulatur, der Ursprung der an der Gleichgewichtsregulation beteiligten Fasern (Abb. 5) <sup>43</sup>. Von dort projizieren laut Neuhuber et al. besonders die dickkalibrigen Ia Muskelafferenzen zum Nucleus cuneatus externus und darüber direkt zu dem ipsilateralen deszendierenden und medialen Kern des Vestibulariskernkomplex, wo auch die Afferenzen des peripheren Vestibularorgans enden. Indirekten Einstrom der zervikalen Propriozeptoren erhalten besonders der laterale und superiore Vestibulariskern über den kontralateralen Nucleus cervicalis centralis und vestibuläre Interneurone <sup>15</sup>. Es konnte bisher jedoch nicht endgültig aufgeschlüsselt werden, ob die Fasern des Typ Ia (phasisch) oder II (tonisch) den stärkeren Einfluss auf das somatoafferente Einstromgebiet haben.

Taylor et al. und Fitzpatrick et al. zeigten auf, dass die zervikale Propriozeption besonders bei langsamen Kopfbewegungen dem Vestibularorgan bei der Feinregistrierung und Kontrolle der Position überlegen sei <sup>44,45</sup>. Unter anderem der von Tjell und Treleaven verwendete „smooth pursuit neck torsion test“ nutzt diesen Ansatz <sup>46</sup>. Hierbei untersuchten die Autoren die langsame Blickfolge und konnte so Patienten mit Unfällen an der HWS und Gesunde unterscheiden <sup>47</sup>.

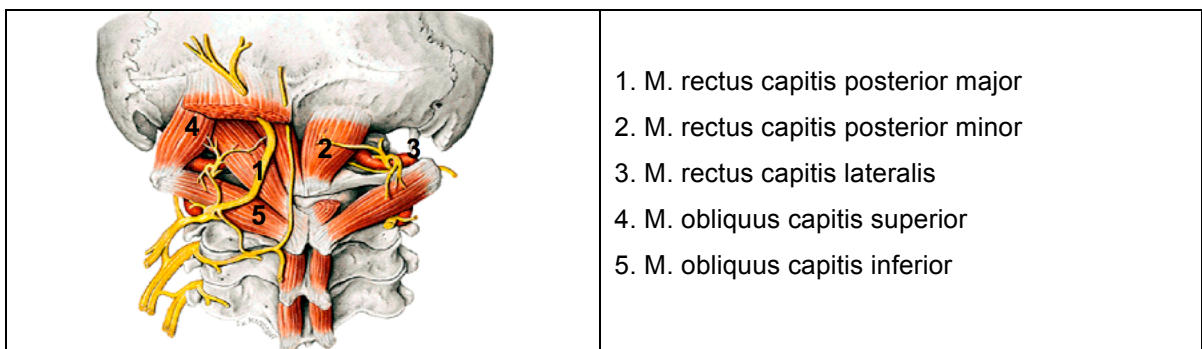


Abbildung 5: Die Muskelansätze der 5 kurzen Muskeln am Atlasquerfortsatz <sup>48</sup>

Neuhuber et al. prägten den Begriff der „zerviko-vestibulozervikalen Schleife“, welcher die Verbindung der Halsmuskelafferenzen über die vestibulospinalen Neurone mit dem Vorderhorn des Rückenmarks und gleichzeitig dem Hinterhorn des Halsmarks beschreibt <sup>49</sup>. Durch diesen Mechanismus sollen Typ Ia Halsmuskelafferenzen aktiviert und Typ II Afferenzen gehemmt werden, um Störsignale zu unterdrücken.

Bei Störung der Muskelspindelaktivität nach Traumen, durch Fehlhaltungen,

## Einleitung

Verspannungen oder Blockierungen könnte es zu einer Asymmetrie des Einstroms von Nozizeptoren und Propriozeptoren und so zu einem neuromuskulären Defizit kommen. Dies kann zu einer vielgestaltigen zervikalen Missempfindung führen, siehe Abb. 6<sup>50,51</sup>.

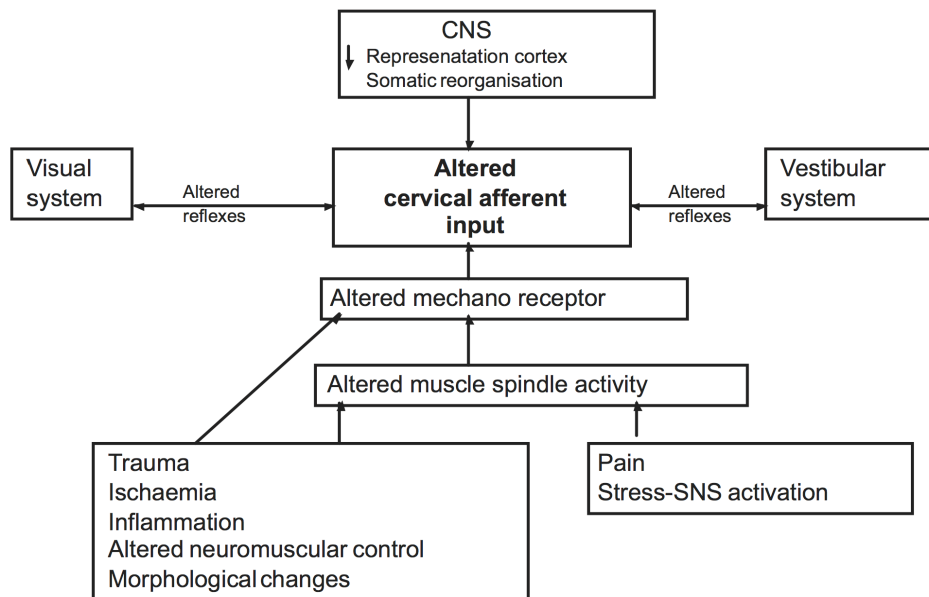


Abbildung 6: Beeinträchtigungsmechanismen des zervikalen somatosensorischen Inputs bei Funktionsstörungen des Nackens nach Treleaven<sup>50</sup>

Nach zervikalen Distorsionen können neben dem mit Schwindel assoziierten Unsicherheitsgefühl auch Kopf- und Nackenschmerzen, Tinnitus, Ohrenscherzen und weitere Symptome auftreten. Dies erscheint durch die vielfältigen Verschaltungsmöglichkeiten der zervikalen Afferenzen durchaus plausibel<sup>15</sup>. Für diese spezielle Situation folgt eine detaillierte Erläuterung der vestibulären Afferenzverschaltung.

### 1.2.3 Die zentrale Integration peripherer Sensorinformationen

Bei einer Kopf- oder Körperbewegung werden die Informationen der zervikalen Propriozeption, der Augen und beiden Vestibularorgane weitergeleitet. Die Vestibularorgane werden bilateral und konvergierend nach zentral (ZNS) weitergeleitet und dort abgeglichen<sup>44</sup>. So ist auch bei einem einseitigen Vestibularisausfall eine Aufrechterhaltung der Balance zu ermöglichen<sup>52</sup>. Die bipolaren Neurone des Ganglion vestibulare leiten die Erregung in die im Hirnstamm liegenden Vestibularkerne (Nucleus superior Bechterew, Nucl. medialis Schwalbe, Nucl. lateralis Deiters und Nucl. inferior Roller)<sup>27</sup>. Hier findet die erste Konvergenz von Signalen aus dem Vestibularorgan, des somatosensorisch-propriozeptiven Systems der Peripherie und schließlich des



## Einleitung

optischen Apparates statt (Abb. 7). In dem sogenannten Vestibulariskernkomplex (VKK) gelangt die Information dann über das zweite Neuron zur Gegenseite und zu den Augenmuskelkernen (Nucleus oculomotorius), von dort über ein Effektorneuron zu den Augenmuskeln. Über diese erfolgt die Umsetzung der stabilen Fixierung eines Objekts. Bei Bewegungen der Umwelt, wie bei einer Fahrt mit der Eisenbahn, dient der optokinetische Reflex (OKN) der natürlichen Blickfeldstabilisierung. Hingegen bei einer schnellen Bewegung des Kopfes, wie bei einem Betrachter eines Tennisturnier, geht die Augenbewegung kompensatorisch in die entgegengesetzte Richtung, dies wird als vestibulookulärer Reflex (VOR) bezeichnet. Er ermöglicht die schnelle Blickfeldstabilisierung nach einer Kopfbewegung bis zu  $50^\circ/\text{s}$ <sup>14</sup>. Der VOR kann durch periphere vestibuläre Störungen verändert werden<sup>33</sup>. Bei statischer Kippung des Kopfes ist der Reiz auf die Schwerkraft linear, und der Reflex wird als L-VOR oder otolithokulärer Reflex (OOR) bezeichnet. All diese Reflexe setzen den afferenten Informationseinstrom in Effektorreaktionen um<sup>14,53</sup>.

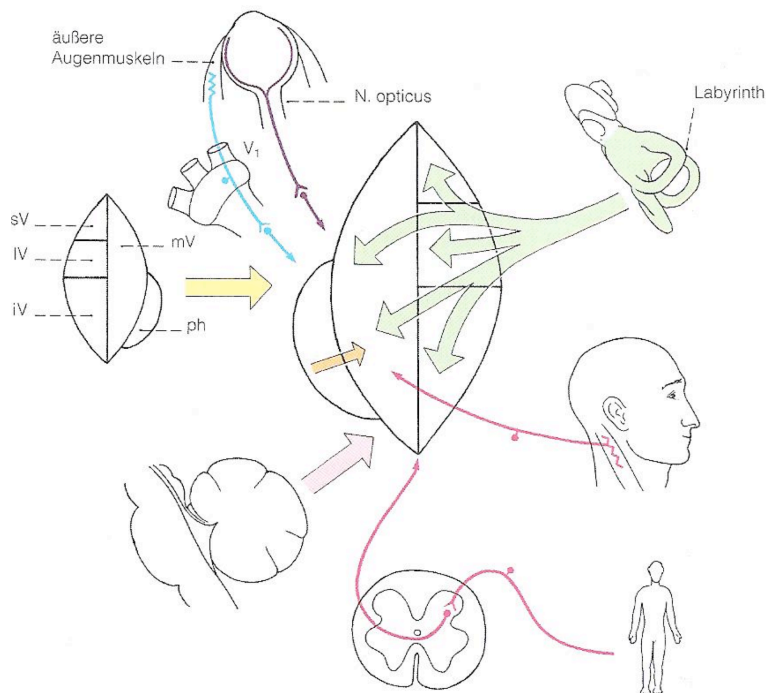


Abbildung 7: Darstellung der Afferenzen zum Vestibulariskernkomplex<sup>54</sup>

Der Vestibulariskernkomplex (Nucl. Vestibularis sup., lat., inf. und med.; Nucl. prepositus hypoglossi) erhält Input von multiplen Sensoren einschließlich den vestibulären Afferenzen des VII. Hirnnerven, okulomotorischen Arealen des Hirnstamms, dem vestibulären Cerebellum, verschiedenen Kortexarealen und den Propriozeptoren des Nackens;. Legende: V1= Nervus ophthalmicus, sV, IV, iV, mV= Nucleus superior, laterales, inferior, mediales, ph= Nucleus prepositus hypoglossi

Eine weitere Afferenz zum VKK stellen die Propriozeptoren des Kopf-Rumpf-

## Einleitung

Überganges dar. Der größte somatosensorische Einstrom stammt aus den tiefen autochthonen Muskeln des kraniozervikalen Übergangs aus C2 bis C4<sup>55,56</sup>. Weiter kaudal sind solche Konvergenzen nicht mehr zu finden. Die aufsteigenden Muskelspindelafferenzen projizieren direkt über den Nucleus cuneatus externus ipsilateral zum VKK, Nucleus prepositus hypoglossi und zum ventralen Cochleariskern. Vom Nucleus cervicalis centralis (CCN) gelangen Muskelspindelinformationen indirekt kontralateral durch die aufsteigenden Bahnen zum Flocculus des Kleinhirns und insbesondere zum Nucleus vestibularis lateralis<sup>56</sup>. Die Bogengänge projizieren ebenfalls auf den CCN und konvergieren dort<sup>57</sup>. Dies erklärt die spinovestibuläre Konvergenz, welche einen Abgleich mit labyrinthären Afferenzen und so die Grundlage für die Kontrolle von Kopf- und Körperstellung im Raum ermöglicht. Als okuläre Manifestation der neuronalen Verbindung und des Einflusses der zervikalen Propriozeption auf das visuelle und vestibuläre System wurde der experimentell abgeleitete sogenannte zervikookuläre Reflex (COR) definiert<sup>58,59</sup>. Als COR werden reflexartige Augenbewegungen, die während einer Relativbewegung zwischen Kopf und Rumpf entstehen, verstanden. Seine Reflexbahnen erhalten über die Vestibulariskerne, welche zudem Afferenzen der Typ-Ia-Fasern erhalten, sekundäre Verbindungen zum okulomotorischen Apparat<sup>60</sup>. Experimentell kann der COR nur unter Ausschluss des vestibulären Reflexes erfolgen. Es besteht eine synergetische Wechselwirkung zwischen dem COR, dem VOR und dem OKN, die im Fall einer zervikalen Funktionsstörung verändert sein kann (siehe Kapitel 1.3.3.1.1)<sup>53</sup>.

Neuhuber et al. nehmen zudem an, dass sekundäre Neurone konvergierenden Input des N. Trigemini erhalten und sich so weitere Möglichkeiten an Interaktionen ergeben<sup>15</sup>. Des Weiteren gelangt die Information vom VKK zum Flocculus des Vestibulocerebellums sowie zum Gyrus postcentralis, wo die bewusste Wahrnehmung der Bewegung stattfindet. Über die vestibulospinale Bahn erfolgt die Weiterleitung ins Rückenmark und über den vestibulospinalen Reflex die reflektorische muskuläre Stand- und Gangregulation.

Fällt eine oder mehrere der Informationsquellen zum VKK aus, kann dies einen Einfluss auf die zugehörigen Reflexe und somit auf das Gleichgewicht nehmen<sup>61</sup>. Meist lässt sich der Wegfall einer Sensorinformation kompensieren, sollten aber mehrere Systeme beeinträchtigt sein, wie das Sehen, das Hören und eine Störung der zervikalen Propriozeption, ist es wahrscheinlich, dass es zu einer Dekompensation kommt.

## 1.3 Stand der Forschung zur Gleichgewichtsfunktion im Erdschwerefeld

### 1.3.1 Der Schwerkrafteffekt auf die räumliche Orientierung

Wie bereits einleitend erwähnt, stellt die Schwerkraft für das Vestibularorgan, insbesondere für den Sacculus des Otolithenorgans, eine entscheidende Referenz dar. Die Otolithen messen die kombinierte gravito-inertiale Kraft (GIF), welche als Differenz zwischen Schwerkraft ( $g$ ) und Beschleunigung ( $a$ ) definiert wurde:

$$\text{GIF} = g - a \text{ }^{62}.$$

Bewegungen, die Rumpfneigungen und Rumpfbeschleunigungen beinhalten, wie Motorradfahren, Schaukeln, Fliegen oder Laufen besitzen eine GIF von Null und stellen somit ein Problem dar.

Hamann et al. untersuchten den dynamischen otolithokulären Reflex am Menschen. Die Autoren führten unter anderem aus, dass bei einer Stimulation der Otolithenorgane zentral nicht unterschieden werden könne, ob sie auf eine Lateralbeschleunigung oder auf eine Kippbewegung des Kopfes relativ zur Erdbeschleunigung reagierten<sup>63</sup>. Green et al. bestätigten dies in ihren Experimenten zur multimodalen Sensorleistung für die Erstellung eines Modells der Eigenbewegung im Raum<sup>64,65</sup>. Rader et al. führten 2009 eine Studie am Menschen zu räumlicher Bewegungsperzeption bei Schaukelbewegungen in Dunkelheit durch. Die Probanden waren in der Lage Translationsbewegungen von einer Neigung trotz des Wegfalls verschiedener Sensorinformationen, wie der okulären, zu unterscheiden. Die Autoren schlussfolgerten, dass weitere Sensorinformationen eine ebenfalls wichtige Rolle für die Orientierung spielen müssen<sup>62</sup>. Lackner et al. fassten in einem Review zusammen, dass eine entscheidende Rolle der Propriozeption zuzuschreiben sei<sup>11</sup>. Dafür stützten sich die Autoren auf die neu gewonnenen und im Anschluss beschriebenen Erkenntnisse aus Weltraumforschung und Posturographie.

Die Perzeption des Kopf-Rumpf-Winkels in Abwesenheit von Otolitheninformation wurde in den letzten Jahren intensiv, unter anderem von Geisinger et al., Malmström et al., Pinsault et al., Ceyte et al., Clarke et al. und Parker et al. , untersucht<sup>16,17,19,66-69</sup>. Im

## Einleitung

parabolischen Flug führten Ceyte et al. Untersuchungen unter Aufhebung der Erdanziehungskraft durch. Dafür wurden sieben gesunde Probanden mit und ohne Erdanziehungskraft daraufhin untersucht, wie sie die vertikale Position einer Stange bei geneigtem und geradem Kopf einschätzten. Die Ergebnisse zeigten kaum Veränderung bei der Positionierung der Stange. Die Autoren kamen zu der Schlussfolgerung, dass die propriozeptiven Signale aus den Nackenmuskeln des Menschen ausreichend wären, um eine akkurate Information zu Kopf-zu-Rumpf zu gewährleisten<sup>17</sup>.

Clarke et al. untersuchten 2007 unter der Bedingung der Mikrogravität an vier Astronauten okuläre Reaktionen auf veränderte Ansprüche an die sensomotorische Koordination. Die Autoren stellten fest, dass Kopfbewegungen in der Schwerelosigkeit vergleichbar gut durchgeführt wurden, wie im Schwerefeld der Erde. Außerdem schien sich die Reaktion auf Provokation im Verlauf des 435 Tage dauernden Flugs im Weltall nach einer initialen Steigerung wieder zu vermindern. Er schloss daraus unter anderem, dass in Schwerelosigkeit die afferenten Otolitheninformationen geringer gewichtet, während die propriozeptiven Afferenzen des Nackens invers hochreguliert würden und als effektiver Ersatz zu genügen schienen<sup>16</sup>. Eine weitere Untersuchung im Weltall wurde von Parker et al. durchgeführt. In einem Review fasste der Autor zusammen, dass laut seinen Erkenntnissen die vestibulären Signale im Verlauf eines Flugs im Orbit sich aufgrund einer neuen Interpretation im ZNS verändern und neu gewichtet werden. Er betonte, dass das Verständnis für somatosensorische Rezeptorinformation weiter untersucht werden müsse<sup>67</sup>.

Malmström et al. stellten fest, dass Probanden mit bilateraler Vestibulopathie (n= 11) nicht signifikant unterschiedlich von den Kontrollen (n= 15) eine akkurate Kopfposition reproduzieren konnten und schlussfolgerten ebenfalls, dass dem propriozeptiven Input eine Ersatzfunktion zukomme<sup>68</sup>.

Geisinger et al. untersuchten die sogenannte „subjektive visuelle Vertikale“<sup>66</sup>. Den Probanden (Kontrollgruppe: n= 28, vestibulär defizitäre Gruppe: n= 5) wurde ein weißer Streifen in einer Brille präsentiert. Diese sollten ihn mithilfe von Kopfverlagerung in die zur Schwerkraft befindliche räumliche vertikale Position bringen. Hierbei wurde eine stärkere Schwankung bei der kranken Gruppe gefunden. Es ist zu beachten, dass in dieser Untersuchung die Otolithen zur Schwerkraft in ihrer Position verändert wurden, der Kopf zum Beispiel gekippt wurde.

## Einleitung

Der gegenüber der Ruheposition zur Schwerkraft ausgelenkt gehaltene Kopf stellt für das Rezeptororgan der Macula sacculi einen anhaltenden Beschleunigungsreiz dar. Die Tonusänderung der Entladungsrate bleibt in gehaltener Auslenkung somit vorhanden<sup>14,32</sup>. Dies stellt einen wichtigen Umstand bei der Untersuchung in tonischer Kopfhaltung dar. Eine Studie mit dem „Cervicocephalic Relocation Test“ von Pinsault et al. wurde bei fixiertem Kopf durchgeführt, um eine vestibuläre Reizung als Störquelle auszuschließen<sup>69</sup>. Die Probanden sollten durch das Drücken eines Knopfes signalisieren, wann sie glaubten den zuvor als neutrale Kopfposition angesagten Ausgangspunkt nach einer torsionalen Rumpfauslenkung wieder erreicht zu haben. Hierbei fand sich kein signifikanter Unterschied zwischen Patienten mit defektem Labyrinth (n= 7) und der Kontrollgruppe (n= 7), wohl aber Patienten mit Nackenbeschwerden (n= 7). Die Autoren zogen das Fazit, dass es bei der Lagebestimmung der neutralen Kopfposition keiner vestibulären Information bedarf, jedoch die zervikale Propriozeption für die Repositionierung eine Rolle spielt.

Nach den genannten Erkenntnissen der Forschung ist zu postulieren, dass die Sensibilität der Otolithenorgane auf die Änderung des Schwerkraftvektors einen möglichen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse des kraniozervikalen Übergangs und der zervikookulären Reaktionen haben könnte.

### **1.3.2 Der Alterseffekt auf die räumliche Orientierung**

Schwindel und Gleichgewichtsstörungen stellen ein häufiges Symptom der älteren Bevölkerung dar. Regulär kann durch die zentrale Integration aller Sensorinformationen ein Ausgleich der Minderfunktion eines einzelnen Sensors ermöglicht werden. Da im Alter allerdings häufig mehrere Systeme zur Stabilisierung des Gleichgewichts, wie das Sehen, Hören, das Vestibularorgan und die kognitiven Fähigkeiten gleichzeitig betroffen sein können, kommt es leichter zu einer unstimmigen Sinnesintegration. In verschiedenen Studien wurde besonders der Alterungsprozess und die Störanfälligkeit der vestibulären Peripherie als Ursache gefunden<sup>51</sup>. Kruschinski et al. schätzen die Häufigkeit peripherer Schwindelursachen auf über 12 %. Eine Seneszenz der zentralvestibulären Bahnen spielen laut den Autoren in ca. 3 % der Fällen eine Rolle<sup>5</sup>. Ishiyama et al. erforschten im Jahr 2009 anhand immunhistochemischer Proteinexpressionen die Zahl der im Innenohr vorkommenden Haarzellen, Ganglion Zellen und Nervenfasern. Die Arbeitsgruppe fand, dass sich deren Bestand im Alter progressiv verminderte, was eine Abnahme der Stabilität in Gang und Balance mit sich

## Einleitung

ziehe. Häufig ginge dieser Sinneszellverlust mit einer verminderten Aktivität, gehäuften Stürzen und Depressionen einher<sup>51</sup>.

Schweigart et al. führten bereits 2002 eine Studie durch, in welcher mittels verschiedener Provokationstests die vestibulären und propriozeptiven Afferenzen an 50 Probanden zwischen dem 15. und 76. Lebensjahr untersucht wurden<sup>70</sup>. Einleitend beschrieb die Forschungsgruppe einen im Alter auftretenden starken Abbau der vestibulären Funktion, welcher vergleichbar mit einem vestibulären Ausfall sei. Ziel war festzustellen, ob die Propriozeptoren des Nackens dieses Defizit ausgleichen konnten. Es wurde auf einem horizontal rotierenden Drehstuhl entweder ausschließlich vestibulär, propriozeptiv oder kombiniert gereizt. Die Probanden sollten einen, initial gebotenen, visuellen Target nach Provokation wieder einstellen. Bei alleiniger vestibulärer oder propriozeptiver Reizung erfüllten die älteren Probanden diese Aufgabe weniger gut als die jüngeren. Die Kombination von vestibulärer und propriozeptiver Information aus dem Nacken brachte hingegen kaum Fehler bei der Aufgabenerfüllung. Schweigart schlussfolgerte, dass die räumliche Orientierung bei freier Körperbewegung im Raum durch chronischen Abbau der vestibulären Funktion erschwert sei, bei propriozeptiver Zusatzinformation die Orientierung gewährleistet werden könne. Dies gilt laut ihm besonders für die langsamen Geschwindigkeiten<sup>70</sup>.

Die altersbedingte Degeneration neuronaler Strukturen, besonders des Frontal- und Temporallappens sei unter anderem laut Studien von Hirvonen et al. und Bartzokis et al. besonders ausgeprägt. Diese Autoren unterstützen die Hypothese, dies als Ursache für Gleichgewichtsstörungen im Alter zu interpretieren<sup>71,72</sup>.

In einer Studie von Poole et al. verglichen die Autoren den Einfluss von Nackenbeschwerden auf Balance- und Gang-Parameter, gemessen mittels der Posturographie, an 40 Probanden zwischen dem 65. und 82. Lebensjahr. Eine gesteigerte Gleichgewichtsstörung war nur bei älteren Probanden mit Nackenbeschwerden nachweisbar<sup>9</sup>. Die Autoren bezogen sich auf eine Studie von Partland et al. in der eine hohe Korrelation zwischen degenerativen Fettinfiltraten in der zervikalen Muskulatur und Nackenbeschwerden sowie Balancestörungen beobachtet wurden<sup>73</sup>.

Diese in den verschiedenen dargelegten Studien bereits gewonnenen Erkenntnisse lassen die Provokation oder Fehlfunktion des Vestibularorgans als ergebnisverzerrenden Faktor bei den bisherigen Untersuchungen der zervikalen

## Einleitung

Afferenz im dreidimensionalen Halsdrehtest plausibel erscheinen. Eine Addition der verschiedenen Informationen könnte zu einer ableitbaren Reizmodulation und so zu unspezifischen Ergebnisse führen, so dass eine isolierte zervikale Reizung notwendig erscheint.

### 1.3.3 Die zervikalen Funktionsstörungen

Im Laufe der Zeit wurden multiple Begriffe mit unterschiedlichen Bedeutungen für die zervikalen Missempfindungen geprägt (Tab. 2).

Tabelle 2: Bezeichnungen für die zervikale Missempfindung

Bezeichnung	Autor
Zervikaler Schwindel	Holtmann V. <sup>23</sup> , Hölzl M. <sup>26</sup>
Vertebragener Schwindel	Hülse M. <sup>43</sup> , Neuhuber W. <sup>15</sup> , Wolff H. <sup>74</sup>
Zervikal Syndrom	Graf M., Moll H., Harke G. <sup>75</sup>
Zervikale Strukturstörung	Kayser R. <sup>76</sup>
Vertebragene Gleichgewichtsstörung	Iro H., Biesinger E. <sup>77</sup>
Zervikozephales Syndrom	Graf M. <sup>78</sup>
Zervikogener Schwindel	Ringelstein E.B. <sup>20</sup> , Hamann K.-F. <sup>21</sup> ,
Zervikogenes Syndrom	Neuhuber ,W. <sup>49</sup>

Ältere Theorien interpretierten den zervikalen Schwindel als Symptom einer gestörten arteriellen Versorgung durch die Arteria vertebralis, einer gestörten Innervation der Arterie durch den Sympathikus oder eines „Whiplash-Injurs“<sup>79-81</sup>. Mit der Begriffsgründung des „Whiplash“ im Jahre 1928 wurde die Annahme einer existierenden physiologischen und neuroanatomischen Verbindung zwischen Hals und Kopf etabliert. Hassenstein et al. meinten 1988 anhand theoretischer Überlegungen sei ein kraniozervikales Messsystem als „Verrechnungsstelle“ zur Registrierung und Steuerung der Bewegung sogar nötig<sup>82</sup>. Die Überlegungen zur Besonderheit dieser Region wurden von diversen Autoren, insbesondere Hülse und Seifert vertreten<sup>43</sup>.

Neben den mittels Bildgebung gut diagnostizierbaren strukturellen Schäden der Halswirbelsäule nach Trauma oder durch Degeneration stellen die häufigeren funktionellen Störungen immer noch eine Herausforderung dar. Sie sind kaum objektiv darstellbar. Kayser et al. teilten sie in primäre und sekundäre zervikale Funktionsstörungen ein (Tab. 3)<sup>76</sup>. Dies ist entscheidend um zu erfassen, dass nicht unbedingt ein traumatisches Ereignis vorbestanden haben muss, damit eine zervikale Problematik entsteht. Auch chronische Fehlhaltungen sowie -belastungen im Alltag

## Einleitung

können zu diesen Beschwerden führen, wenn keine ausreichende Kompensation durch das visuelle und vestibuläre System besteht<sup>70</sup>.

Tabelle 3: Einteilung zervikaler Funktionsstörungen nach Kayser et al.<sup>76</sup>

<b>Primäre zervikale Schmerzen und/oder Funktionsstörungen</b>	<b>Sekundäre zervikale Schmerzen und/oder Funktionsstörungen</b>
Keine nachweisbare oder anamnestisch eruierbare Verletzung oder Erkrankung von Wirbelsäule, Muskulatur oder innerem Organ	In Folge einer akuten Verletzung oder Erkrankung von Wirbelsäule, Muskulatur reflektorisch entstanden und fortbestehend

Die Klinik und Untersuchung der zervikalen Beschwerden stellt sich zudem als sehr variabel dar<sup>30</sup>:

Die zervikale Missempfindung äußert sich häufig durch ein Ungleichgewichtsgefühl. Sie kann als Sekundenschwindel anfallsartig und besonders nachts oder morgens auftreten<sup>30</sup>. Ebenso wie Schmerzen im Bereich der Schläfen oder des Kiefers stellen Nackenverspannungen und –schmerzen, durch die ansetzenden kurzen zervikalen Muskeln, ein weiteres wichtiges Indiz dar. Zudem sollte immer eine Anamnese im Hinblick auf Wirbelsäulenschäden erhoben werden. Klinisch wurde der Kopfgelenksbereich bisher mit der manuellen Untersuchung, dem 2-Waagentest nach Lewitt, dem Patrick-Test, dem radiologischen Befund, der Posturographie (PUG) und dem Unterberger-Tretversuch beurteilt. Laut Biesinger et al. ist eine palpatorische Resistenz durch dekompenzierte Muskulatur ein Zeichen für den Ort der funktionellen Störung<sup>77</sup>. Hülse et al. vertreten die Ansicht, dass die klinische Diagnose einer zervikal bedingten Störung mit manualmedizinischer Unterstützung und nur dann gestellt werden sollte, wenn sie nach Ausschluss aller anderen möglichen Ursachen den primären Auslöser der Pathogenese darstellt und somit reversibel ist<sup>60</sup>.

Es ist kritisch anzumerken, dass die bisherige klinische und manualmedizinische Diagnostik als von geringem Stellenwert angesehen wird, da erhobene Befunde nur ungenügend dokumentierbar, objektiv oder reproduzierbar seien. Insbesondere die Autoren Brandt, Poeck und Hamann bemängeln die schlechte Abgrenzbarkeit zervikaler von anderen Schwindelursachen und kritisieren die Qualität bisheriger Studien<sup>12,21,22</sup>.



## Einleitung

Tabelle 4: Forschungsansätze zu der zervikalen Afferenz

<b>Ansatz</b>	<b>Umsetzung</b>	<b>Autor</b>
Manualtherapie	Lösen muskulärer Dysbalancen und Wirbelgelenksblockaden	Wolff <sup>74</sup> , Hülse <sup>83</sup> , Graf <sup>75</sup>
Okuläre Diagnostik	Ableitung von Nystagmen in Provokationspositionen des Halses mittels Frenzelbrille, ENG und VOG	Hölzl <sup>26,84</sup> , Kelders <sup>53</sup> , Holtmann <sup>23</sup> , Brandt <sup>12</sup>
Posturale Regulation	Beurteilung der spino-vestibulären Reflexe mittels Posturographie und CCG	Endo <sup>85</sup> , Malmström <sup>68</sup> , Treleaven <sup>50</sup>
Kraniozervikale kinästhetische Sensibilität	Repositioning-Test, Subjektiver Nulldurchgang der Kopfgelenke und Augenrückstelltest nach Rumpfdrehung zur Messung des Kopf-zu-Rumpf Stellungssinnes	Heikkilä <sup>86</sup> , Pinsault <sup>69</sup> , Teng <sup>87</sup> , Revel <sup>88</sup> , Treleaven <sup>89</sup> , Weikert <sup>90</sup>
Bildgebende Diagnostik	MRT, CT, Röntgen zur Darstellung von Läsionen, Mikrotraumen, Ödemen und Fettinfiltration	Volle, Montazem <sup>91</sup> , Anderson <sup>92</sup> , McPartland <sup>73</sup>
Injektionstherapie	Injektion von Lokalanästhetika und Botulinumtoxin neben den ersten drei Intervertebralgelenken mit folgender Messung der afferenten Impulse und Reflexe	Wilson <sup>93</sup> , Lord <sup>94</sup>
Neuroanatomie	Untersuchung der Afferenzen des kraniozervikalen Übergangs	Bankoul <sup>42</sup> , Neuhuber <sup>61</sup> , Liu <sup>95</sup> , Thomson <sup>57</sup>
Chirurgische Intervention	Radiofrequenzneurotomie (CRFN): Unterbrechung der Nervenversorgung der Facettengelenke der HWS mittels Radiowellen	Pruhansky <sup>96</sup> , MacVicar <sup>97</sup>

Holtmann et al. stellten fest, dass sich gesunde Probanden von Patienten mit einem oberen Zervikalsyndrom im häufig angewandten phasischen Halsdrehtest durch Torsion in ihrer Nystagmusreaktion nicht voneinander unterscheiden. Die Autoren schlussfolgerten, dass die bisher angewandten Methoden keine für den zervikalen Schwindel pathognomonischen Ergebnisse ergaben <sup>23</sup>.

Castro et al. führen den psychologischen Faktor bei Schwindel nach Halswirbelsäulenverletzungen an, welcher zu einer falschen Darstellung der Beschwerden führen könne <sup>24</sup>. Experimentell wurden und werden weiterhin vielzählige Studien zur zervikalen Funktionsstörung durchgeführt, welche sich auf unterschiedlichste Untersuchungsansätze konzentrieren (Tab. 4).

### **1.3.3.1 Die Untersuchung der zervikookulären Bahnen**

Detailliert erwähnt seien hier die bereits in Tabelle 4 dargestellten Studien, welche sich auf die okulären Parameter (Nystagmen) beziehen, da mit diesem Ansatz in der vorliegenden Studie gearbeitet wurde. Die kraniozervikale Sensibilität und die Posturographie wurden ebenfalls untersucht und werden anschließend erläutert.

Der Nystagmus stellt eine unwillkürliche, rhythmische Bewegung des Auges dar. Bereits in Ruhe beobachtet wird er als Spontannystagmus bezeichnet<sup>98</sup>. Mit Hilfe der 3D-Videookulographie kann eine Messung der spontanen Nystagmusaktivität (SPN) durchgeführt werden. In vorherigen und dieser Studie(n) stellte sie für anschließende Messungen den Ausgangswert, die sogenannte Baseline, dar.

Provozierend können u.a. Bewegungen, experimentell applizierte Reize (physiologisch) oder Erkrankungen bzw. Schädigungen (pathologisch) sein<sup>99</sup>. Der physiologisch auftretende kompensatorische Nystagmus dient der Aufrechterhaltung der Wahrnehmung. Der pathologische Nystagmus hat einen krankhaften Ursprung und kann in seiner variablen Form auf den Schädigungsort hinweisen<sup>100</sup>. Beispielsweise genannt sei der typische Befund eines Horizontalnystagmus (HN) bei Ausfall eines peripheren Vestibularorgans. Der Vertikalnystagmus (VN) steht bis heute für eine Störung zentraler Genese. Er kann, entsprechend seiner Schlagrichtung, in Upbeat- und Downbeat-Nystagmus, unterteilt werden. Besonders zum UBN sind allerdings wenige Informationen vorhanden<sup>101</sup>. Es wird in der Forschung versucht experimentell provozierte Nystagmen mit verschiedenen Ausprägungen spezifischen Entstehungsorten zuzuordnen.

#### **1.3.3.1.1 Das phasische Untersuchungsdesign**

Holtmann et al. untersuchten im sogenannten „Halsdrehtest“ den zervikalen Nystagmus der während einer Torsion des Rumpfes bei fixiertem Kopf auftrat und bezeichnete ihn als zervikookulären Reflex (COR)<sup>58</sup>. Der COR ist folglich die optische Manifestation der Wirkung der zervikalen Propriozeptoren auf das visuelle und vestibuläre System<sup>102,103</sup>. Bei einer Drehgeschwindigkeit von 5 °/s zeigte der Verstärkungsfaktor „Gain“ des COR sein Maximum, ab 20 °/s fiel er wieder ab<sup>58</sup>. Bei langsamen Bewegungen zeigt er folglich seine höchste Aktivität. Dies unterscheidet ihn vom VOR, welcher besonders bei schnellen Kopfbewegungen aktiv ist.

In Untersuchungen von Bronstein et al. wurde der Kopf ebenfalls fixiert während der Rumpf rotiert wurde. So sollte ein VOR bei Reizung der zervikalen Afferenzen

ausgeschlossen werden. Die Arbeitsgruppe beobachtete, dass der COR die Rolle der Auge-Kopf-Koordination des VOR bei ausgefallenem Labyrinth übernahm<sup>59</sup>.

Auch Carmona et al. fanden eine Wechselwirkung zwischen vestibulärem Defizit und COR. Der „Gain“ des COR stieg bei vestibulär Erkrankten auch bei höherer Drehfrequenz weiter an, statt wieder abzufallen<sup>104</sup>. Gdowski et al. untersuchten die Wechselwirkung von COR und VOR im Tiermodell. Kelders et al. und Montfoort et al. bestätigten mit ihren Ergebnissen diese am Menschen<sup>53,105-107</sup>. Dabei wurde bei vestibulär und zervikal defizitären Probanden sowie im höheren Alter ein Abfall des VOR und ein verstärkter „Gain“ des zervikookulären Reflexes (COR) registriert. Dem COR wird folglich bereits seit Jahrzehnten eine Rolle der Stabilisierung des Blickfeldes bei Relativbewegungen zwischen Kopf und Rumpf zugesprochen.

Diese sogenannten „phasischen“ Ansätze beschäftigen sich mit Untersuchungen innerhalb der Reflexgesetzmäßigkeiten, die während einer Bewegung entstehen. Holtmann et al. kritisierten, dass der COR bei Gesunden als auch bei zervikal defizitären Patienten ableitbar war. Somit räumten die Autoren dem Reflex keine Bedeutung ein. Die Erhebung von Reflexen stellte sich auch bei anderen Autoren als äußerst sehr variabel und störanfällig dar und konnte sich so bis auf weiteres klinisch nicht durchsetzen<sup>103,108</sup>. Da die Beurteilung der COR sich im klinischen Alltag als schwierig darstellte, gingen folgende Untersuchungsansätze mehr in Richtung des tonischen Untersuchungsdesigns. So sollten bisherige reflexbedingte Störfaktoren wie Trainingszustand und Vigilanz vermindert werden.

### **1.3.3.1.2 Das tonische Untersuchungsdesign**

Um diese Reflexbedingung zu verhindern wurde in Vorstudien unserer Arbeitsgruppe ein tonisches Konzept entwickelt. In dem hier präsentierten Untersuchungsansatz wurde folglich nicht während der Bewegung gemessen, sondern in der statischen Haltephase<sup>26,84</sup>. Mit dem sogenannten eindimensionalen Halsdrehtest (1D-HDT) wurde zunächst versucht, durch gehaltene Rumpftorsion bei fixiertem Kopf horizontale Nystagmen abzuleiten. Von Hölzl et al. wurde unter diesen Bedingungen der Begriff des zervikotonischen Provokationsnystagmus (CPN) geprägt<sup>26</sup>. Es handelt sich dabei folglich nicht um einen unter Reflexbedingungen entstandenen Nystagmus, sondern eine Reaktion und ist so von dem zervikookulären Reflex (COR) abzugrenzen.

Dieses Modell ließ jedoch die mehrdimensionale Beweglichkeit der Halswirbelsäule und die übrigen Nystagmusdimensionen außer Acht. Mit dem nachfolgend angewandten

## Einleitung

dreidimensionalen HDT (3D-HDT) wurde versucht, durch die Untersuchung aller Freiheitsgrade und Nystagmusdimensionen, dieses methodische Defizit auszugleichen. Hierfür wurde der Kopf ausgelenkt und der Rumpf fixiert. Inkonsequent an diesem Aufbau war weiterhin die durch Kopfauslenkung gleichzeitige Verlagerung des Schwerkraftvektors und somit nicht ausschließbare Reizung des Otolithenorgans. Die mögliche Auswirkung auf die Untersuchungsergebnisse war bisher nicht bekannt. Aus diesen Überlegungen heraus wurde der dreidimensionale Rumpfxursionsstuhl entwickelt (3D-RES). Durch die selektive Rumpflenkung sollte experimentell die Umkehr der zuvor dargelegten Sensorhierarchie erreicht und so eine isolierte Beurteilung der zervikalen Propriozeption ermöglicht werden (Abb. 8). In dieser Studie soll das tonische zervikookuläre Untersuchungsmodell durch einen verbesserten Ansatz auf seine klinische Umsetzbarkeit hin überprüft werden.

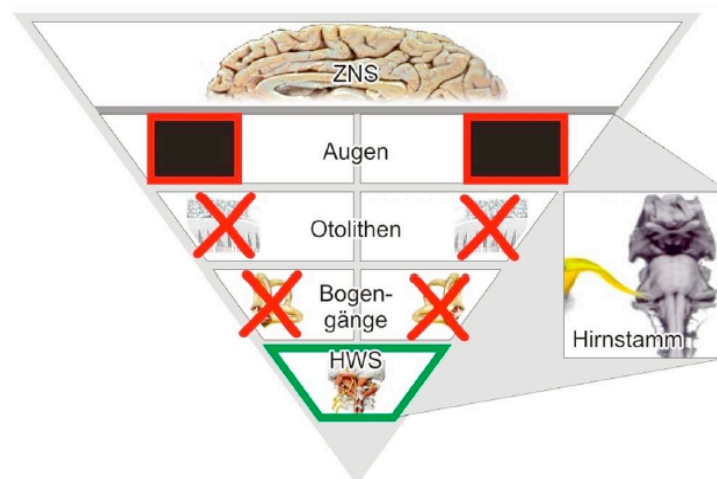


Abbildung 8: Die vestibuläre Untersuchungssituation im 3D-Rumpfxursionsstuhl

*Darstellung der Ausschaltung von vestibulär relevanten Sensorafferenzen aus Auge und Vestibularorgan (intrakranielle Sensoren) durch selektive Reizung der oberen Halswirbelsäule (extrakranieller Sensor). Dieser Aufbau entspricht dem Untersuchungsdesign des 3D-Rumpfxursionsstuhls.*

Es wurde zudem das Augenmerk auf den Vertikalnystagmus (VN) gelenkt, da in Vorstudien der Arbeitsgruppe ein Zusammenhang zwischen dem Upbeat-Nystagmus (UBN) des VN und der zervikalen Provokation festgestellt wurde<sup>84</sup>. In Tiermodelluntersuchungen von Neuhuber et al. konvergieren propriozeptive Fasern über den Nucleus cervicalis centralis ebenfalls in den Nucleus prepositus hypoglossi<sup>15</sup>. Helmchen et al. machen diesen Kern als Entstehungsort für den UBN verantwortlich<sup>109</sup>. Die zervikale Afferenz erfüllt so zumindest theoretisch die Voraussetzung zur Provokation eines Vertikalnystagmus. Eine Störung im Kerngebiet könnte so als

Ausdruck einer Aktivierung auf Hirnstammebene verstanden werden. Diese Möglichkeit der Modulation des Nystagmus und des UBN durch zervikale Provokation soll in dieser Studie nach Deaktivierung der Schwerkraft überprüft werden.

### **1.3.3.2 Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität**

Zunehmend haben sich Forschungsgruppen von der schwierigen Untersuchung der okulären Parameter mittels COR abgewandt und sich die Vorteile der kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität (KKS) zu Nutzen gemacht. Es handelt sich bei der KKS um die Wahrnehmung der Körper- und Gelenkstellung (statische Messung der Relativwinkel durch Typ II Afferenzen) sowie der Körper- und Gelenkbewegung (dynamische Messung der Geschwindigkeit durch Typ Ia Afferenzen). Im Bereich der Halsmuskulatur bedeutet dies propriozeptiv den Winkel von Kopf zu Rumpf zu erkennen und zu verändern <sup>110</sup>. Neuroanatomisch zeigten u.a. Mouton et al. im Jahre 2009, dass die Zellen des oberen zervikalen Rückenmarks eine Relaisfunktion zum Nucleus cervicalis centralis (CCN) besitzen <sup>111</sup>. Hirai et al. demonstrierten bereits 1984 an der Katze, dass sowohl Typ Ia als auch II Afferenzen in den CCN projizieren <sup>112</sup>.

Der Beleg der Dominanz der Muskulatur in der Positionsempfindung ist durch Studien zur Positionsempfindung nach Hüft- und Kniegelenkersatz gegeben <sup>113</sup>. Gauchard et al. schlussfolgerten anhand posturographischer Messungen, dass keine gesteigerte Standinstabilität zu finden war. Trotz des Verlusts des Gelenks als Sensor schien eine propriozeptive Kompensation durch die Muskulatur für die Kontrolle der Balance ausreichend <sup>113</sup>. Laut einer Studie von Teng et al. ist leichter Nackenschmerz als einziges Kriterium nicht ausreichend für eine Verschlechterung der KKS <sup>87</sup>. Pinsault et al. fanden jedoch, dass Patienten mit chronischen atraumatischen Nackenbeschwerden im Vergleich zu Patienten mit bilateral defektem Labyrinth wesentlich schlechter bei der Re-Positionierung des Kopfes abschnitten <sup>69</sup>. In Untersuchungen von Heikkilä et al. konnte bestätigend festgestellt werden, dass bei Patienten mit Nackenschmerzen und Schwindel nach einem Schleudertrauma die Rückföhrbewegung des Kopfes nicht akkurat war <sup>86</sup>.

Um die zervikale KKS in der Kopf-Körper-Koordination zu untersuchen wurden beispielsweise von Revel et al. der „Repositioning-Test“ oder von Weikert et al. der „subjektive Nulldurchgang der Kopfgelenke“ angewandt <sup>88,90</sup>. Geisinger et al. nannten die Untersuchung die „subjektive visuelle Vertikale“ und unterschieden darin effektiv gesunde Probanden von vestibulär defizitären Patienten <sup>66</sup>. Es handelt sich bei allen

## Einleitung

Untersuchungen um eine dynamische Erhebung der Messdaten. Dabei wurde ohne visuelle Orientierung eine Positionierung des Kopfes in seine Ausgangslage überprüft. Die Rückführung des ausgelenkten Kopfes stellt jedoch eine Reizung besonders der Otolithen dar. Durch alleinige Rumpftorsion konnte diese Fehlerquelle, unter anderem von Weikert et al., umgangen, gleichzeitig jedoch nur eingeschränkte Erkenntnisse gewonnen, werden<sup>90</sup>. Hier soll unser modifiziertes Untersuchungsdesign ermöglichen allein die propriozeptive Afferenz zu untersuchen und störende Signale der Otolithen zu vermeiden sowie gleichzeitig alle Raumdimensionen zu erfassen. Als nachteilig bei der dynamischen Erfassung der KKS ist die Subjektivität der Angaben durch den Probanden, wohingegen die Ableitung okulärer Reaktionen ein objektives Messverfahren darstellt.

## 2 Herleitung der Fragestellung

Das Zusammenspiel verschiedener vestibulärer Rezeptorafferenzen gewährleistet im Schwerfeld der Erde ein intaktes Gleichgewichtsempfinden. Inwiefern Schwindelbeschwerden durch Störungen der zervikalen Propriozeption entstehen können wurde in der Literatur mit dem sogenannten eindimensionalen Halsdrehtest (1D-HDT) untersucht. Hierbei wurde lediglich mittels einer Rumpftorsion (eindimensionaler Bewegungsfreiheitsgrad der Halswirbelsäule) untersucht, ob sich horizontale Nystagmen (eindimensionaler Zielparameter) provoziert werden konnten. Aufgrund der variablen Reflexmechanismen bei phasischen Messungen konzentrierte sich unsere Arbeitsgruppen auf ein tonisches Untersuchungskonzept. Um die Spezifität und Sensitivität des Testinstrumentes zu verbessern, wurde ein dreidimensionaler Halsdrehtest (3D-HDT) entwickelt. Erstmals konnten alle sechs Freiheitsgrade der Halswirbelsäule durch Kopfauslenkung (punctum mobile) in stabiler Rumpfposition untersucht werden. Als Zielparameter wurde der zervikotonische Provokationsnystagmus (CPN) definiert. Mithilfe der dreidimensionalen Videookulographie (3D-VOG) konnte der CPN in den drei Nystagmusdimensionen (Horizontal-, Vertikal- und Torsionalnystagmen) aufgezeichnet werden. Allerdings blieb bei der Interpretation der Ergebnisse des 3D-HDT unklar, ob von einer spezifischen Untersuchungssituation der zervikalen Propriozeption ausgegangen werden konnte. Denn durch die Kopfauslenkung gegenüber der Erdanziehung erfolgte möglicherweise eine adäquate Stimulation des peripheren Vestibular-, insbesondere des Otolithenorgans. Diese Verlagerung des Schwerkraftvektors wurde bisher als schwer einschätzbare Größe in Kauf genommen, um einen klinisch anwendbaren zervikookulären Test entwickeln zu können.

Der eigens für die methodische Weiterentwicklung konstruierte dreidimensionale Rumpfkursionsstuhl (3D-RES) soll neue Informationen zu den zervikookulären Reaktionen liefern. Unter Ausschluss von Reflexmechanismen wurde in verschiedenen tonischen Rumpfprovokationshaltungen die zervikale Propriozeption gezielt unter vestibulären Gesichtspunkten evaluiert. Im Rahmen der Pilotstudie wurden zunächst vestibulär gesunde Probanden (n= 100) untersucht. Es galt einen möglichen Einfluss des peripheren Vestibularorgans auf die abgeleiteten Reaktionen zu evaluieren. Dafür überprüften wir inwieweit die Messergebnisse von schwerkraftabhängiger zervikotonischer Provokation in der 3D-HDT-Methode und schwerkraftunabhängiger

## Herleitung der Fragestellung

zervikotonischer Provokation in der neuen 3D-RES-Methode divergierten. Da das Alter einen Einfluss auf die Funktion des Vestibularorgans hat wurden zwei Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup> [Altersmedian= 26; n= 50]; Gruppe<sup>50</sup> [Altersmedian= 50; n= 50]) mitbeurteilt.

Es ergaben sich folgende Fragestellungen:

1. 3D-HDT-Methode: Können bei vestibulär gesunden Probanden, unter der Bedingung zervikotonischer Kopf-Rumpf-Provokationen bei verlagertem Schwerkraftvektor durch Kopfauslenkung (punctum mobile), Nystagmusmodulationen im Vergleich zur Baseline beobachtet werden?
2. 3D-RES-Methode: Können bei vestibulär gesunden Probanden, unter der Bedingung zervikotonischer Kopf-Rumpf-Provokation ohne Verlagerung des Schwerkraftvektors durch Rumpfauslenkung (punctum mobile), Nystagmusmodulationen im Vergleich zur Baseline beobachtet werden?
3. Ergibt sich im Differenzvergleich beider Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) ein Unterschied in der provozierten Nystagmusmodulation?
4. Kann im Vergleich der identischen Kopf-zu-Rumpf-Winkel bei unterschiedlichem Schwerkraftvektor eine Reaktionsdifferenz im Gesamtkollektiv als auch altersgruppenspezifisch festgestellt werden?

Neben der tonischen Messung der Typ II Afferenzen wurde die Halspropriozeption im Sinne der kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität auch dynamisch anhand der Typ Ia Afferenzen analysiert. Im Folgenden wurde mithilfe des dreidimensionalen Rumpfxkursionsstuhls (3D-RES) ein neuer Versuchsaufbau ermöglicht, in welchem durch Änderung der Rumpffposition alle Freiheitsgrade der Halswirbelsäule bei stabiler Kopfposition evaluiert werden konnten. Es wurde der Abweichwinkel von der Nullposition ermittelt. Diese für verschiedene Altersgruppen erhobenen Daten sollen bei weiteren Untersuchungen mit dem 3D-RES als Referenzwerte dienen.

Es ergab sich folgende weitere Fragestellung:

6. Unterscheiden sich die Altersgruppen unter der Bedingung der Rumpfrückbewegung aus der Auslenkungsposition in die Nullposition?



### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 Einführung**

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine prospektive, randomisierte klinische Pilotstudie an 100 gesunden Probanden. Es wurden orientierende Messdaten anhand der bisherigen 3D-HDT-Methode und des neuen Untersuchungsmodells anhand der 3D-RES-Methode gewonnen und verglichen. In der 3D-HDT-Methode war durch die Kopfauslenkung neben der Provokation der Halsmuskulatur eine konsekutive Reizung des peripheren Vestibularorgans möglich. Die zervikale Provokation durch alleinige Rumpfauslenkung in der 3D-RES-Methode sollte die potentielle Störquelle der Schwerkraftvektoränderung vermeiden. Abgeleitete Nystagmusreaktionen wurden auf einen Unterschied der Ausprägung hin untersucht. Für die Beurteilung des Alterseffekts auf die Provokation je Methode wurden zwei Altersgruppen gebildet (Gruppe<sup>26</sup> [Md= 26; n= 50]; Gruppe<sup>50</sup> [Md= 50; n= 50]) und verglichen.

Die Probandenrekrutierung erfolgte nach dem Zufallsprinzip. Es wurden Flyer in Arztpraxen, Ambulanzen und dem Umfeld der Charité ausgelegt. Die Probanden gaben nach dem Aufklärungsgespräch nach den Standards der Helsinki-Deklaration aus dem Jahre 1964 ihre Einwilligung an der Studie teilzunehmen. Der Abbruch der Teilnahme war jederzeit durch den Probanden möglich, sollte dieser Angst, Unwohlsein, Schmerzen oder eine Störung des Arzt-Patientenverhältnisses empfinden. Die Studie wurde von der Ethikkommission der Charité Berlin genehmigt.

#### **3.2 Die posturale Kontrolle**

Das Vermögen unter Schwerkrafteinfluss die aufrechte Körperposition zu erhalten wird als posturale Kontrolle bezeichnet. Das dynamische Gleichgewicht wird mittels Vestibularorgan, dem visuellen System sowie der Propriozeption hergestellt und in ein komplexes regulatorisches Feedbacksystem integriert<sup>114,115</sup>. Aus einem Ungleichgewicht zwischen den verschiedenen sensorischen Eingängen kann eine posturale Instabilität resultieren. Geprüft wird die Funktionstüchtigkeit dieser vestibulären Balancemechanismen unter anderem mit der Posturographie (PUG). Alund et al. fanden anhand Untersuchungen mittels PUG einen Performanceunterschied zwischen Patienten mit zervikalen Funktionsstörungen sowie Schwindel und einer Kontrollgruppe. Sie maßen der PUG somit eine wichtige diagnostische Wertigkeit für

die Feststellung von Schwindel zervikalen Ursprungs bei. Die Arbeitsgruppe Hülse et al. stellte fest, dass sich bei Patienten mit einer zervikogenen Gleichgewichtsstörung die vestibulospinalen Reaktionen, gemessen mit der PUG und der Kraniokorpographie (CCG), nach einer Manualtherapie deutlich besserten <sup>115</sup>.

Verstärkte Schwankungen in der PUG können neben pathologischer Ursachen auch bei Gesunden, zum Beispiel infolge einer inhärenten physiologischen Standunruhe oder nach Alkoholkonsum vorkommen <sup>116</sup>. Auch somatoforme Störungen, wie der phobische posturale Schwankschwindel, können laut Holmberg et al. zu pathologischen Ergebnissen führen <sup>117</sup>. Endo et al. konnten anhand der PUG Patienten nach einem Schleudertrauma eindeutig von Simulationen aufgrund der unterschiedlichen Schwankungsmuster unterscheiden <sup>85</sup>. Eine weitere Studie von Kogler et. al konnte mithilfe der PUG Patienten mit Nackenbeschwerden von Gesunden unterscheiden <sup>114</sup>. Der Arbeitsgruppe fiel auf, dass besonders der weit nach vorne ausgestreckte Kopf eine für das Gleichgewichtsorgan besonders anspruchsvolle Position sei. Darin zeigte sich der Einfluss der veränderten Propriozeption nach Schädel-Hirn-Trauma auf das Gleichgewichtssystem. Auch das Alter zeigt laut Aydog et al. einen Effekt auf die posturale Balance. Die Autoren rieten zu Vestibularistraining um das multisensorische Defizit auszugleichen <sup>118</sup>. Eine intra- und interindividuelle Streubreite muss erfahrungsgemäß bei Messungen der posturalen Kontrolle mit einkalkuliert werden, somit sind von Richtwerten abweichende Ergebnisse ohne andere Pathologien nicht direkt als krankhaft zu werten <sup>115</sup>.

Die posturale Kontrolle wurde in dieser Studie durch den statischen Romberg Stehversuch und den dynamischen Unterberger-Tretversuch getestet. Die Probanden wurden durch diese objektiven Verfahren nach Auffälligkeiten und einen Altersunterschied hin untersucht. Da Störungen der Untersuchung mit geschlossenen Augen durch räumliche Orientierung an Geräuschen oder Licht ausgeschlossen werden sollten, wurde bei den Versuchen der Raum abgedunkelt, eine Augenbinde angebracht sowie Kopfhörer aufgesetzt. Auf Schuhwerk wurde verzichtet, um eine eventuelle Beeinträchtigung der Stehfähigkeit zu vermeiden. Die Untersuchungen wurden einmalig zu Beginn der Studie durchgeführt.

### **3.2.1 Der Romberg-Stehversuch**

Der statische Stehversuch nach Romberg dient der Feststellung von groben Pathologien der Kopf-Körper-Taumeligkeit <sup>119,120</sup>. Die Beurteilung von Stand- und

Haltungsregulation lässt sich auf der modernen computerunterstützten Posturographie-Plattform objektiv durchführen. Erhobene digitale Daten können sofort analysiert, gespeichert und gedruckt werden. Die benutzte Luzerner Messplatte der Firma Happersberger Otopront GmbH zeichnet Gewichtsverlagerungen mit kapazitiven Kraftsensoren unter den Füßen auf. So wird der Schwerpunkt des Körpers und sein Schwingungsverhalten ermittelt. Die Daten werden in der Auswerteinheit errechnet und auf dem TFT-Flachbildschirm angezeigt. Sie ergeben die Informationen für statische und dynamische Balance, Stabilität und Symmetrie. Beim Starten des Systems läuft eine automatische Kalibrierung der Mess-Sensoren ab. Die Posturographie (PUG) gilt als uninvases und vielfältig einsetzbares Instrument<sup>121</sup>. Die Messplatte kann, wie in diesem Fall, zur Diagnostik angewendet werden. Sie kann auch unter anderem Modus, im Rahmen des Biofeedback-Trainings, therapeutisch eingesetzt werden. Unsere Arbeitsgruppe nutzte einen von fünf möglichen Untersuchungsmodi für den statischen Romberg-Standversuch. In jedem Modus sind fünf Einzeltests möglich. Es wurde jeweils ein Test für „Augen geöffnet“ und für „Augen geschlossen“ verwendet. Allerdings kann eine Beziehung zwischen Haltung und Gleichgewicht allein mit der Posturographie-Messplatte nicht ermittelt werden. Es werden spontane Körperschwankungen und somit supportive Reaktionen gemessen. Bei vestibulären Erkrankungen sind typische Schwankungen verstärkt zu beobachten, beispielsweise besteht beim Labyrinthausfall eine Richtungstendenz zur Seite des Ausfalls.

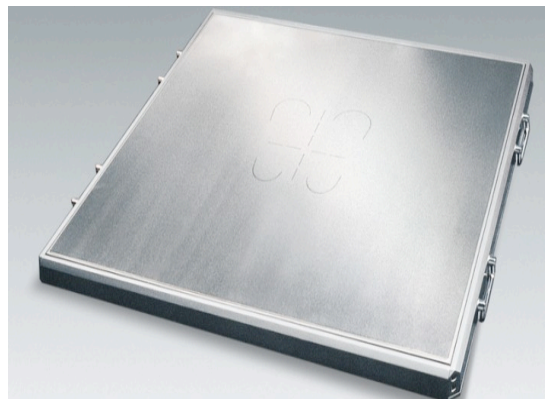
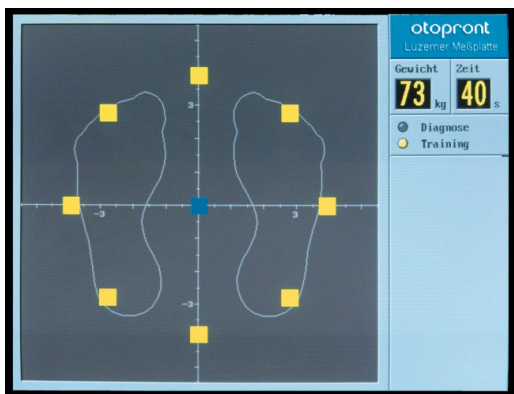


Abbildung 9: Der Bildschirm und die Messplattform der Firma Otopront<sup>122</sup>

Für die Untersuchung stellte sich der Proband auf die Messplattform, beide Füße parallel in ca. 10 cm Abstand auf die zentral auf der Platte aufgezeichneten Markierungen (Abb. 9). Er wurde dazu aufgefordert beide Arme parallel vor den Körper auf 90° anzuheben und in Supinationsstellung zu bringen. In dieser Position wurde die

## Material und Methoden

erste Messung durchgeführt, welche wie alle folgenden Messungen 30 Sekunden dauerte. Danach wurde die Messung bei geschlossenen Augen durchgeführt, so konnte die visuelle Kontrolle des Gleichgewichts ausgeschaltet und die Funktion des vestibulospinalen Systems überprüft werden. Die Untersuchung dauerte insgesamt zwischen ein und zwei Minuten. Während der jeweiligen Messung konnten die Schwankungen in Echtzeit auf dem Bildschirm des Otopront Systems beobachtet werden, da die Markierungspunkte auf dem stilisierten Radarbildschirm farbige Spuren hinterlassen (Abb. 9). Die elektrischen Signale wurden über den Rechner in graphische Bilder umgesetzt. Der nach der Untersuchung zusammengestellte Ausdruck enthielt alle Weg-Zeit-Diagramme, laterale, anteriore und posteriore Komponenten, die graphische sowie numerische Wiedergabe der Drehwinkel sowie die Frequenzanalyse. So konnten direkt Abweichreaktionen, wie Schwankung und Falltendenz, in jede Richtung festgehalten werden. Eine Fallneigung bei geöffneten Augen spricht für eine Läsion im Kleinhirnbereich. Bei geschlossenen Augen ist an eine spinale oder vestibuläre Ursache zu denken<sup>28</sup>. Eine zentrale Gleichgewichtsstörung wird zumeist von einer regellosen Fallneigung begleitet, periphervestibuläre Störungen von einer gerichteten Fallneigung zur betroffenen Seite.

Auf dem Ausdruck wurde jeweils eine Seite pro Einzelttest verwendet. Man fand darauf ein Richtungshistogramm, den Schwerpunkt/Mittelpunkt, die lateralen (x-Richtung) sowie anterioren/posterioren (y-Richtung) Schwankungen wieder. Die Schwankung in Echtzeit war auf dem Bogen für die 30 Sekunden der Messung graphisch dargestellt. Die Schwankungsmuster waren in cm bzw. cm<sup>2</sup> angegeben. Eine zusätzliche gestrichelte Darstellung zeigte den Mittelpunkt der Bewegung. Bei einem symmetrischen Schwankungsmuster sollten beide Koordinatensysteme optisch übereinanderliegen. Die Weg/Zeitdiagramme beschreiben den zeitlichen Verlauf der x- und y-Anteile der Körperschwankung. Die nun beschriebenen Variablen wurden statistisch ausgewertet. Der Parameter *Delta X* (cm) gibt die maximale laterale Schwankungsdifferenz an, die Schwankung in  $\pm$  x-Richtung. *Delta Y* (cm), gibt die maximale anteriore/posteriore Schwankungsdifferenz an, die Schwankung in  $\pm$  y-Richtung. *DX\*DY* (cm<sup>2</sup>) ist das Produkt der Parameter Delta X und Y. *Lateral* (cm) gibt die Summe der absoluten x-Anteile der einzelnen Bewegungsvektoren an. *Sway Area* (cm<sup>2</sup>) berechnet die Sway Area nach der Diener/Dichgans/Bacher-Gleichung ( $SA = \frac{1}{2} \sum |x_{i+1} y_i - y_{i+1} x_i|$ ). Die Werte der einzelnen Parameter bei geschlossenen und

geöffneten Augen sind im Kapitel Ergebnisse beschrieben und wurden für den Altersgruppenvergleich genutzt.

### **3.2.2 Der Unterberger-Tretversuch**

Für die sensible Prüfung der vestibulospinalen Bahnen diente der, von Siegfried Unterberger (1893-1987) entwickelte, dynamische Unterberger-Tretversuch <sup>123</sup>.

Im Fall einer starken Deviation wäre ein Übertreten der Messplattenränder möglich gewesen. Daher stand der Proband ohne Schuhwerk auf dem Fußboden. Hier wurde der Proband bei geschlossenen Augen und ebenfalls in 90° nach vorne ausgestreckter Armhaltung mit supinierten Händen dazu aufgefordert, die Beine gleichmäßig und abwechselnd auf Kniehöhe anzuwinkeln. Der Proband sollte dabei schwankungsfrei auf der Stelle treten. Die Arbeitsgruppe wertete den Körpereigenspin, also die Drehung um die Körperachse, in Winkelgrad aus. Orientiert an Claussen et al. sollte der Proband auf eine Schrittzahl von 80-100 während einer einminütigen Messung kommen <sup>124</sup>. Bei geschlossenen Augen ist die Orientierung nach ca. 40 Schritten von den Informationen des vestibulären Systems abhängig <sup>123</sup>. Eine Seitwärtsdrehung bis 45° und ein Geradeauslaufen wird als physiologische Variation aufgefasst. Abweichungen über diesen Referenzwert hinaus werden bei Fehlen anderer pathologischer objektiver und subjektiver Ergebnisse in der Literatur als interindividuelle Streubreite betrachtet <sup>115</sup>. Ansonsten galt in unserer Studie eine Drehung über diesen Wert hinaus oder eine Fallneigung als pathologische Störung des vestibulären Systems und somit als Ausschlusskriterium. Bei einer vestibulären Läsion würde der Patient bei den Untersuchungen zur pathologischen Seite abweichen, zum Beispiel bei der Grippe Otitis würde er mit schmalen Schwankungen reagieren. Bei einer zentralen Störung hingegen sind mit verbreiterten Lateralschwankungen oder einer ungerichteten Fallneigung zu rechnen. Statistisch gesehen sind zentrale Gleichgewichtsstörungen besonders häufig <sup>120</sup>.

## **3.3 Die dreidimensionale Videookulographie**

### **3.3.1 Funktionsweise und Anwendungsmöglichkeiten**

Zur Erfassung von vestibulären Auffälligkeiten wurde bereits in früheren Studien die Aufmerksamkeit auf die Augenbewegungen gelenkt. Die Frenzelbrille, erfunden von und benannt nach Hermann Frenzel (1895-1967), wird allgemein als

Untersuchungsinstrument zur Vestibularisprüfung verwendet<sup>98</sup>. Die Dioptrienzahl von 15 dpt und die Beleuchtung der Brille verhindern die visuelle Fixation durch die Untersuchungsperson, zudem werden die Augen stark vergrößert, was die Beurteilung von Bewegungen erleichtert. Eine Weiterentwicklung dieser Technik stellt die Elektronystagmographie (ENG) dar. Mit ihr können die ausgelösten Nystagmusreaktionen elektrisch aufgezeichnet werden<sup>99,125</sup>. Mit der Entwicklung der digitalen Datenverarbeitung entstand die Möglichkeit der Videookulographie (VOG). Die VOG stellt das bisher feinste, nicht-invasive Messverfahren dar. Sie erlaubt die Registrierung von Augenbewegungen in drei Dimensionen: Vertikal, horizontal und torsional. Da der zervikal provozierte Nystagmus sehr variabel und äußerst fein sein kann, ist er mit bloßem Auge und selbst mit der ENG kaum erkennbar. Das VOG-System hingegen ermöglicht dies. Wir bedienten uns der 3D-VOG der Firma SensoMotoric Instruments (SMI). Das System besteht aus einer Video-Brille mit Sensoren welche mit dem Rechner über das zugehörige Softwareprogramm verbunden ist (Abb. 12). Die Sensoren der Brille arbeiteten mit einer Abtastrate von 50 Hz, damit lassen sich die langsamen sowie schnellen Augenbewegungen darstellen und machen so die Nystagmuserkennung möglich.

Die tauchermaskenartige Brille wurde mit einem Klettverschluss um den Kopf befestigt, sodass die für die Untersuchung nötige Dunkelheit gewährleistet war. Sie verhinderte das Fixieren der Augen durch einen visuellen Reiz und somit die eventuelle Unterdrückung eines vestibulären Spontannystagmus.

In der Brillenfassung des 3D-VOG Systems war je Auge eine Infrarot-Leuchtdiode installiert sowie je ein halbdurchlässiger Spiegel. Die Infrarot-Bilder des Auges wurden über die Spiegel und eine Linse auf eine seitlich an der Brille befestigte infrarotlichtempfindliche CCD-Kamera abgebildet und analog durch den Videokanaleingang zu einer elektronischen Schaltung, dem „Framegrabber“, geleitet. Dieser digitalisierte die Bilder. Beide Augen konnten durch den Zweikanalaufbau separat bewertet werden. Nach der Digitalisierung mit dem Framegrabber gelangten die Daten an den Prozessor des Rechners (CPU), welcher eine Pupillenerkennung durchführte. Als Schwellenwert zur Pupillenerkennung war im System eine bestimmte Graustufe festgelegt. Ebenso erfasste er die Translationswerte (horizontal und vertikal). Der dunkelste Punkt des Bildes in horizontaler und vertikaler Ebene definierte den Schwellenwert für den Pupillenmittelpunkt, da er der Ort der geringsten Lichtreflexion war. Die Bewegung des Pupillenmittelpunktes repräsentierte folglich die entsprechende

Augenbewegung. Darüber hinaus lassen sich auch Torsionsbewegungen mit der Datenverarbeitung auswerten. Dafür wurde das markante Muster der Iris als Voraussetzung definiert. Dieses Muster wurde an verschiedenen Helligkeitspunkten entlang der Iris gespeichert (Irisspeicher) und so Augenbewegungen mittels Kreuzkorrelation erkannt, bearbeitet und auf dem Bildschirm dargestellt. Pro Einzelbild wurden ca. 20 Bilder aus dem Iriskreis definiert. Die räumliche Auflösung für Augenbewegungen beträgt in der horizontalen und vertikalen  $0,05^\circ$  und in der torsionalen Richtung  $0,1^\circ$ .

Die initiale Eichung ermöglichte eine Artefaktminimierung (Abb. 11), dazu wurde der untere Irisbogen gescannt (Abb. 10). Die Augen sollten dafür möglichst weit offen gehalten werden. Wegen der kurzen Latenzzeit der Augenkoordinatenermittlung (2,5 ms) wurden die Bewegungen in Echtzeit (Virtual Reality) wiedergegeben. Somit konnte der Untersucher die Augenbewegungen während der Messung beurteilen.

Das Software-Fenster präsentierte, wie in Abbildung 13 nachzuvollziehen, an der linken oberen Seite die beiden mit Infrarotkamera aufgenommenen Augen sowie den Winkel zur Schwerkraft. Auf der rechten Bildseite waren die Bewegungen in den drei Nystagmusdimensionen horizontal, vertikal und torsional zu verfolgen. Beide Augen waren in der jeweiligen Dimension als blaue bzw. rote Linie voneinander zu unterscheiden. Der Körperbewegungssensor der VOG-Brille zeichnete fortlaufend den Schwerkraftvektor auf. Der Sensor saß auf der Brillenmitte und registrierte Torsionsbewegungen in einer räumlichen Auflösung von ca.  $1^\circ/\text{s}$  sowie Translationsbewegungen von ca.  $0,05 \text{ m/s}^2$ . Der Messbereich lag bei der Torsion bei  $\pm 90^\circ/\text{s}$  und für die Translation  $\pm 20 \text{ m/s}^2$ .

### **3.3.2 Vor- und Nachteile**

Mit der VOG war es möglich dreidimensionale Augenbewegungen (horizontal, vertikal, torsional) objektiv aufzuzeichnen sowie digital zu dokumentieren. Aufgrund der Maske war kompletter Lichtschutz und somit keine Möglichkeit der optischen Fixierung gewährleistet. Messartefakte bei der Iriserfassung entstanden häufig aufgrund von hängenden Lidern, Wimpern, Schminke oder leichten Verschmutzungen auf dem Brillenglas. Durch den Irisscan, Adjustieren der Brille und Entfernen der Störquellen waren diese Fehlermeldungen meist behebbbar.

Die Messung mit der VOG ist wesentlich sensitiver als mittels ENG, so können die sehr schwachen variablen zervikalen Nystagmusreaktionen besser registriert werden <sup>126,127</sup>.

## Material und Methoden

Während der VOG-Messung in diesem Untersuchungssetting stellte sich die Erfassung der torsionalen Nystagmusdimension stark artefaktüberlagert dar. Die bisher und auch in Vorstudien gewonnenen Daten waren zu gering und konnten keiner Auswertung zugeführt werden<sup>26</sup>.

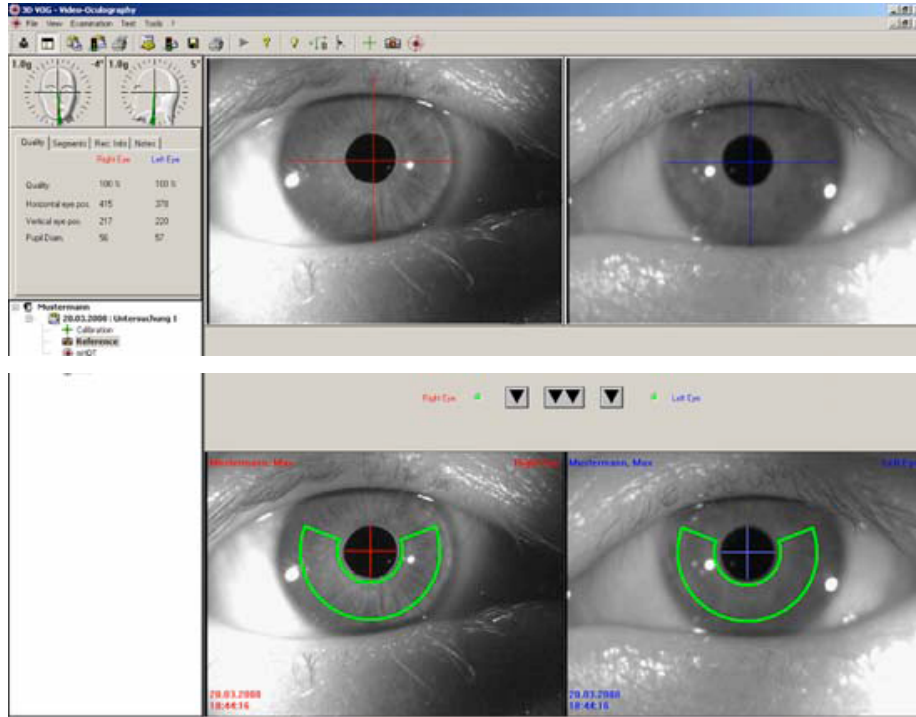


Abbildung 10: Durchführung des Irisscans

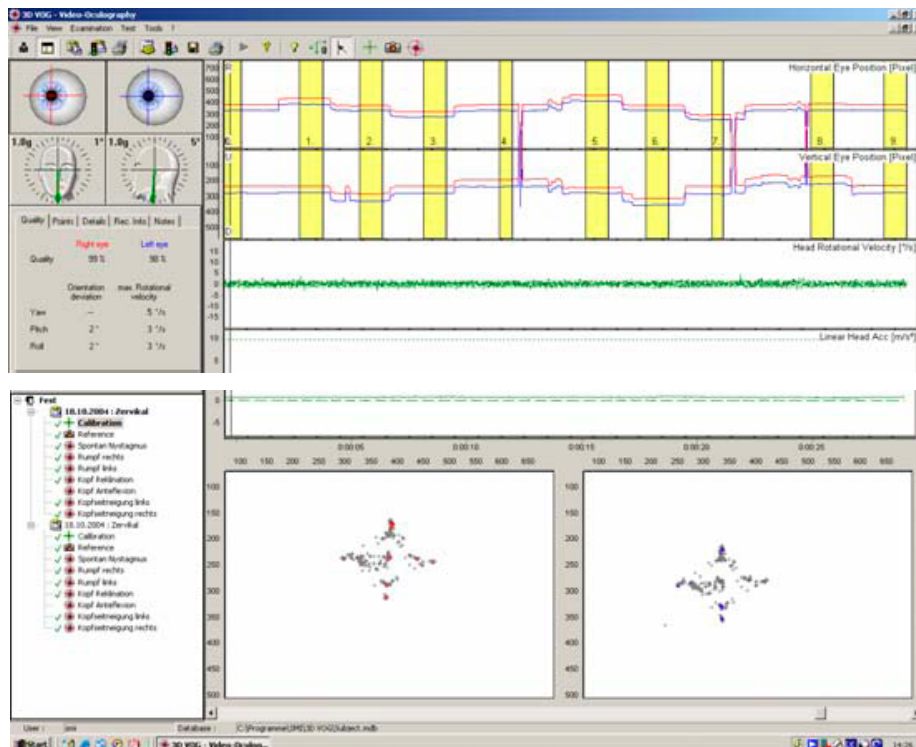


Abbildung 11: Die Eichwinkel (gelbe Balken) der neun Punkte auf dem Eichkreuz



## Material und Methoden

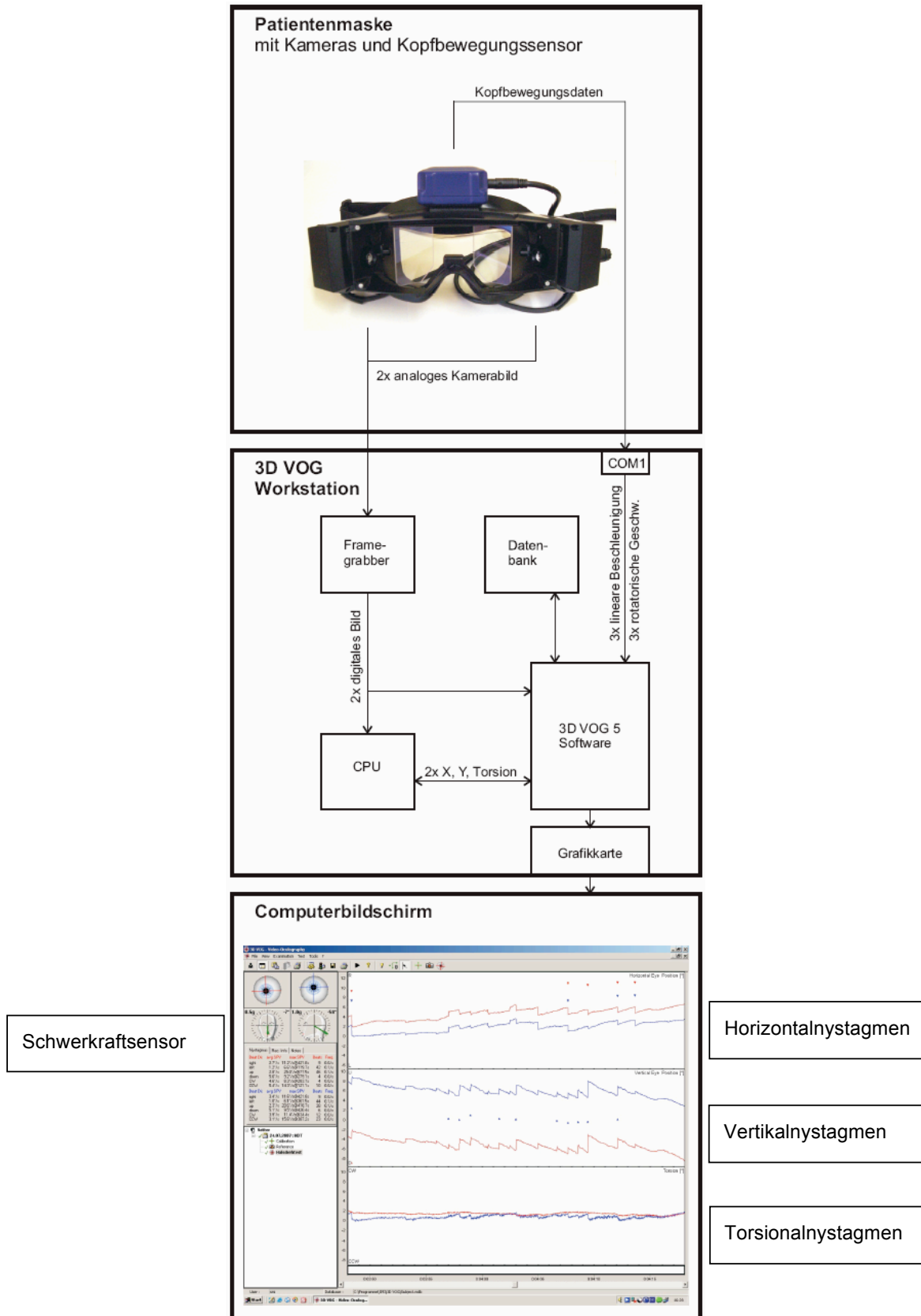


Abbildung 12: Die dreidimensionale Videookulographie (3D-VOG)

## **3.4 Schwerkraftabhängige zervikotonische Provokation**

### **3.4.1 Der dreidimensionale Halsdrehtest**

Der bereits in Studien angewandte dreidimensionale Halsdrehtest (3D-HDT) untersucht zervikovegetibuläre Reaktionen durch Kopfauslenkung gegenüber der Schwerkraft bei fixiertem Rumpf in allen sechs Halsfreiheitsgraden<sup>58,84,108</sup>. Mit ihm wurde eine Provokation des kraniozervikalen Übergangs bisher durch Torsion des Rumpfes, sowie Seitkipfung und Flexion des Kopfes im Raum erreicht. In der 3D-HDT-Methode dieser Studie wurde nur die Kopfflexion und Kopfkippung durchgeführt (Abb. 13). Die Rumpftorsion wurde einmalig mit der 3D-RES-Methode durchgeführt. Da diese Auslenkung in beiden Methoden technisch identisch war, wäre eine zweimalige Erhebung redundant gewesen. In unserer Studie wurde der Kopf des Probanden in der 3D-HDT-Methode passiv an die Grenze von 40° ausgelenkt und so der Tonus der suboccipitalen Muskulatur geändert. Der Schwerkraftsensor der VOG-Brille kontrollierte dabei den Winkel der Auslenkung. Phasische Nystagmusreaktionen während der Kopfbewegung und 30 Sekunden nach Erreichen der Position wurden nicht in die Wertung einbezogen. Der in der tonischen Haltephase über 60 Sekunden provozierte Zielparameter, der zervikotonische Provokationsnystagmus (CPN) wurde in den drei Nystagmusdimensionen registriert und ist in Abhängigkeit der Änderung des Schwerkraftvektors auf das periphere Vestibularorgan zu interpretieren.

Für die Untersuchung der Kopfauslenkung mit dem 3D-HDT benötigte man ausschließlich einen Stuhl, auf welchem der Proband Platz nahm sowie das 3D-VOG System zur Aufzeichnung der Augenbewegungen.

### **3.4.2 Vor- und Nachteile**

Die Durchführung des Halsdrehtests war einfach und wenig aufwendig in der Durchführung. Technisch bedurfte es allein der VOG-Brille. Der Test könnte so in vielen Einrichtungen durchgeführt werden. Die Dauer der Untersuchung war bei durchschnittlich 15 Minuten für die Probanden ebenfalls tragbar.

Durch Reizung des kraniozervikalen Übergangs bei Kopfauslenkung ist es als wahrscheinlich anzusehen, dass es zu einer Reizung des im Schädel liegenden Vestibularorgans kommt (Abb. 13). Besonders die Otolithen, welche eine Vektoränderung zur Erdbeschleunigung als kontinuierliche Information einer Kopfbeschleunigung melden, werden dabei angesprochen. Abgeleitete Nystagmen

könnten so eine Mischung von Reizeinströmen zum Vestibulariskernkomplex (VKK) darstellen.

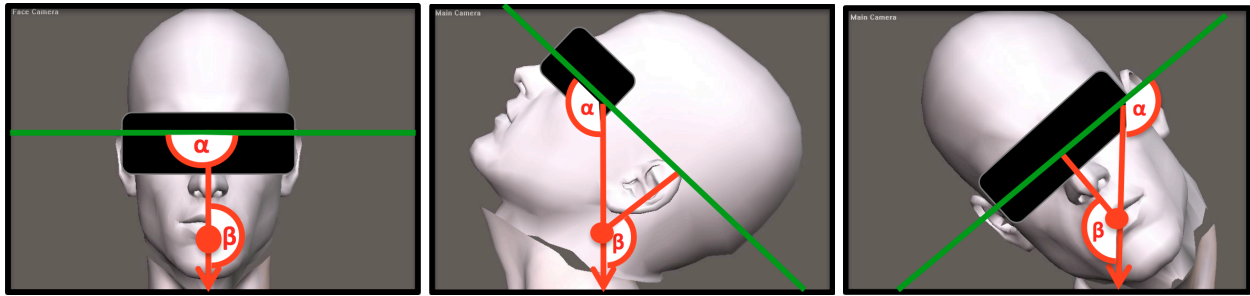


Abbildung 13: Darstellung der Kopfpositionen in der 3D-HDT-Methode <sup>128</sup>

*Darstellung der Neutralposition und exemplarisch der Retroflexion, sowie Rechtskipung. Der Winkel zwischen Otolithen und Schwerkraft ( $\alpha$ ) sowie der kraniozervikale Winkel ( $\beta$ ) werden durch die Kopfbewegung von ca. 40 Grad verändert; Legende: Rot= Schwerkraftvektor; grün= Otolithenposition; schwarzer Balken= Die Maske des dreidimensionalen Videookulographie-Systems*

### 3.5 Schwerkraftunabhängige zervikotonische Provokation

#### 3.5.1 Der dreidimensionale Rumpflexionsstuhl

Der speziell für die vorliegende Studie entwickelte dreidimensionale Rumpflexionsstuhl (3D-RES) wurde in der mechanischen Fachwerkstatt der Charité, Campus Benjamin Franklin, erbaut. Dort wurde ebenfalls eine protokollierte mechanische Belastungsprüfung durchgeführt. Der Stuhl wurde unter verschiedener Gewichtsbelastung in die Endpositionen gekurbelt, welche  $40^\circ$  in Kipp- sowie Flexionsposition und  $90^\circ$  in Torsionsposition darstellten. Bis zu dem Gewicht von 150 kg war keine Materialinsuffizienz zu verzeichnen. Um einen Sicherheitsabstand zu gewährleisten, wurden Probanden bis zu einem Gewicht von 100 kg zugelassen.

Im Unterschied zu dem bisher angewandten 3D-Halsdrehtest, wurde hier nicht der Kopf ausgelenkt. Die Auslenkung des kraniozervikalen Übergangs in die jeweilige Position erfolgte ausschließlich durch Bewegung des Rumpfes. Der Kopf wurde in Neutral-Null-Stellung fixiert. Somit wurde ein von der Schwerkraft unabhängiges Setting erreicht. Für die Messung galten ansonsten dieselben Kriterien wie in der 3D-HDT-Methode. Erst 30 Sekunden nach Erreichen der jeweiligen Position wurde mit der einminütigen Aufzeichnung der Augenbewegung mittels VOG begonnen. Ein abgeleiteter zervikotonischer Provokationsnystagmus (CPN) in dieser tonischen Haltephase wurde manuell bewertet und notiert.

## Material und Methoden

Der 3D-RES untersuchte die zervikookulären Bahnen, soweit bekannt, erstmalig in allen sechs Freiheitsgraden der Kopf-Halsgelenke systematisch bei statischer Kopfposition (Positionen siehe Abb. 15). Es wurden erstmals Daten von vestibulär gesunden Probanden verschiedenen Alters aufgezeichnet und so Messwerte unterschiedlicher Gruppen evaluierbar gemacht. Dies ist eine Grundvoraussetzung für den klinischen Einsatz und Folgestudien. Außerdem wurde mithilfe dieser Methode die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität ebenfalls erstmalig bei stationärer Kopfposition geprüft. Wie bereits erläutert hängt die zentrale Registrierung der Lageveränderung des Körpers von der Zusammenarbeit mit den kinästhetischen Analysatoren ab. Wir konzentrierten uns hierbei auf die dynamische Messung der „subjektiven Nullposition der Kopfgelenke“. Die Aufhebung der visuellen Orientierung wurde mittels der VOG-Brille gewährleistet. Nach der VOG Messung in der jeweiligen gehaltenen Provokationsposition wurde der Proband mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 °/s in Ausgangsposition zurückgeführt. Mit dem Signal „Stop“ sollte er bekanntgeben, wann der subjektive Eindruck bestand, dass der unter dem Kopf durchrotierte Rumpf die Nullposition zum Kopf wieder eingenommen hatte. Die Abweichung von der tatsächlichen Ausgangsposition wurde von der angebrachten Winkelgradskala abgelesen und notiert. Es wurde eine durchschnittliche Abweichung der Probanden (n= 100) für jede Position ermittelt. Ebenfalls wurden die beiden Altersgruppen miteinander verglichen. Die Werte sollen zukünftig als Referenzwerte für weitere Untersuchungen von Patienten mit dem 3D-Rumpfxursionsstuhl dienen.

Die Untersuchungseinheit setzte sich aus verschiedenen Einzelteilen zusammen. Zuerst sei das metallene Grundgerüst des Konstrukts zu nennen. An ihm waren der Stuhl mit „Not-Aus-Knopf“, der Magnet, die „Halfpipe“-Schiene, die Schneckenwinde und die verschiedenen Messskalen fixiert (Abb. 14).

Der mit mehreren Stellschrauben in Höhe und Torsionsposition einstellbare Stuhl wurde von der Firma Recaro gesponsert. Es handelte sich dabei um einen Sportwagensitz, welcher eine belastungstaugliche glasfaserverstärkte Kunststoffschale außen und körperanliegende Stoffauspolsterung innen aufwies. Der Stuhl war nach dem Pendelprinzip in das metallische Rahmengerüst integriert. Mittels Stellschrauben war er drehbar und so in die verschiedenen Untersuchungspositionen zu bringen.



Abbildung 14: Der dreidimensionale Rumpfxkursionsstuhl

*Dargestellt sind der Sportwagensitz mit Vierpunktgurt der Firma Recaro; Der magnetisch am Rahmengerüst fixierte Helm und der „Not-Aus-Knopf“; Die Sollbruchstelle, die magnetische Verbindung zwischen Helm und Stuhlgerüst, wird bei Betätigung des Knopfes gelöst*

Die Stellung, in welcher der Stuhlrücken zur „Halfpipe-Skala“ zeigte, diente der Seitneige nach rechts und links sowie der Torsion um die eigene Achse. Die Stellung, in welcher die rechte Stuhlseite zur „Halfpipe-Skala“ zeigte, diente der Ante- und Retroflexion. Die Positionen sind in Abbildung 15 dargestellt. Zuerst wurde der Stuhl mit einer Fußpumpe nach oben manövriert, bis der Kopf die optimale Winkelposition zum Magneten hatte. Dies wurde mit einem Laserstrahl kontrolliert, welcher bei richtiger Position auf der Höhe der Drehachse des Kopfes erschien.

Für die Rumpftorsion wurde die Stellschraube, welche die vertikale Fixierung des Stuhles bewirkt, gelöst. So war der Stuhl in der Rotationsebene frei beweglich. Für die Positionierung wurde der Magnet mittels Kippschalter gelöst, die seitlichen Stellschrauben rechts und links an den Stuhlseitschienen sowie die mittlere Stellschraube gelöst und der Stuhl um 90° gedreht. Mit den seitlichen Stellschrauben erfolgte die Positionierung am Drehpunkt des Pendels. Es war stets darauf zu achten, dass nach dem Erreichen der korrekten Stuhlposition alle Stellschrauben festgezogen waren, bevor der Stuhl in die Flexion oder Kippung gebracht wurde.

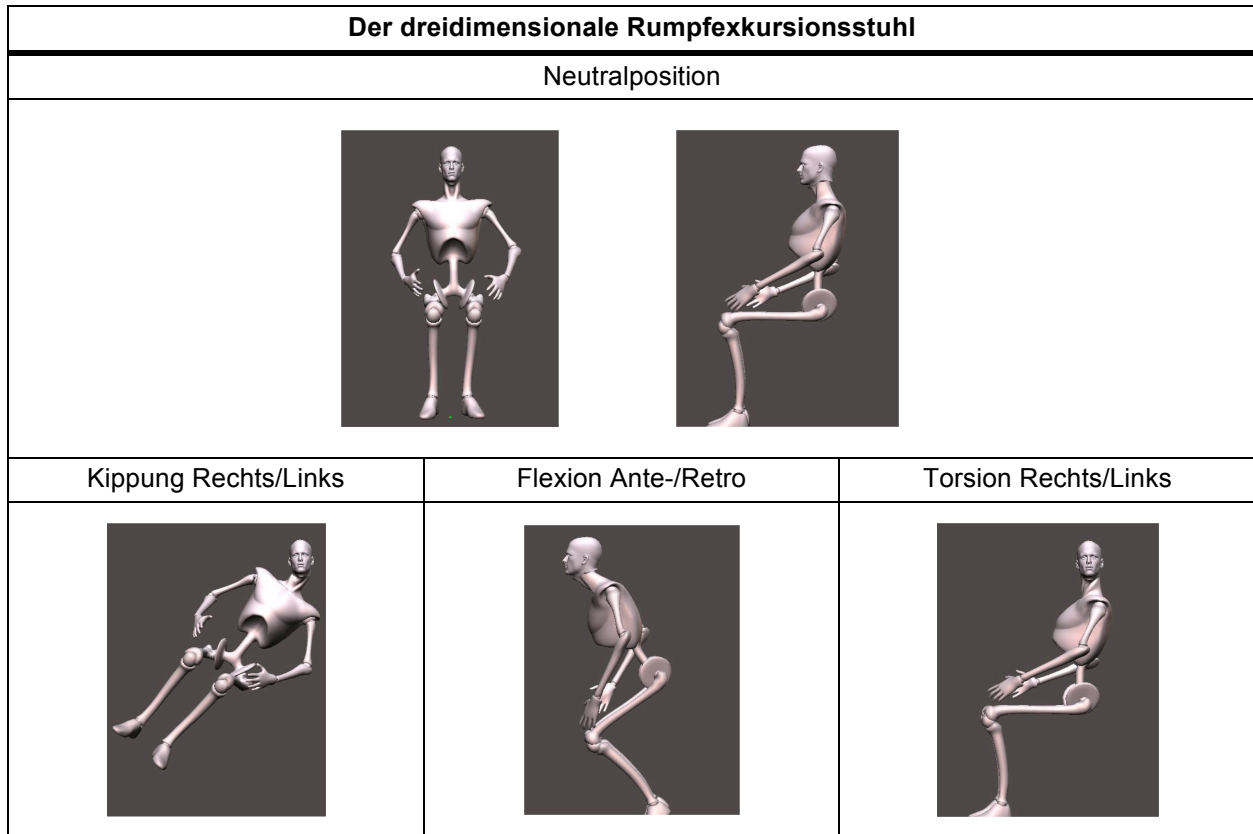


Abbildung 15: Darstellung der einzelnen Rumpfpositionen mit dem 3D-RES <sup>128</sup>

*Darstellung der Neutralposition und exemplarisch der Rumpfretroflexion, -rechtskipfung, -torsion links*

In den Hartschalensitz war ein Vierpunktgurt integriert (Abb. 14). Dieser verhinderte die Positionsänderung des Probanden im Stuhl während der Auslenkung. Die vier Gurte konnten mittels Steckzungen und Druckknopf vom Probanden selbst zentral bedient werden. Des Weiteren war an der linken Stuhlseite der sogenannte „Not-Aus-Knopf“ befestigt (Abb. 14). Er stellte die Sollbruchstelle zwischen Proband und Untersuchungseinheit dar. Durch Drücken des Knopfes konnte sich der Proband jederzeit und mit sofortiger Wirkung von der Magnet-Verbindung zum Stuhl lösen und somit den Untersuchungsgang abbrechen.

An dem Gerüst befanden sich außerdem die Messskalen, der Schneckenantrieb und der Gegen-Magnet. Es gab zwei Messskalen, welche die Auslenkung des Stuhles in Winkelgrad anzeigen. Für die Rumpfkippung und -flexion zeigte die hinter dem Stuhl angebrachte Skala Werte von  $\pm 40^\circ$ . Für die Torsion zeigte die sich am Fuß des Stuhls befindliche Skala Winkel von  $\pm 90^\circ$  an. Der direkte, rückschlagfreie Schneckenantrieb sorgte für eine sichere Bedienung der Last. Der manuelle Antrieb der Schneckenwinde erfolgte durch die abnehmbare Schneckenkurbel. Durch das Einrasten des Schneckenrads fixierte es sich selbst und schloss ein „Zurückschnellen“ des Sitzes aus.

Die Auslenkung und Rücklenkung war nur durch aktives Kurbeln nach rechts oder links möglich, da es sich um ein selbsthemmendes System zum Verstellen und Fixieren handelte.

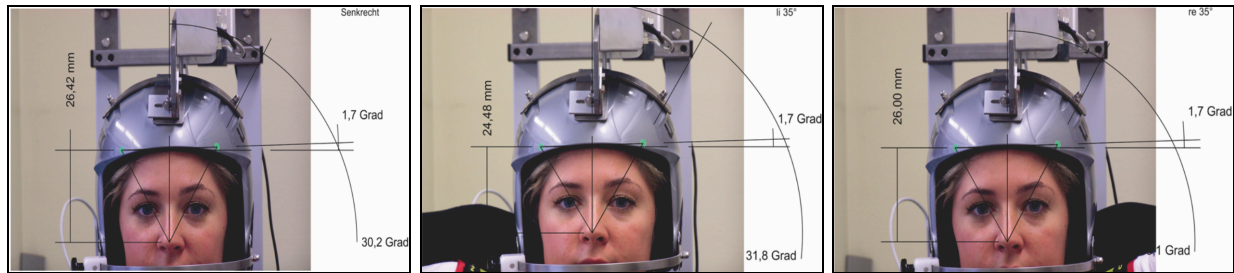
Der Gegen-Magnet war verschieblich an einer horizontal positionierten Stange oberhalb des Sitzes angebracht. So konnte man seine Stellung optimal in Bezug zum Kopf des Probanden ausrichten. Er wurde von einem Netzgerät mit der medizinischen Zulassung vom Typ BF versorgt. Der Zugmagnet hatte eine Haltekraft von 20 kp. Diese Last entspricht dem Gewicht, welches die Halsmuskulatur eines Menschen trägt. Bei einer Störung des Untersuchungsablaufes kommen, hätte die menschliche Kraft dem Magneten ausreichend entgegenwirken können. Zusätzlich wurde ein „Not-Aus-Knopf“ installiert, durch dessen Betätigung der Stromfluss aktiv vom Probanden beendet und somit die Fixierung des Helms am Magneten des Gerüsts gelöst werden konnte.

Zuletzt ist der Uvex-Skihelm mit Kinnriemen aufzuführen, welcher an seinem Scheitelpunkt ebenfalls einen Magneten installiert hatte (Abb. 14). Für die individuell beste Passform konnte in dieser Studie zwischen vier verschiedenen Größen gewählt werden. Hatte der Proband Platz genommen wurde er in die korrekte Position zum Magneten gebracht. Dabei sollten die Magnetflächen des Helms und des Gerüsts zum Aufliegen gekommen sein. Wenn der Magnet durch Betätigung des Kippschalters in Betrieb genommen wurde war die Fixierung aktiviert. Im letzten vorbereitenden Schritt wurde die bereits beschriebene VOG-Brille befestigt und eingestellt.

### **3.5.2 Die Bestimmung der Winkelabweichung im Helm**

Der 3D-Rumpfxkursionsstuhl sollte sich durch eine stabile, standardisierte Untersuchungssituation auszeichnen, in welcher eine selektive Reizung der zervikalen Rezeptoren gewährleistet wurde. Um zu verifizieren, dass der Kopf während der Auslenkung des Rumpfes im Helm stabil in der Nullposition blieb, und somit das Untersuchungsdesign als valide gelten kann, wurde nach dem Zufallsprinzip bei 11 Probanden exemplarisch die Winkelabweichung in den verschiedenen Haltungen (Ausgangsposition und Provokationspositionen) im 3D-RES fotografisch festgehalten (Abb. 16). Dafür wurden vor der Untersuchung selbstklebende Punkte auf Nase, Wange, Stirn und Kinn angebracht. Die Abweichungen wurden im arithmetischen Mittel in Tabelle 5 präsentiert. Es konnte mittels durchgeführtem t-Test keine signifikante Positionsveränderung des Kopfes im Helm durch die Auslenkung festgestellt werden.

## Material und Methoden



Kopfposition im Helm bei  
Nullposition (Abb. 16.1)

Kopfposition im Helm bei  
Rumpfkippung rechts (Abb. 16.2)

Kopfposition im Helm bei  
Rumpfkippung links (Abb. 16.3)

Abbildung 16: Beispielhafte Darstellung der Winkelabweichung des Kopfes im Helm

Beispielhafte Berechnung der Winkelabweichung des Kopfes zwischen Nullposition (Abb. 16.1) und 35° Rumpfkippung rechts (Abb. 16.2) sowie 35° Rumpfkippung links (Abb. 16.3). Bei Rumpfkippung links beträgt der Winkel 30,1° und weicht somit um 0,1° zum eingestellten Winkel 30,2° ab. Bei der Rumpfkippung rechts beträgt der Winkel 31,8° und weicht somit um 1,6° von 30,2° ab.

Tabelle 5: Winkelabweichung des Kopfes im Helm bei Auslenkung im 3D-RES

Darstellung der erhobenen Gradzahlen im Helm in Nullposition (Ausgangswert) und bei ausgelenktem Rumpf (Endwert) bei 11 zufällig ausgewählten Probanden; Die gebildeten Differenzen werden als Mittelwerte dargestellt, Ausreißer sind mit einbezogen; Legende: P= Proband; 0= Nicht auswertbar; M= Mittelwert

Rumpfkippung nach links												
	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8	P.9	P.10	P.11	M
<b>Ausgangswert</b>	30,2	26,7	32,3	28,3	32,1	28,7	35,6	30,6	27,7	30,4	26,1	
<b>Endwert</b>	30,1	29	27,8	26,7	33,5	29,3	35,6	33,4	28,5	28,9	24,1	
<b>Differenz</b>	0,1	-2,3	4,5	1,6	-1,4	-0,6	0	-2,8	-0,8	1,5	2	0,16
Rumpfkippung nach rechts												
	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8	P.9	P.10	P.11	M
<b>Ausgangswert</b>	30,2	26,7	32,3	28,3	32,1	28,7	25,6	30,6	27,7	30,4	26,1	
<b>Endwert</b>	31,8	26,6	29,5	27,5	31,6	27,5	35,6	30,7	27,9	29,9	26,4	
<b>Differenz</b>	-1,6	0,1	2,8	0,8	0,5	1,2	0	-0,1	-0,2	0,5	-0,3	0,34
Rumpfretroflexion												
	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8	P.9	P.10	P.11	M
<b>Ausgangswert</b>	29	14,2	46,5	23,6	46,4	2,1	11,5	0	16,3	17,1	3,3	
<b>Endwert</b>	29,4	13,2	46,2	26,9	47,6	0,9	12,1	0	13,2	18,2	5,4	
<b>Differenz</b>	-0,1	1	0,3	-3,3	-1,2	1,2	-0,6	0	3,1	-1,1	-2,1	-0,28
Rumpfanteflexion												
	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8	P.9	P.10	P.11	M
<b>Ausgangswert</b>	29	0	46,5	23,6	46,4	2,1	11,5	0	16,3	17,1	3,3	
<b>Endwert</b>	31,8	0	47	23,1	45,2	3	12,1	0	21,1	14,9	3,2	
<b>Differenz</b>	-2,8	0	-0,5	0,5	1,2	-0,9	-0,6	0	-4,8	2,2	0,1	-0,66

### 3.5.3 Vor- und Nachteile

Die Auslenkung des Rumpfes in die Provokationsposition sollte eine selektive Reizung der suboccipitalen Muskulatur bezwecken. Eine Reizung der Otolithen wurde durch die magnetische Kopffixierung des Untersuchungshelmes an der Untersuchungseinheit



ausgeschlossen (Abb. 17). Diese Vorgabe war essentiell, da sie gewährleisten sollte, dass die provozierten Nystagmen ihren Ursprung ausschließlich in der Halsmuskelprovokation fanden. Reliable und standardisierte Ergebnisse sollten die Hypothese der Ätiologie zervikaler Missemfindungen durch zervikale Afferenzen überprüfbar machen. Einen Nachteil dieser Methode stellte der hohe apparative sowie zeitliche Aufwand und die Exklusivität des 3D-Rumpfxkursionsstuhls dar.

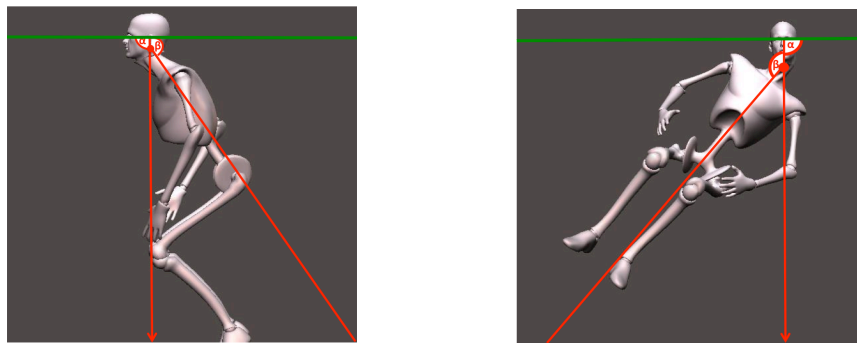


Abbildung 17: Darstellung der Rumpfpositionen in der 3D-RES-Methode

*Exemplarische Darstellung der Rumpfretroflexion und der -rechtskipfung; Der Winkel zwischen Otolithen und Schwerkraft ( $\alpha$ ) bleibt identisch, allein der kraniozervikale Winkel ( $\beta$ ) wird durch die Kopfbewegung verändert; Legende: Rot= Schwerkraftvektor; grün= Otolithenposition*

### 3.6 Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität

Der subjektive Nulldurchgang der Kopfgelenke stellt ein dynamisches Mittel zur Erfassung der kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität (KKS) dar. Diese phasische Untersuchung dient der Registrierung der Typ Ia Muskelspindelafferenzen während der Relativbewegung zwischen Kopf und Körper. Diese Untersuchung wurde anhand des 3D-RES unter stabilen und reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt. Es war so erstmals möglich, die KKS in allen Freiheitsgraden der Halswirbelsäule und ohne Provokation der Otolithen durch eine stabile Kopfposition, zu erheben.

Die Nullposition wurde als gedachte Linie zwischen Kinn und Knie bei dem sitzenden Probanden definiert (Abb. 18). Durch den Gradmesser am Stuhlgerüst konnte der Winkel bei Erreichen der subjektiven Nullposition abgelesen werden. Nach der Auslenkung des Probanden in Flexion, Kippung oder Torsion wurde dieser passiv in die Neutralposition zurückgeführt und gebeten anzugeben wann er den Eindruck habe der Kopf würde unter dem Rumpf hindurch bewegt werden. Den Punkt an dem der Proband das Gefühl hatte, gab er mit dem Signal „Stopp“ bekannt. Der abgelesene Abweichwinkel zur tatsächlichen Nullposition wurde daraufhin notiert.

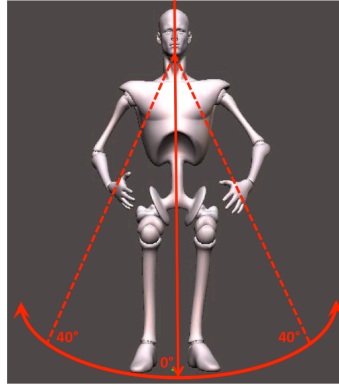


Abbildung 18: Ausgangsposition im subjektiven Nulldurchgang der Kopfgelenke

*Legende: Blau= Radius der Abweichwinkel am Beispiel der Torsion*

### 3.7 Versuchsablauf

Die Gesamtdauer der Untersuchung betrug abhängig vom Probanden durchschnittlich 1,5 Stunden (siehe Abb. 19). Nach der Aufklärung über den Versuchsablauf und die Risiken erfolgte die schriftliche Einverständniserklärung sowie das Anamnesegespräch. Vor der Hauptuntersuchung wurden außerdem die Ein- und Ausschlusskriterien geprüft. Die zuerst durchgeführten Voruntersuchungen: Romberg-Stehversuch und Unterberger-Tretversuch finden sich in Kapitel 3.1 näher beschrieben. Die Aktivität des Spontannystagmus (SPN) wurde einmalig vor den zervikalen Provokationspositionen zur Bestimmung der vestibulären Ruheaktivität durchgeführt und als Ausgangswert, die Baseline, notiert (Kriterien siehe Kapitel 1.3). Ein SPN repräsentiert die basale Aktivität der nystagmusgenerierenden Strukturen im Bereich des Hirnstamms ohne Reizung durch Augen-, Kopf- oder Körperbewegungen. Er kann auch ein Zeichen für eine gestörte neuronale Aktivität der vestibularis- bzw. okulomotorischen Kerne darstellen und ist somit als nicht kompensierter Zustand des vestibulären Systems auf Vestibulariskernkomplexebene zu verstehen. Dieses Phänomen kann als Mismatch zwischen peripherer und zentraler Information interpretiert werden. Die beiden Untersuchungsmethoden sind in Kapitel 3.3 und 3.4 näher beschrieben.

## Material und Methoden

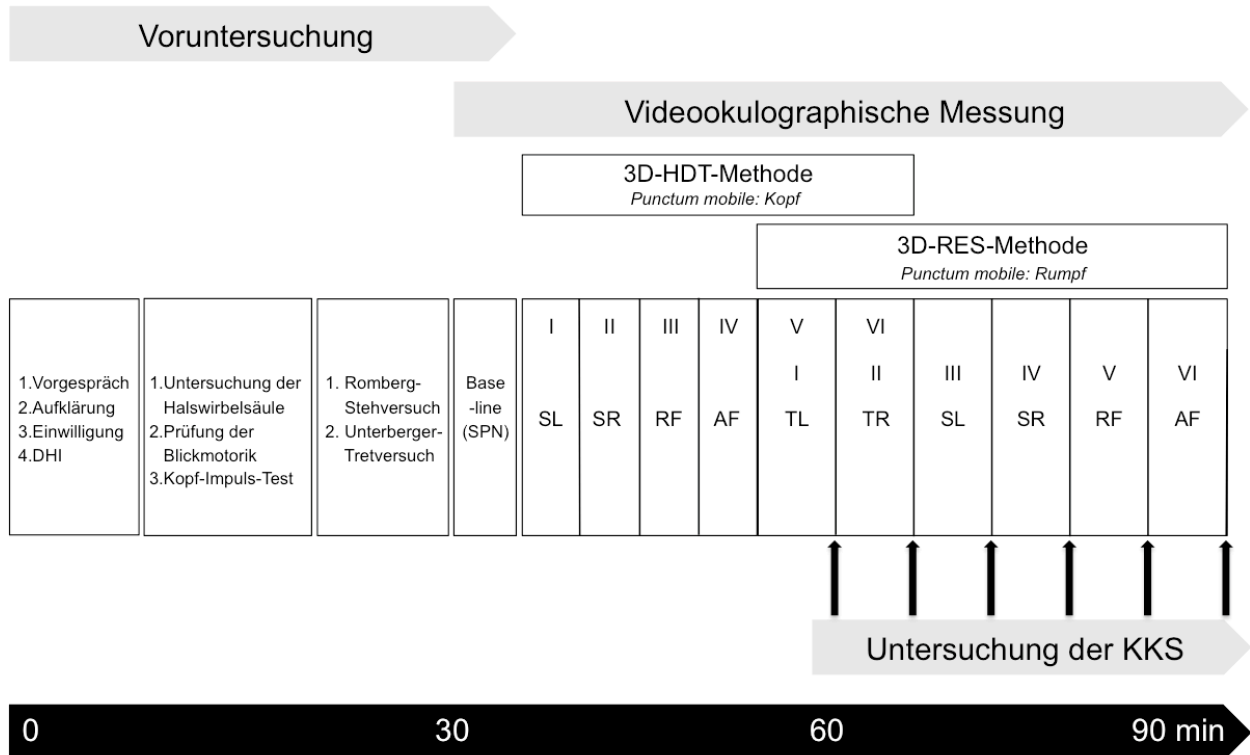


Abbildung 19: Darstellung des Versuchsablaufs

Die einzelnen Felder stellen den zeitlichen Ablauf der Untersuchungen dar. Die Reihenfolge der Untersuchungsmethoden sowie der Einzelpositionen wurde randomisiert. Die KKS wurde mithilfe des subjektiven Nulldurchgangs der Kopfgelenke untersucht. Die Messung erfolgte während der Rückföhrbewegung von Provokationsposition zu Nullposition. Die schwarzen Pfeile symbolisieren den Zeitpunkt der Messung, welcher dem „Stop“ Signal durch den Probanden entspricht. Legende: DHI= Dizziness Handicap Inventory; SPN= Spontannystagmus; 3D-HDT-Methode= 3D-Halsdrehtest-Methode (Punctum mobile: Kopf); 3D-RES-Methode= 3D-Rumpfkursionsstuhl-Methode (Punctum mobile: Rumpf); SL= Seitkippung links; SR= Seitkippung rechts; RF= Retroflexion; AF= Anteflexion; TL= Torsion links; TR= Torsion rechts; KKS= Kraniozervikale kinästhetische Sensibilität

Im Anschluss an die Ruhemessung wurden vier zervikal provozierende Kopfkursionshaltungen (Ante- und Retroflexion sowie Links- und Rechtskippung) und sechs zervikal provozierende Rumpfkursionshaltungen (Ante- und Retroflexion sowie Links- und Rechtskippung, außerdem Rumpftorsion nach links und rechts) eingenommen. Die Rumpftorsion wurde nur auf dem 3D-Rumpfkursionsstuhl erhoben, da in diesem Fall kein Unterschied in der Durchführung zwischen beiden Methoden bestand. Die Probanden wurden der Messreihenfolge randomisiert zugewiesen. Die Gruppen wurden nach Alter und Geschlecht gematcht.

Für die Messung in der 3D-HDT-Methode sollte der Proband entspannt, aber mit möglichst geradem Rücken und Kopf in Neutral-Null-Stellung auf einem Stuhl sitzen. Nach dem Anbringen der VOG-Brille erfolgte deren Einstellung. Nach Einnahme der

Kopfkipfung oder -flexion bis an die zuvor festgestellte physiologische Endstellung bzw. ein Maximum von 40°, sollte der Proband in dieser Provokationsposition der suboccipitalen Muskulatur für die einminütige Dauer der Messung schmerzfrei verharren können. Danach wurde der Kopf in die Ausgangsstellung zurückgeführt.

Für die Untersuchung mithilfe der neuen 3D-RES-Methode brachte der Untersucher den Probanden ebenfalls in die Auslenkungspositionen. Auch hier war das Ziel die individuelle Endstellung bzw. maximal 40° in Rumpfkippung und -flexion und maximal 90° in Rumpftorsion zu erreichen und für eine Minute zu halten. Die Gradzahl konnte von der am Gerüst angebrachten Winkelskala abgelesen werden. Nach der VOG-Messung während der *tonischen* Haltung wurde der Proband während jeder *phasischen* Zurückführung in die Neutralposition gebeten die „subjektive Nullposition der Kopfgelenke“ anzugeben. Abschließend wurde das Befinden des Probanden kontrolliert. Beschwerden, Schmerzen oder Unsicherheit wurden bei allen 100 Probanden nach der Untersuchung ausgeschlossen. Ebenfalls stellte sich keiner der Probanden zu einem späteren Zeitpunkt mit Beschwerden vor. Im Folgenden werden die Probanden mit den zugehörigen Ein- und Ausschlusskriterien präsentiert.

### **3.8 Ein- und Ausschlusskriterien**

Bei der zuerst durchgeführten Schwindelanamnese war auf die verschiedenen Genesen zu achten. Zu Schwindel peripherer Genese zählen beispielsweise der BPLS, die Neuritis vestibularis, der Morbus Menière, autoimmune Innenohrerkrankungen und die Perilymphfistel. Schwindel zentraler Genese kann durch eine transitorische ischämische Attacke im posterioren Stromgebiet, Hirnstamm- und Kleinhirnfarkte, Multiple Sklerose, Tumore der hinteren Schädelgrube, Schädel-Hirn-Traumen, zerebelläre degenerative Erkrankungen hervorgerufen werden.

Der Dizziness Handicap Inventory (DHI) nach Jacobson und Newman sollte vom Probanden mit null Score-Punkten bewertet worden sein <sup>129</sup>. Dieser Bogen wurde für die standardisierte Erfassung von Schwindelpatienten entwickelt. Er enthält 25 Fragen, welche in drei Kategorien eingeteilt sind: Physisch, funktional und emotional. Es werden zwischen 0-100 Punkte vergeben, wobei 0 die totale Beschwerdefreiheit darstellt. Außerdem wird das subjektive Empfinden des Probanden verzeichnet, dafür findet sich am Ende des Fragebogens eine visuelle Analogskala (VAS). Die 100 Probanden dieser Pilotstudie wurden anhand des unauffälligen Score Ergebnisses von 0 Punkten in die

## Material und Methoden

Studie eingeschlossen. Neben der allgemeinen Anwendung des DHI bei Schwindelpatienten erwies er sich bereits in Studien zu zervikogenen Beschwerden und auch bei Untersuchungen an Senioren als nützlich. In einer Studie von Reid et al. zeigte sich bei Patienten mit zervikogenen Schwindelbeschwerden nach Manualtherapie ein signifikanter Rückgang an Schwindel und Gleichgewichts-beschwerden anhand des DHI <sup>130</sup>. Bayat et al. belegten bei Senioren anhand des DHI den Erfolg von Gleichgewichtstraining auf Schwindelbeschwerden <sup>131</sup>. Die Halswirbelsäule wurde von uns in ihrer Statik und Beweglichkeit nach Einschränkungen untersucht. Als Einschlusskriterium galt ein Bewegungsausmaß in allen Freiheitsgraden gemäß der Standardwerte (Tab. 6).

Tabelle 6: Durchschnittliches Bewegungsausmaß der Halswirbelsäule <sup>132</sup>

<b>Freiheitsgrade</b>	<b>Gesamtbeweglichkeit Der Halswirbelsäule</b>	<b>Oberes Kopfgelenk</b>	<b>Unteres Kopfgelenk</b>
Ante-/ Retroflexion	65° / 40°	20° / 10°	-
Torsion rechts/links	50°	-	35°
Seitkipfung rechts/links	35°	5°	-

Nach der Halswirbelsäulenuntersuchung und der Erhebung der Schwindel-Anamnese folgte als vestibulärer Screening-Test der Kopfpulstest, mit welchem man den vestibulookulären Reflex (VOR) untersucht <sup>133</sup>. Im physiologischen Zustand sollte die ruckartige Seiddrehung des Kopfes bei gleichzeitiger Fixation eines stationären Punktes keinen Nystagmus auslösen. Des Weiteren wurde mittels Posturographie (PUG) der Romberg-Steh- sowie der Unterberger-Tretversuch durchgeführt und so die vestibulospinalen Reaktionen des Probanden objektiv geprüft. Mit Hilfe der 3D-Videookulographie wurde in sitzender Position eine Ruhemessung der spontanen Nystagmusaktivität (SPN) durchgeführt. Bis zu einer Intensität von  $\pm 1$  wurde der Proband eingeschlossen. Besonders bei der feinen Messung mit der Videookulographie, ist einem solchen Spontannystagmus nicht automatisch ein Krankheitswert zuzuschreiben <sup>127</sup>. Der physiologische Nystagmus ist nur in Dunkelheit erkennbar. Beim Öffnen der Augen oder bei Belichtung wird er durch Fixation gehemmt. Nach Claussen beginnt der pathologische Bereich ab 24 Schlägen pro 30 Sekunden <sup>120,134</sup>.

Als Ausschlusskriterium galten Schwindel und Schmerzen im suboccipitalen und paravertebralen Muskelbereich, eine Klopfschmerzhaftigkeit und Asymmetrien im

Bereich der Halswirbelsäule. Ein Temporalisdruckschmerz wurde ebenfalls ausgeschlossen, da er ein Zeichen für einen stark erhöhten Muskeltonus oder Erkrankungen wie Arteriitis Temporalis sein kann. Alle Formen der neurootologischen wie neurologischen, psychiatrischen und Kreislauferkrankungen sowie Erkrankungen des Bewegungsapparates galten als Ausschlusskriterium. Traumata der Halswirbelsäule in der Vorgeschichte waren ebenfalls auszuschließen. Des Weiteren galten Schwangerschaft, implantierte elektrische Geräte und ein Gewicht über 100 kg Körpergewicht als Ausschlusskriterium. Die Einnahme von Medikamenten, welche Schwindelzustände auslösen können oder regelmäßiger Drogenkonsum war auszuschließen. Tabak-, Koffein-, Alkohol- oder der Konsum von anderen bewusstseinsverändernden Substanzen bis zu vier Stunden vor der Untersuchung waren auszuschließen, da sie die Reizantwort verändern können <sup>135</sup>.

### 3.9 Stichprobenbeschreibung

An der Untersuchung nahmen 100 vestibulär gesunde Probanden im Alter von 18 - 66 Jahren teil. Im Hinblick auf der hier relevanten Fragestellung bezüglich eines Einflusses von Lebensalter auf Nystagmusmodulation bei Provokation wurden zwei Altersgruppen gebildet. Der Altersmedian der Gesamtstichprobe betrug 39 Jahre und wurde willkürlich gesetzt. Für die Probanden zwischen dem 18.-39. Lebensjahr (Md= 25,50) wählten wir die Gruppenbezeichnung Gruppe<sup>26</sup>. Die Probanden zwischen dem 40.-66. Lebensjahr (Md= 49,50) wurden nachfolgend als Gruppe<sup>50</sup> bezeichnet. Im Hinblick auf das Alter und das Geschlecht wurden die Gruppen gematcht (Tab. 7).

Tabelle 7: Deskriptive Stichprobenbeschreibung

*Legende: n=Anzahl; range= Bereich; M= Mittelwert; m= männlich; w= weiblich; Gruppe<sup>26</sup> (Md= 26); Gruppe<sup>50</sup> (Md= 50)*

Gruppe	Anzahl	Alter		Geschlecht	
		n	range	M	m
Gruppe <sup>50</sup>	50	40-66	50,28	22	28
Gruppe <sup>26</sup>	50	18-39	26,64	26	24
<b>Gesamt</b>	100	18-66	38,46	48	52

### 3.10 Datenanalyse

#### 3.10.1 Auswertung des Nystagmus

Zervikale Nystagmusreaktionen können selbst während einer Aufzeichnung sehr variabel und besonders bei Gesunden teilweise sehr schwach sein. Um kleine Amplituden nicht zu übersehen, erfolgte die Auswertung manuell. Erst ab einer Sequenz von fünf aufeinander folgenden Schlägen auf einer Amplitudenskala von  $\pm 10^\circ$  wurde eine Bewegung als Nystagmus identifiziert. Zur Einteilung des erfassten Nystagmus wurden als Kriterien die Amplitude und die Frequenz herangezogen. Es wurde sich bei der Auswertung an den von Hölzl et al. entworfenen Kategorien und Score-Punktesystem orientiert (Tab. 8) <sup>84</sup>. Kategorie I umfasst gerade noch erkennbare Nystagmusreaktionen, Kategorie II gut erkennbare Nystagmen einer Amplitude  $\leq 3^\circ$  und Kategorie III Nystagmen mit Amplituden  $> 3^\circ$ .

Außerdem wurde die Schlagrichtung des Nystagmus betrachtet und mit den Vorzeichen „+“ für rechts bzw. Upbeat sowie „-“ für links bzw. Downbeat notiert. Eine statistisch relevante intraindividuelle Umkehr der Nystagmusrichtung während den Messungen war nicht zu verzeichnen.

Tabelle 8: Nystagmuskategorien und deren Einteilung im Punktescore

Nystagmuskategorie	Punktescore
0	0
I	1
II	2
III	3

Für die Nystagmusaktivität während der Ruhemessung (Baseline) und für jede Rumpfposition erfolgte eine mögliche Punktebewertung von jeweils 0-3 (Tab. 9). Bei Betrachtung von Kombinationspositionen (Kippung, Flexion, Torsion) konnte somit jeweils eine Gesamtpunktzahl von sechs Punkten erreicht werden. Alle Provokationspositionen konnten zusammen einen Maximalwert von 18 Punkten erreichen. Beim Methodenvergleich konnte ein Maximalscore von zwölf erreicht werden, da nur Flexion und Kippung zusammengefasst wurden (Tab. 9). Die Torsion wurde einmalig aufgezeichnet und diente somit nur dem Altersgruppenvergleich. Die Zusammenfassung der Einzel- zu Kombinationspositionen diente der übersichtlicheren Darstellung. Die Nystagmusdimensionen horizontal und vertikal wurden getrennt

voneinander betrachtet. In vorangegangenen Studien, unter anderem der Forschungsgruppe von Hölzl et al., wurde dem torsionalen Nystagmus keine bedeutende Rolle für den Zervikalnystagmus zugeordnet. In dieser Studie war die torsionale Dimension selten zu registrieren und durch hohe Artefaktbelastung nicht sicher zu interpretieren. Ihre Bedeutung im Zusammenhang mit den zervikalen Nystagmen erscheint auch in Vorversuchen nicht interpretierbar<sup>26</sup>. Aus diesen Gründen wurde sie von der Auswertung ausgeschlossen.

Tabelle 9: Schematische Darstellung der Score-Punktebewertung

*Legende: I= Bestimmung der Spontan-nystagmusaktivität (SPN); II= Bestimmung der Nystagmusaktivität in den zervikalen Provokationsposition; 3D-HDT-Methode= dreidimensionaler Halsdrehtest durch Kopfauslenkung; 3D-RES-Methode= dreidimensionaler Halsdrehtest durch Rumpfauslenkung*

I	Spontanaktivität	Score
	Baseline	0-3

**3D-HDT-Methode**

II	Position	Score
<b>a</b>	<i>Kopfflexion gesamt</i>	0-6
	Kopfanteflexion	0-3
	Kopfretroflexion	0-3
<b>b</b>	<i>Kopfkippung gesamt</i>	0-6
	Kopfkippung rechts	0-3
	Kopfkippung links	0-3
	Gesamt	12

**3D-RES-Methode**

II	Position	Score
<b>a</b>	<i>Rumpfflexion gesamt</i>	0-6
	Rumpfanteflexion	0-3
	Rumpfretroflexion	0-3
<b>b</b>	<i>Rumpfkippung gesamt</i>	0-6
	Rumpfkippung rechts	0-3
	Rumpfkippung links	0-3
<b>c</b>	<i>Rumpftorsion gesamt</i>	0-6
	Rumpftorsion rechts	0-3
	Rumpftorsion links	0-3
	Gesamt	18

Wie bereits beschrieben, wurde zunächst überprüft, ob eine zervikal reizende Position einen Provokationsnystagmus bei vestibulär gesunden Probanden erzeugen kann. Mit beiden Methoden wurde der kraniozervikale Übergang gereizt, einmal durch Kopfflexion in der 3D-HDT-Methode sowie einmal durch Rumpfflexion in der 3D-RES-Methode und mit dem Wert der Baseline (SPN) verglichen (Abb. 20). Die erhobenen Nystagmen in zervikaler Provokationsposition werden folgend als zervikale Provokationsnystagmen (CPN) bezeichnet. Der Differenzwert zeigt folglich, die Nystagmusaktivitätsänderung durch Provokation an.



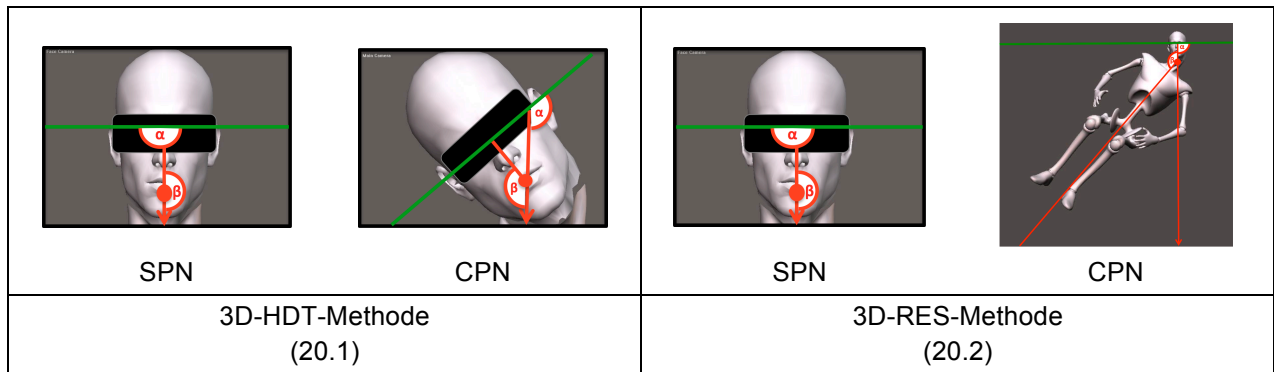


Abbildung 20: Auswertung des Differenzvergleichs von Spontan- (SPN) zu Provokationsnystagmus (CPN) je Methode am Beispiel der Rechtskipfung

20.1: *Schwerkraftabhängige zervikotonische Provokation im 3D-HDT durch Kopfauslenkung*; 20.2: *Schwerkraftunabhängige zervikotonische Provokation im 3D-RES durch Rumpfauslenkung*; **Legende:** SPN= Spontan-nystagmus (Baseline); CPN= zervikaler Provokationsnystagmus;  $\alpha$ = Winkel zwischen Otolithen und Schwerkraft;  $\beta$ = Der kraniozervikale Winkel (Winkel zwischen Kopf und Rumpf)

Die Stichprobe wurde zudem auf einen Unterschied der provozierten Nystagmusreaktionen im Hinblick auf das Alter untersucht (Abb. 21). Da die beiden Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich ihrer Baseline aufwiesen, konnten sie direkt miteinander verglichen werden.

Nachfolgend wurde der Effekt der Untersuchungsmethoden auf den provozierten Nystagmus miteinander verglichen. In diesem Methodenvergleich wurden die Nystagmusdifferenzen als Maß der Aktivitätsänderung zwischen der 3D-HDT-Methode und der 3D-RES-Methode zum Vergleich herangezogen (Abb. 22). Da die Baseline einmalig vor den Folgemessungen bestimmt wurde, hatte sie denselben Einfluss auf beide Methoden.

## Material und Methoden

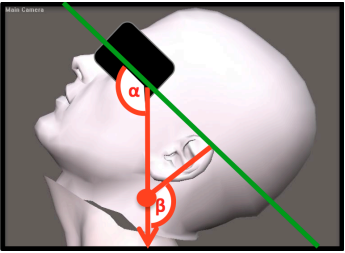
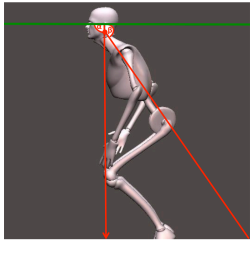
 <p style="text-align: center;"><b>3D-HDT-Methode</b> (21.1)</p>	 <p style="text-align: center;"><b>3D-RES-Methode</b> (21.2)</p>
Differenz: Gruppe <sup>50</sup> - Gruppe <sup>26</sup> Beispiel Punktescore: $5 - 3 = 2$	Differenz: Gruppe <sup>50</sup> - Gruppe <sup>26</sup> Beispiel Punktescore: $3 - 2 = 1$

Abbildung 21: Auswertung des Altersgruppenvergleichs in zervikotonischer Provokationsposition je Methode am Beispiel der Flexion

21.1: *Schwerkraftabhängige zervikotonische Provokation im 3D-HDT durch Kopfauslenkung; 21.2: Schwerkraftunabhängige zervikotonische Provokation im 3D-RES durch Rumpfauslenkung; graphische Darstellung exemplarisch Retroflexion; Legende: Gruppe<sup>26</sup> (Md= 26); Gruppe<sup>50</sup> (Md= 50); Flexion= Ante- und Retroflexion;  $\alpha$ = Winkel zwischen Otolithen und Schwerkraft;  $\beta$ = Der kraniozervikale Winkel (Winkel zwischen Kopf und Rumpf)*

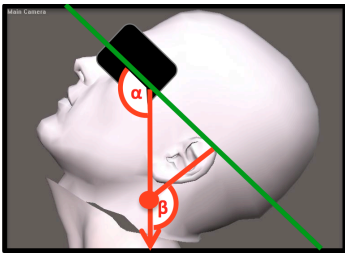
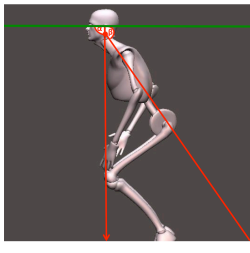
 <p style="text-align: center;"><b>3D-HDT-Methode</b></p>	 <p style="text-align: center;"><b>3D-RES-Methode</b></p>
Punktescore Kopfanteflexion: 0-3 Kopfretroflexion: 0-3 Punkte gesamt: 0-6	Punktescore Rumpfanteflexion: 0-3 Rumpfretroflexion: 0-3 Punkte gesamt: 0-6
Beispiel: 3D-HDT-Methode: 2 (Anteflexion) + 3 (Retroflexion) = 5 3D-RES-Methode : 1 (Anteflexion) + 3 (Retroflexion) = 4 Differenz Flexion: 3D-HDT-Methode - 3D-RES-Methode $5 - 4 = 1$	

Abbildung 22: Auswertung des Methodenvergleichs in zervikotonischer Provokationsposition bei variablem Schwerkraftvektor am Beispiel der Flexion

*Es finden sich gleiche flektierte Kopf-Rumpf-Beziehungen bei variablem Schwerkraftvektor: Schwerkraftabhängige zervikotonische Provokation durch Kopfauslenkung im 3D-DHT; zervikotonische Provokation durch Rumpfauslenkung im 3D-RES; Voraussetzung für diese Rechnung: SPN = 0; Legende: Flexion= Ante- und Retroflexion;  $\alpha$ = Winkel zwischen Otolithen und Schwerkraft;  $\beta$ = Der kraniozervikale Winkel (Winkel zwischen Kopf und Rumpf)*

### 3.10.2 Statistik

Die statistischen Analysen der gewonnenen Ergebnisse wurden mithilfe der Software SPSS (Version 15.0, Chicago, IL) generiert. Die Box-Whisker-Plots wurden mit dem Programm GraphPad Prism erstellt.

Lagen Normalverteilung und metrische Daten vor, wurde der t-Test angewendet und der Mittelwert (M) sowie die Standardabweichung (SD) beschrieben. Er testet zwei Stichproben danach, ob ihr Erwartungswert gleich ist. Die Normalverteilung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test überprüft. Bei nicht normalverteilten Parametern sowie ordinalskalierten Daten wurden die parameterfreien Signifikanztests Wilcoxon-Rangsummen-Test und U-Test nach Mann-Whitney verwendet.

Der Wilcoxon-Test beruht auf der Rangordnung von zwei verbundenen Stichproben. Er überprüft die Hypothese, dass beide Stichproben dieselbe Verteilung haben ohne eine Aussage über die Form der Verteilung zu machen. Die Ränge beschreiben eine Reihenfolge, wobei immer bei dem kleinsten Wert begonnen wird. Der Test zieht die Messwertpaare voneinander ab, wobei positive, negative und Nulldifferenzen unterschieden werden. Der Test berücksichtigt dabei auch die Höhe der Differenzen. Dies bedeutet, dass wenn Pärchen eine hohe Differenz aufweisen dies zu einem gesteigerten Gesamtergebnis führen kann. Bei dem U-Test nach Mann-Whitney handelt sich um einen Homogenitätstest für unverbundene Stichproben, welcher auf dem Wilcoxon-Test basiert. Er zählt wie häufig Rangplatzunterschiede vorkommen und überprüft so die Signifikanz der Übereinstimmung zweier Verteilungen.

Ab einem Wert  $p < 0,05$  wurde das Ergebnis als statistisch signifikant bewertet und dementsprechend gekennzeichnet. Aufgrund des hypothesengenerierenden, explorativen Charakters der Analyse wurde auf die Adjustierung des Fehlers 1. Art bei Messwiederholungen verzichtet. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in Form von Tabellen und Box-Whisker-Plots.

## **4 Ergebnisse**

Im folgenden Teil des Kapitels 4.1 sollen einleitend die diagnostischen Voruntersuchungen dargestellt werden. Im Anschluss werden in Kapitel 4.2 die gewonnenen Ergebnisse der Ruhemessung (SPN) im Vergleich zu den Provokationsmessungen (CPN) jeweils mit der dreidimensionalen-Halsdrehtest-Methode (Punctum mobile: Kopf) und der dreidimensionalen-Rumpfxkursionsstuhl-Methode (Punctum mobile: Rumpf) aufgeführt. Zudem wurden die Erhebungen nach Betrachtung der gesamten Stichprobe (Md= 39) auch in den beiden Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup> [Md= 26]; Gruppe<sup>50</sup> [Md= 50]) aufgezeigt und statistisch verglichen. Anschließend wird in Kapitel 4.3 der Methodenvergleich dargestellt. Abschließend findet sich in Kapitel 4.4 die Untersuchung des subjektiven Nulldurchgangs mithilfe der 3D-RES-Methode. Die gewonnenen Daten und Ergebnisse wurden durch statistische Analyseverfahren einer kritischen Überprüfung unterzogen und graphisch im Boxplot dargestellt.

### **4.1 Diagnostische Voruntersuchungen**

#### **4.1.1 Die posturale Kontrolle**

Mittels statischer Posturographie wurde der Romberg-Stehversuch auf der Luzerner Messplatte getestet. Zudem wurde der Unterberger-Tretversuch durchgeführt. Bereits Hülse et al. berichteten, dass die interindividuelle Streubreite der Schwankungsparameter bei Gesunden in der Posturographie und dem Unterberger-Tretversuch erheblich sei<sup>115</sup>. Für eine pathologische Bewertung größerer Schwankungen müssten diese durch andere auffällige Ergebnissen bestätigt werden.

##### **4.1.1.1 Der Romberg-Stehversuch**

Die statische Messung der vestibulospinalen Reaktionen, der Romberg-Stehversuch, wurde bei offenen und geschlossenen Augen durchgeführt. Dafür wurden zweimal für 30 Sekunden die Schwankungsparameter Delta X, Delta Y, Delta X\*Y sowie Sway in cm und cm<sup>2</sup> aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Stichprobe sind deskriptiv dargestellt und wurden auf einen Alterseffekt hin verglichen.

## Ergebnisse

Insgesamt präsentierte keiner der Probanden ein auffälliges Schwankungsmuster oder eine Sturztendenz. So betrug die mittlere Schwankungsfläche (Sway) 6,4 cm<sup>2</sup> (SD 3,67), die mittlere laterale Schwankungsdifferenz Delta X 1,69 cm (SD 1,64) und die mittlere anteriore/posteriore Schwankungsdifferenz Delta Y 2,39 cm (SD 0,85). Delta X\*Y, welches die Summe von Delta X und Delta Y darstellt, betrug 3,99 cm<sup>2</sup> (SD 3,02), siehe Abb. 23.

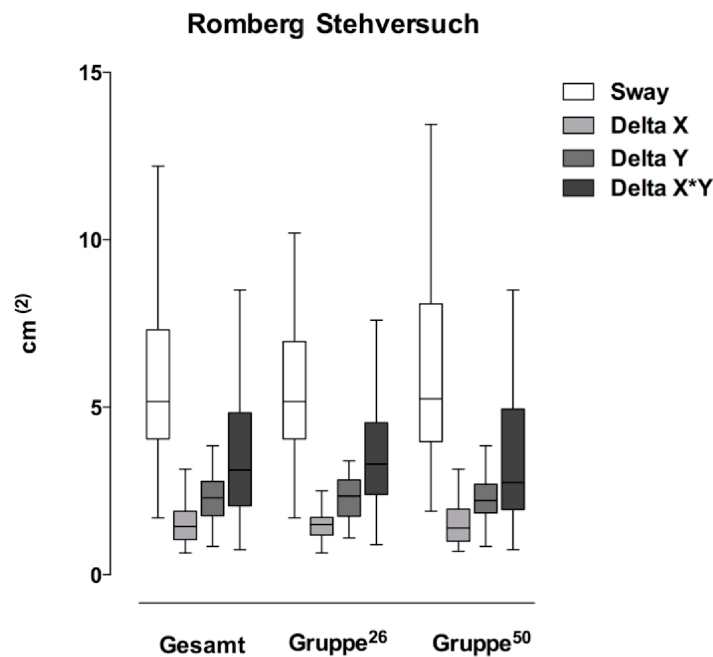


Abbildung 23: Ergebnisse im Romberg-Stehversuch

*Deskriptive Darstellung der Schwankungsparameter; Legende: Gesamt= Gesamtkollektiv (n= 100); Gruppe<sup>26</sup>= 18. - 39. Lebensjahr (n= 50); Gruppe<sup>50</sup>= 40. - 66. Lebensjahr (n= 50); PUG= Posturographie; Sway= Sway Area nach Diener/Dichigans/Bacher Gleichung in cm<sup>2</sup>; Delta X= Maximale laterale Schwankungsdifferenz in cm; Delta Y= Maximale anteriore/posteriore Schwankungsdifferenz in cm; Delta X\*Y= Produkt von Delta X und Y in cm<sup>2</sup>)*

Der Altersgruppenvergleich ergab keinen signifikanten Unterschied der vestibulospinalen Reaktionen zwischen den beiden Probandengruppen (Tab. 10).

## Ergebnisse

Tabelle 10: Darstellung des Altersgruppenvergleichs

Der Alterseffekt anhand der Schwankungsparameter dargestellt, mit dem t-Test für unverbundene Stichproben überprüft; Legende: Gruppe<sup>26</sup> (18.-39 Lebensjahr); Gruppe<sup>50</sup> (40-66. Lebensjahr); Sway= Sway Area nach Diener/Dichigans/Bacher Gleichung in cm<sup>2</sup>; Delta X= Maximale laterale Schwankungsdifferenz in cm; Delta Y= Maximale anteriore/posteriore Schwankungsdifferenz in cm; Delta X\*Y= Produkt der Parameter Delta X und Y in cm<sup>2</sup>; M= Mittelwert, SD= Standardabweichung

Altersgruppenvergleich			
Schwankungsparameter (Augen auf & zu)	M (SD)		p-Wert
	Gruppe <sup>26</sup>	Gruppe <sup>50</sup>	
Sway auf	5,34 (± 2,42)	5,89 (± 3,64)	0,783
Delta X auf	1,44 (± 0,59)	2,17 (± 4,38)	0,801
Delta Y auf	2,45 (± 1,27)	2,24 (± 0,91)	0,419
Delta X*Y auf	3,62 (± 2,55)	3,71 (± 3,11)	0,815
Sway zu	6,59 (± 4,30)	7,57 (± 5,62)	0,588
Delta X zu	1,65 (± 0,77)	1,52 (± 0,70)	0,353
Delta Y zu	2,49 (± 1,08)	2,41 (± 0,90)	0,839
Delta X*Y zu	4,46 (± 4,75)	4,20 (± 0,90)	0,893

### 4.1.1.2 Der Unterberger-Tretversuch

Mit der Untersuchung der vestibulospinalen Reaktionen im Unterberger-Tretversuch wurden die Altersgruppen nach dem Körpereigenspin, gemessen in Winkelgrad, verglichen. Die Schwankung wurde im Gesamtkollektiv und in den einzelnen Gruppen registriert.

Die mittlere Abweichung des Gesamtkollektivs lag bei 17,7° (SD 28,9). Bei 36 % aller Probanden traten Abweichungen zur Seite auf wobei nur wenige Ausnahmen über 45° abwichen (Tab. 11).

Tabelle 11: Torsionsabweichung der Probanden in Grad im Unterberger-Tretversuch

Grad	Gruppe <sup>26</sup>	Gruppe <sup>50</sup>	Gesamt
0	62 %	66 %	64 %
> 0	19 %	17 %	36 %

Bei der Auswertung ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen Gruppe<sup>50</sup> und Gruppe<sup>26</sup> (p= 0,879). Durchschnittlich schwankten die Probanden der Gruppe<sup>26</sup> um 17,1° (SD 27,3), der Gruppe<sup>50</sup> um 18,3° (SD 30,8). Wie in der folgenden graphischen Abbildung lag der Median um die 0°.

## Ergebnisse

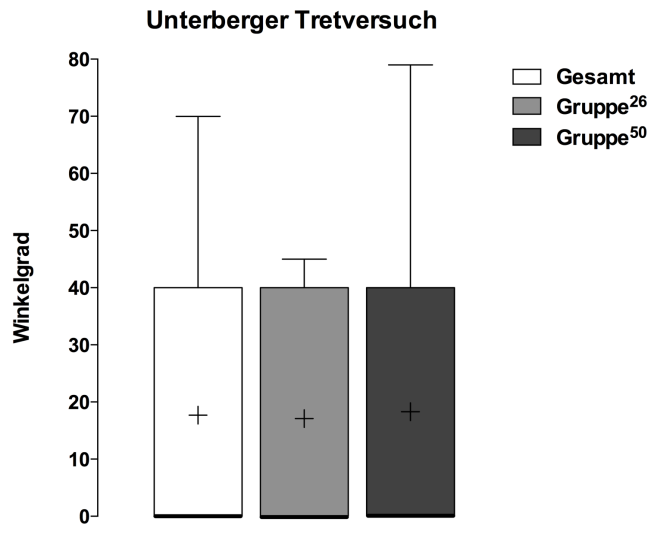


Abbildung 24: Ergebnisse im Unterberger-Tretversuch

Gemessen wurde die Abweichung von der Nullposition in Winkelgrad, mit dem U-Test nach Mann-Whitney für nicht normalverteilte Stichproben überprüft; Legende: Gruppe<sup>26</sup>= 18. - 39. Lebensjahr; Gruppe<sup>50</sup>= 40. - 66. Lebensjahr; + = Mittelwert

### 4.1.2 Die Baseline der Videookulographie

Keine oder eine Nystagmusaktivität  $\leq 1$  des Scores (siehe Kapitel 3.10.1) in der Ruhemessung war eines der Einschlusskriterien und notwendige Bedingung für die anschließende Untersuchung der beiden Messmethoden. Die Baseline diente als Ausgangswert für die folgenden Nystagmusmodulationen während zervikaler Provokation. Die Videookulographie (VOG) ist ein besonders sensibles Messinstrument, das im Gegensatz zu anderen Verfahren, wie der Frenzelbrille, auch feinste Nystagmen registriert. Folglich sind in der Ruhemessung mit der VOG registrierte Nystagmen von einem geringeren Stellenwert als sie es mit einer anderen Methode wären<sup>136</sup>. Bei 100 untersuchten Probanden traten in der Baseline-Messung bei 12 % der Probanden horizontale Nystagmen und bei 16 % vertikale Nystagmen auf. Bei sonst unauffälliger Anamnese und Diagnostik kann dies als physiologische Schwankung der Nystagmusaktivität gewertet werden<sup>127</sup>. Beim Vergleich der Häufigkeiten des Vorkommens von horizontalen und vertikalen Nystagmen in der Ruhemessung war weder in der gesamten Stichprobe noch den beiden Altersgruppen ein signifikanter Unterschied zu verzeichnen (Tab. 12).

## Ergebnisse

Tabelle 12: Darstellung der absoluten Häufigkeiten und der Verteilung von horizontalen und vertikalen Nystagmen

Vergleich der Verteilung horizontaler und vertikaler Nystagmen zwischen den Altersgruppen, mit dem U-Test nach Mann-Whitney für unverbundene Stichproben überprüft; Vergleich des Auftretens horizontaler und vertikaler Nystagmen, mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben überprüft; Legende: SPN= Spontannystagmus in der Ruhemessung vor Provokation; Gruppe<sup>26</sup>= 18. - 39. Lebensjahr; Gruppe<sup>50</sup>= 40. - 66. Lebensjahr; n= Anzahl

SPN	Gruppe <sup>26</sup> (n= 50)	Gruppe <sup>50</sup> (n= 50)	Gesamt (n= 100)	p-Wert
Horizontalnystatgmus	5	7	12	0,760
Vertikalnystagmus	9	7	16	0,786
p-Wert	0,388	1,000	0,503	

### 4.2 Analyse der Provokationspositionen im Vergleich zur Baseline

Es sollte untersucht werden, ob sich die Ergebnisse der Baseline (SPN) von den Ergebnissen unter zervikotonischen Provokationsbedingungen (CPN) in Flexion (Ante- und Retroflexion), Kippung (Rechts- und Linkskippung) sowie Torsion (Rechts- und Linkstorsion) unterscheiden. Dies wurde jeweils mit der 3D-HDT-Methode (Punctum mobile: Kopf) und der 3D-RES-Methode (Punctum mobile: Rumpf) durchgeführt. Die Rumpftorsion wurde einmalig durchgeführt, da sich die Umsetzung in beiden Methoden gleicht. Sie wird bei den Ergebnissen der 3D-RES-Methode aufgeführt. Die 100 vestibulär gesunden Probanden wurden in randomisierter Positionsreihenfolge mit den Methoden untersucht. Die Ergebnisse wurden im Gesamtkollektiv, sowie nach Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) aufgeteilt, statistisch miteinander verglichen. Erwähnenswert erscheint hier zunächst, dass über beide Methoden hinweg bei nur 18 von 100 Probanden keine Nystagmusmodulation festgestellt wurde. In 82 % der Fälle war folglich eine Nystagmusaktivitätsänderung ungeachtet der Methode in mindestens einer der zervikalen Provokationspositionen gegenüber der Baseline festzustellen.

In diesem Kapitel werden zunächst die gewonnenen Ergebnisse jeweils aus der 3D-HDT-Methode und der 3D-RES-Methode dargestellt. Im Anschluss hieran wurden je Methode die Reaktionsdifferenzen zwischen den Altersgruppen verglichen. In folgendem Kapitel wird außerdem ausgewertet, ob eine Abhängigkeit der Kopf- bzw. Rumpfposition zur Nystagmusdimension auffiel. Vor diesem Hintergrund erschien es maßgeblich zu prüfen welchen Effekt die Methoden im Differenzvergleich auf die Nystagmusaktivität haben, dies findet sich in Kapitel 4.3 aufgeführt. Abschließend findet



sich in Kapitel 4.4 die dynamische Untersuchung der kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität (KKS) mithilfe des 3D-RES.

### **4.2.1 Schwerkraftabhängige zervikotonische Provokation**

Es folgt die Darstellung der Resultate der 3D-Halsdrehtests gemäß der publizierten Methodenbeschreibung von Hölzl et al.<sup>84</sup>. Es wurde der Frage nachgegangen, ob sich in der 3D-HDT-Methode in den zervikalen Provokationspositionen eine gesteigerte Nystagmusaktivität im Vergleich zur Baseline (SPN) feststellen lässt.

#### **4.2.1.1 Das Gesamtkollektiv**

Beim Vergleich des Nystagmuscore von zervikotonischem Provokationsnystagmus (CPN) und Baseline (SPN) im Sinne einer Aktivitätsänderung konnte mit der 3D-HDT-Methode insgesamt eine signifikante Steigerung in horizontaler sowie vertikaler Nystagmusdimension verzeichnet werden (siehe Tabelle 13).

Insgesamt kam es bei 79 % der Probanden (n= 100) zu einer gesteigerten Nystagmusaktivität in mindestens einer der zervikalen Provokationspositionen (Ante- und Retroflexion sowie Links- und Rechtskipfung) und einer der beiden Nystagmusdimensionen (horizontal und vertikal). Folglich zeigten 21 % der Probanden zu keinem Zeitpunkt und in keiner Messposition eine Aktivitätsveränderung.

Bei 25 % der Probanden (n= 100) war eine Steigerung der horizontalen Nystagmusaktivität gegenüber den Werten der Baseline (SPN) in Linkskippung nachweisbar. Ähnlich wie in der Rechtskipfung, wo 26 % eine Steigerung der horizontalen Nystagmusaktivität gegenüber der Baseline aufwiesen. In der Anteflexion war die Steigerung bei 22 % und in der Retroflexion bei 23 % der Probanden zu verzeichnen.

Für den vertikalen Nystagmus zeigte sich ein ähnliches Bild. Hier wiesen 24 % (Linkskippung) und respektive 30 % (Rechtskipfung) der Probanden (n= 100) in der Kopfseitneigung eine gesteigerte Nystagmusaktivität nach Provokation mittels der 3D-HDT-Methode durch Kopfauslenkung auf, sowie 29 % (Anteflexion) und 30 % (Retroflexion) nach Kopfflexion.

## Ergebnisse

Tabelle 13: Statistische Kennwerte der 3D-HDT-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Kopfauslenkung bei Probanden anhand des Scoresystems

Die Provokationsnystagmen im 3D-HDT mit „Punctum mobile: Kopf“ bei allen Probanden (n= 100) im Vergleich zur Baseline (SPN), mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben überprüft; Legende: SPN= Spontannystagmus; CPN= Zervikotonischer Provokationsnystagmus, M= Mittelwert; SD= Standardabweichung

Baseline (SPN) vor Provokation	3D-HDT-Methode Kopfhaltungenpositionen	CPN während Provokation	
		M (SD)	p-Wert
Horizontalnystagmus (M= 0,12; SD= 0,33)	Linkskippung	0,50 (± 0,86)	< 0,001
	Rechtskipfung	0,40 (± 0,70)	< 0,001
	Anteflexion	0,39 (± 0,78)	0,001
	Retroflexion	0,37 (± 0,75)	0,001
Vertikalnystagmus (M= 0,16; SD= 0,37)	Linkskippung	0,39 (± 0,72)	0,003
	Rechtskipfung	0,52 (± 0,82)	< 0,001
	Anteflexion	0,44 (± 0,67)	< 0,001
	Retroflexion	0,62 (± 0,93)	< 0,001

### 4.2.1.2 Die Altersgruppen

Der Nystagmusscore in den zervikotonischen Provokationspositionen in der 3D-HDT-Methode im Vergleich zur Baseline (SPN) wurde außerdem für die Altersgruppen getrennt betrachtet (siehe Tab. 14 und 15). 46 % der Probanden aus Gruppe<sup>26</sup> (n= 50) wiesen keine Nystagmusaktivitätsänderung in den Provokationspositionen Kippung und Flexion auf, während bei den Probanden aus Gruppe<sup>50</sup> (n= 50) diese Anzahl nur 16 % betrug. 86 % der Gruppe<sup>50</sup> zeigten eine Aktivitätsänderung, was einer wesentlich häufigeren Reaktion als in Gruppe<sup>26</sup> entspricht.

In Gruppe<sup>26</sup> war in der horizontalen Dimension in den Kopfpositionen Links-, Rechtskipfung und Kopfretrorflexion ein signifikanter Unterschied der erreichten Scorepunkte zur Baseline zu finden (Tab. 14). In der Kopfseitneige nach links fanden sich deskriptiv in 16 % der Fälle (n= 50) eine gesteigerte horizontale Nystagmusaktivität nach rechts 22 %. In der Retrorflexion des Kopfes fanden sich bei 18 % (n= 50) mehr Horizontalnystagmen im Vergleich zur Baseline.

In der vertikalen Dimension hingegen fand sich ausschließlich in der Retrorflexion eine gesteigerte Nystagmenmodulation. Dort fand sich bei 9 % der Probanden eine Steigerung der Nystagmusaktivität im Vergleich zur Baseline.

## Ergebnisse

Tabelle 14: Statistische Kennwerte der 3D-HDT-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Kopfauslenkung der Gruppe<sup>26</sup> anhand des Scoresystems

Die Provokationsnystagmen im 3D-HDT mit „Punctum mobile: Kopf“ bei Probanden der Gruppe<sup>26</sup> (n= 50) im Vergleich zur Baseline (SPN), mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben überprüft; **Legende:** SPN= Spontannystagmus; CPN= Zervikotonischer Provokationsnystagmus, M= Mittelwert; SD= Standardabweichung; Gruppe<sup>26</sup> = 18. - 39. Lebensjahr

Baseline (SPN) vor Provokation	3D-HDT-Methode Kopfhaltelpositionen	CPN während Provokation	
		M (SD)	p-Wert
Horizontalnystagmus (M= 0,10; SD= 0,30)	Linkskippung	0,34(± 0,69)	<b>0,020</b>
	Rechtskipfung	0,34 (± 0,66)	<b>0,014</b>
	Anteflexion	0,26 (± 0,57)	0,072
	Retroflexion	0,30 (± 0,68)	<b>0,036</b>
Vertikalnystagmus (M= 0,18; SD= 0,39)	Linkskippung	0,28 (± 0,67)	0,255
	Rechtskipfung	0,34 (± 0,77)	0,117
	Anteflexion	0,26 (± 0,60)	0,460
	Retroflexion	0,44 (± 0,81)	<b>0,028</b>

Wie in Tabelle 15 ersichtlich stellte sich der Score bei den Probanden aus Gruppe<sup>50</sup> in der horizontalen sowie vertikalen Nystagmusdimension in Kippung und Flexion signifikant höher als in der Baseline (SPN) dar.

Bei 34 % der Probanden (n= 50) in Gruppe<sup>50</sup> war eine Steigerung der horizontalen Nystagmusaktivität gegenüber den Werten der Baseline (SPN) in Kopflinkskippung nachweisbar. In der Rechtskipfung des Kopfes wurde eine Steigerung bei 30 % (n= 50) gemessen. In der Flexion des Kopfes war in beide Richtungen eine Steigerung bei 28 % zu verzeichnen.

Die vertikale Nystagmusaktivität stieg nach der Provokation bei 34 % (n= 50) in der Kopflinkskippung und 46 % (n= 50) in der Kopfrechtskipfung an. Bei der Flexion war eine Steigerung bei 42 % der Probanden in der vertikalen Nystagmusdimension nachweisbar.

## Ergebnisse

Tabelle 15: Statistische Kennwerte der 3D-HDT-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Kopfauslenkung der Gruppe<sup>50</sup> anhand des Scoresystems

Die Provokationsnystagmen im 3D-HDT mit „Punctum mobile: Kopf“ bei Probanden der Gruppe<sup>50</sup> (n= 50) im Vergleich zur Baseline (SPN), mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben überprüft; **Legende:** SPN= Spontannystagmus; CPN= Zervikotonischer Provokationsnystagmus, M= Mittelwert; SD= Standardabweichung; Gruppe<sup>50</sup> = 40. - 66. Lebensjahr

Baseline (SPN) vor Provokation	3D-HDT-Methode Kopfhaltungenpositionen	CPN während Provokation	
		M (SD)	p-Wert
Horizontalnystagmus (M= 0,14; SD= 0,35)	Linkskippung	0,66 (± 0,98)	<b>0,001</b>
	Rechtskipfung	0,46 (± 0,73)	<b>0,011</b>
	Anteflexion	0,52 (± 0,93)	<b>0,008</b>
	Retroflexion	0,44 (± 0,81)	<b>0,025</b>
Vertikalnystagmus (M= 0,14; SD= 0,35)	Linkskippung	0,50 (± 0,76)	<b>0,004</b>
	Rechtskipfung	0,70 (± 0,84)	<b>&lt; 0,001</b>
	Anteflexion	0,62 (± 0,70)	<b>&lt; 0,001</b>
	Retroflexion	0,80 (± 1,01)	<b>&lt; 0,001</b>

Im Anschluss wurden die Altersgruppen nach der Nystagmusaktivität in den zervikotonischen Provokationspositionen durch Kopfauslenkung in der 3D-HDT-Methode verglichen. Die Einzelpositionen wurden zur Veranschaulichung und besseren Darstellung zu Kombinationspositionen Flexion und Kippung zusammengefasst. Außerdem wurden alle Positionen insgesamt betrachtet und ein Vergleich angestellt. Es fällt auf, dass die Ergebnisse der Altersgruppen in einigen Positionen signifikant voneinander abweichen.

Insgesamt unterschieden sich die Probandengruppen in der vertikalen Dimension, nicht jedoch in der horizontalen Dimension, hinsichtlich der Nystagmusaktivität signifikant voneinander ( $p < 0,001$ ). Die älteren Probanden zeigten nach Kippung ( $p = 0,004$ ) und Flexion ( $p = 0,002$ ) des Kopfes in der vertikalen Dimension signifikant mehr Nystagmen, als die jüngere Probandengruppe.

Beim Vergleichen der Häufigkeiten präsentierten die alten Probanden in der Kippung zu 58 % eine Vertikalnystagmusaktivität wohingegen die jungen Probanden nur zu 26 % eine Aktivität präsentierten. Für die Flexion stellt sich dies bei den alten Probanden mit 68 %, bei den jungen Probanden mit 34 % dar. Die signifikanten Unterschiede zwischen den Altersgruppen sind in Abbildung 25 graphisch veranschaulicht.

## Ergebnisse

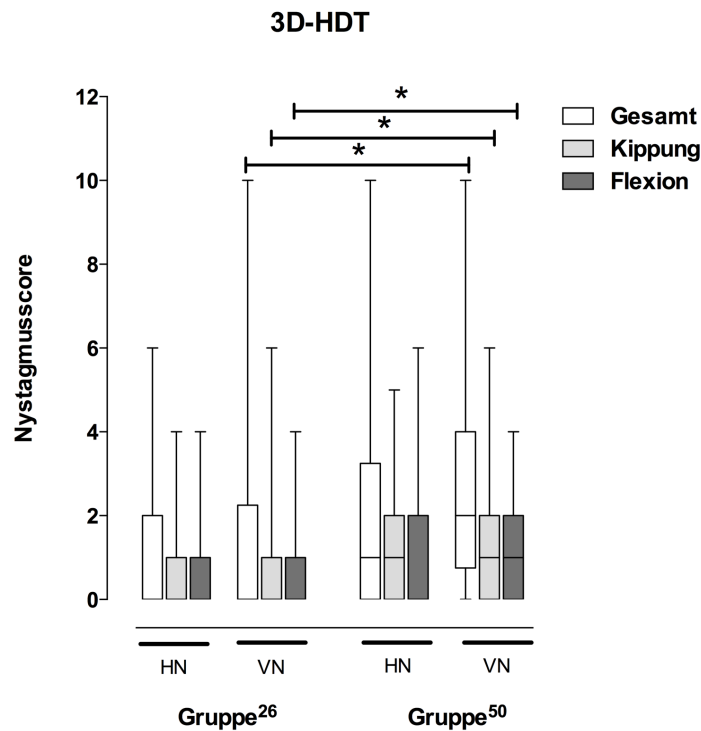


Abbildung 25: Darstellung des Altersgruppenvergleichs mittels 3D-HDT-Methode in den zervikalen Provokationspositionen Gesamt, Flexion und Kippung anhand des Scoresystems

Die Provokationsnystagmen im 3D-HDT mit „Punctum mobile: Kopf“ im Altersgruppenvergleich (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>), mit dem U-Test nach Mann-Whitney für unverbundene Stichproben überprüft; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (horizontal und vertikal) ein Score für Gesamt von 12 Punkten (Kippung, Flexion je 6 Punkte) zu erreichen; Legende: Gruppe<sup>26</sup>= 18. - 39. Lebensjahr; Gruppe<sup>50</sup>= 40. - 66. Lebensjahr; HN= Horizontalnystagmus; VN= Vertikalnystagmus; Gesamt= Summe der Nystagmen aus Kippung und Flexion; Flexion= Summe aus Ante- und Retroflexion; Kippung= Summe aus Rechts- und Linkskippung; \*= Gesamt vertikal  $p < 0,001$ ; Kippung vertikal  $p = 0,004$ ; Flexion vertikal  $p = 0,002$

### 4.2.1.3 Der Vertikalnystagmus

Eruiert man das Auftreten von Vertikal- und Horizontalnystagmen insgesamt, fällt auf, dass innerhalb der Methode keine signifikanten Unterschiede in der Häufigkeit zu verzeichnen waren. Es war folglich in den zervikalen Provokationspositionen Kippung, Flexion und Torsion eine approximativ gleiche Verteilung von vertikalen und horizontalen Nystagmen in der 3D-HDT-Methode vorzufinden.

Gegenstand unserer Untersuchungen war ferner, ob ein Unterschied in der Häufigkeit des Auftretens einer Schlagrichtung, Upbeat- bzw. Downbeat-Nystagmus, innerhalb des Vertikalnystagmus zu verzeichnen war. Innerhalb des Vertikalnystagmus zeigte sich ein signifikant häufigeres Auftreten von Upbeat-Nystagmen (UBN) im Vergleich zu

## Ergebnisse

Downbeat-Nystagmen (DBN) in allen zervikalen Provokationspositionen der 3D-HDT-Methode ( $p \leq 0,001$ ), siehe Tabelle 16.

Tabelle 16: Darstellung der Häufigkeiten horizontaler und vertikaler (Upbeat- und Downbeat-) Nystagmen in den verschiedenen zervikalen Provokationspositionen mit der 3D-HDT-Methode

Nystagmusdimension	3D-HDT-Methode	
	Kopfflexion	Kopfkipfung
Horizontal	33	44
Vertikal	52	42
- Upbeat	38	32
- Downbeat	14	10

Es wird ein Zusammenhang des Vertikalnystagmus, insbesondere des Upbeat-Nystagmus (UBN), und einer Störung der zervikalen Afferenz in Vorstudien vermutet<sup>26</sup>. Da durch Provokation in der 3D-HDT-Methode u.a. eine signifikante Modulation der Baseline des Vertikalnystagmus beobachtet wurde, soll auch im Altersgruppenvergleich darauf eingegangen werden. Insgesamt war der UBN häufiger als der DBN aufgetreten. Da bei den Probanden mit höherem Altersmedian (Md= 50) ein zervikales Defizit vermutet wurde, sollte nun überprüft werden, ob bei diesen signifikant mehr UBN als in Gruppe<sup>26</sup> ableitbar waren.

Die beiden Alterskollektive unterschieden sich in der 3D-HDT-Methode durch Kopfauslenkung jedoch nur in der medianen Häufigkeit des Auftretens von Downbeat-Nystagmen (DBN). Die Probanden der Gruppe<sup>50</sup> zeigten signifikant mehr DBN als Gruppe<sup>26</sup> (Signifikanzen siehe Abbildungen 26 und 27).

## Ergebnisse

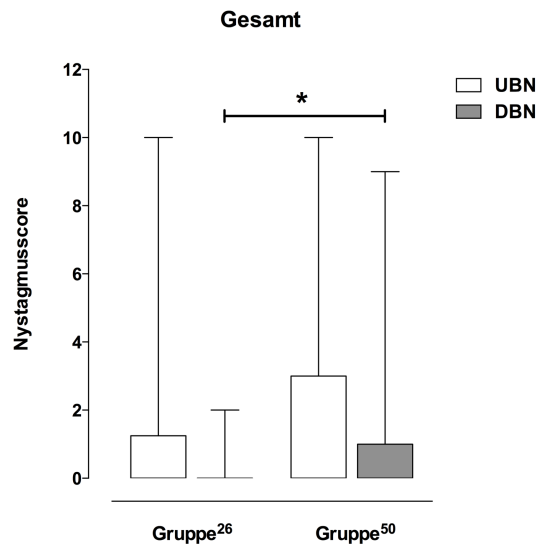


Abbildung 26: Altersgruppenvergleich der UBN und DBN der 3D-HDT-Methode

Die UBN und DBN im 3D-HDT mit „Punctum mobile: Kopf“ im Altersgruppenvergleich (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>), mit dem U-Test nach Mann-Whitney für unverbundene Stichproben überprüft; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (DBN und UBN) ein Score von 12 Punkten zu erreichen; Legende: Gruppe<sup>26</sup> = 18. - 39. Lebensjahr; Gruppe<sup>50</sup> = 40. - 66. Lebensjahr; Gesamt = Summe der Nystagmen aus Kippung und Flexion; UBN = Upbeat-Nystagmus, DBN = Downbeat-Nystagmus; \* = Gesamt  $p < 0,001$

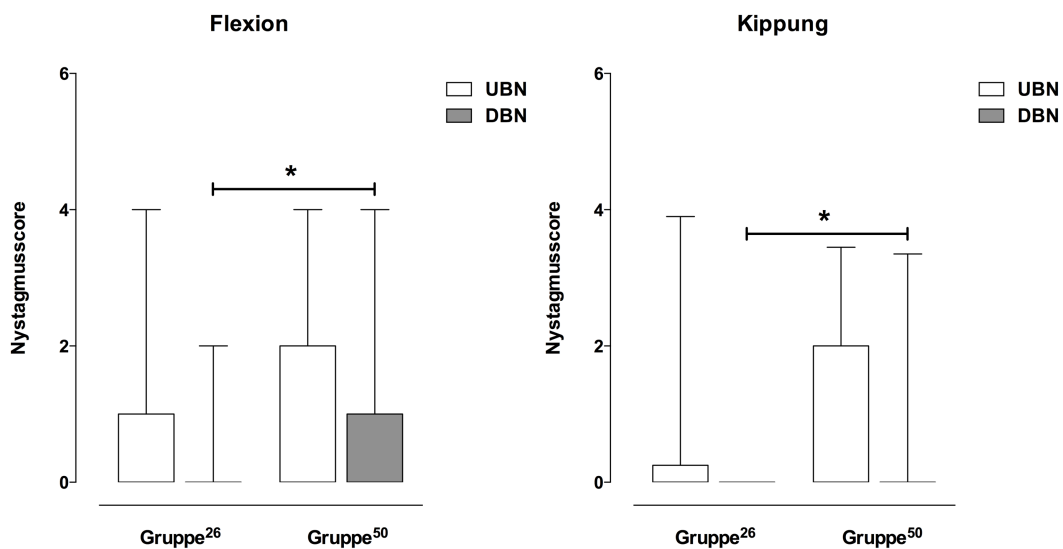


Abbildung 27: Altersgruppenvergleich der UBN und DBN der 3D-HDT-Methode in den Positionen Kopfflexion und Kopfkippung

Die UBN und DBN im 3D-HDT mit „Punctum mobile: Kopf“ im Altersgruppenvergleich (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>), mit dem U-Test nach Mann-Whitney für unverbundene Stichproben überprüft; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (DBN und UBN) ein Score für Kippung und Flexion von je 6 Punkten zu erreichen; Legende: Gruppe<sup>26</sup> = 18. - 39. Lebensjahr; Gruppe<sup>50</sup> = 40. - 66. Lebensjahr; Flexion = Summe aus Ante- und Retroflexion; Kippung = Summe aus Rechts- und Linkskippung; UBN = Upbeat-Nystagmus, DBN = Downbeat-Nystagmus; \* = Flexion DBN  $p < 0,001$ ; Kippung DBN  $p = 0,013$

### **4.2.2 Schwerkraftunabhängige zervikotonische Provokation**

Es folgt die Darstellung der erhobenen Ergebnisse durch Rumpfauslenkung mithilfe der 3D-RES-Methode. Es wurde der Frage nachgegangen, ob im 3D-RES durch zervikale Provokation eine Nystagmusmodulation im Vergleich zur Baseline ableitbar würde.

#### **4.2.2.1 Das Gesamtkollektiv**

Bei 100 Probanden wiesen insgesamt 48 % absolut keine Nystagmusaktivität in Ruhe sowie den zervikalen Provokationspositionen Flexion (Ante- und Retroflexion) oder Kippung (Rechts- und Linkskippung) auf. Die Torsion miteinbezogen zeigten sich bei 36 % der Probanden keinerlei Veränderungen der Nystagmusaktivität. Die Torsion wurde gesondert betrachtet, da sie nur in der 3D-RES-Methode durchgeführt wurde. In 52 % der Fälle trat folglich eine Nystagmussteigerung in mindestens einer Provokationsposition im 3D-Rumpfflexionsstuhl auf.

Im Gesamtkollektiv konnte weder in horizontaler noch in vertikaler Dimension ein signifikanter Anstieg der Nystagmusaktivität vom Score der Baseline (SPN) zum Score der Rumpfflexion und -kippung abgeleitet werden. In der Rumpftorsion nach links trat bei 15 % der Probanden (n= 100) eine Steigerung der horizontalen Nystagmusaktivität im Verhältnis zum SPN auf. In 19 % der Probanden zeigte sich eine Modulation der Rumpftorsion nach rechts (Tab. 17).

Da im Gesamtkollektiv nur in der tonischen Rumpftorsion eine signifikante horizontale Nystagmusmodulation von SPN zu CPN abgeleitet werden konnte, wurde auf eine weitere Analyse zum Vertikalnystagmus verzichtet.



## Ergebnisse

Tabelle 17: Statistische Kennwerte der 3D-RES-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Rumpfauslenkung bei Probanden anhand des Scoresystems

Die Provokationsnystagmen im 3D-RES mit „Punctum mobile: Rumpf“ bei allen Probanden (n= 100) im Vergleich zur Baseline, mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben überprüft; Legende: SPN= Spontan-nystagmus; CPN= Zervikotonischer Provokationsnystagmus, M= Mittelwert; SD= Standardabweichung

Baseline (SPN) vor Provokation	3D-RES-Methode Rumpfhaltungenpositionen	CPN während Provokation	
		M (SD)	p-Wert
Horizontalnystagmus (M= 0,12; SD= 0,33)	Linkskippung	0,15 (± 0,50)	0,584
	Rechtskipfung	0,19 (± 0,51)	0,184
	Anteflexion	0,16 (± 0,47)	0,378
	Retroflexion	0,18 (± 0,46)	0,267
	Torsion rechts	0,29 (± 0,61)	<b>0,009</b>
	Torsion links	0,29 (± 0,72)	<b>0,017</b>
Vertikalnystagmus (M= 0,16; SD= 0,37)	Linkskippung	0,23 (± 0,57)	0,172
	Rechtskipfung	0,21 (± 0,56)	0,301
	Anteflexion	0,15 (± 0,39)	1,000
	Retroflexion	0,20 (± 0,49)	0,395
	Torsion rechts	0,26 (± 0,54)	0,079
	Torsion links	0,24 (± 0,55)	0,131

### 4.2.2.2 Die Altersgruppen

Der Nystagmuscore in den zervikotonischen Provokationspositionen (CPN) in der 3D-RES-Methode im Vergleich zur Baseline (SPN) wurde außerdem für die Altersgruppen getrennt betrachtet (siehe Tab. 18 und 19). 27 Probanden der Gruppe<sup>26</sup> (n= 50) und 21 Probanden der Gruppe<sup>50</sup> (n= 50) von insgesamt 100 zeigten absolut keine Nystagmusaktivität in der Baseline oder den Provokationspositionen (Rumpfflexion und Rumpfkippung).

## Ergebnisse

Tabelle 18: Statistische Kennwerte der 3D-RES-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Rumpfauslenkung der Gruppe<sup>26</sup> anhand des Scoresystems

Die Provokationsnystagmen im 3D-RES mit „Punctum mobile: Rumpf“ bei Probanden der Gruppe<sup>26</sup> (n= 50) im Vergleich zur Baseline, mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben überprüft; Legende: SPN= Spontannystagmus; CPN= Zervikotonischer Provokationsnystagmus, M= Mittelwert; SD= Standardabweichung; Gruppe<sup>26</sup> = 18. - 39. Lebensjahr

Baseline (SPN) vor Provokation	3D-RES-Methode Rumpfhaltungenpositionen	CPN während Provokation	
		M (SD)	p-Wert
Horizontalnystagmus (M= 0,10; SD= 0,31)	Linkskippung	0,10 (± 0,36)	1,000
	Rechtskipfung	0,16 (± 0,47)	0,563
	Anteflexion	0,18 (± 0,48)	0,313
	Retroflexion	0,20 (± 0,45)	0,180
	Torsion rechts	0,36 (± 0,69)	<b>0,010</b>
	Torsion links	0,34 (± 0,80)	<b>0,037</b>
Vertikalnystagmus (M= 0,18; SD= 0,39)	Linkskippung	0,34 (± 0,69)	<b>0,031</b>
	Rechtskipfung	0,36 (± 0,72)	<b>0,047</b>
	Anteflexion	0,22 (± 0,47)	0,750
	Retroflexion	0,26 (± 0,57)	0,250
	Torsion rechts	0,30 (± 0,58)	0,148
	Torsion links	0,26 (± 0,60)	0,398

Es wurde außerdem beobachtet, dass bei den Probanden der Gruppe<sup>50</sup> insgesamt in keiner Messung eine signifikante Veränderung der Nystagmusaktivität zu ermitteln war (Tab.19).

Im Gegensatz dazu trat in 12 % der Gruppe<sup>26</sup> (n= 50) eine knapp signifikante Steigerung der vertikalen Nystagmusaktivität in der Rumpfkippung nach links auf. Außerdem zeigten die Gruppe<sup>26</sup> eine signifikante Steigerung der horizontalen Nystagmusaktivität in der Rumpftorsion nach rechts bei 24 % und nach links bei 18 % der Fälle (n= 50), siehe Tabelle 18.

## Ergebnisse

Tabelle 19: Statistische Kennwerte der 3D-RES-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Rumpfauslenkung der Gruppe<sup>50</sup> anhand des Scoresystems

Die Provokationsnystagmen im 3D-RES mit „Punctum mobile: Rumpf“ bei Probanden der Gruppe<sup>50</sup> (n= 50) im Vergleich zur Baseline, mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben überprüft; Legende: SPN= Spontan-nystagmus; CPN= Zervikotonischer Provokationsnystagmus, M= Mittelwert; SD= Standardabweichung; Gruppe<sup>50</sup> = 40. - 66. Lebensjahr

Baseline (SPN) vor Provokation	3D-RES-Methode Rumpfhaltungenpositionen	CPN während Provokation	
		M (SD)	p-Wert
Horizontalnystagmus (M= 0,14; SD= 0,35)	Linkskippung	0,20 (± 0,60)	0,540
	Rechtskipfung	0,22 (± 0,55)	0,367
	Anteflexion	0,14 (± 0,45)	0,877
	Retroflexion	0,16 (± 0,47)	0,734
	Torsion rechts	0,22 (± 0,51)	0,367
	Torsion links	0,24 (± 0,63)	0,257
Vertikalnystagmus (M= 0,14; SD= 0,35)	Linkskippung	0,12 (± 0,39)	1,000
	Rechtskipfung	0,06 (± 0,24)	0,344
	Anteflexion	0,08 (± 0,27)	0,549
	Retroflexion	0,14 (± 0,41)	1,000
	Torsion rechts	0,22 (± 0,51)	0,381
	Torsion links	0,22 (± 0,51)	0,354

Ferner stellten wir die Altersgruppen hinsichtlich ihrer Nystagmusaktivität einander gegenüber. Wie bereits im Altersgruppenvergleich in der 3D-HDT-Methode beschrieben, wurden auch hier die Einzelpositionen zu den Kombinationspositionen Rumpfkippung, Rumpfflexion und Rumpftorsion zusammengefasst. Außerdem wurden die Positionen insgesamt betrachtet und ein Vergleich angestellt.

Signifikant voneinander abweichende Nystagmuscores der 3D-RES-Methode waren, wie nach Betrachtung der Signifikanzen im vorherigen Abschnitt zu erwarten, im Vergleich der Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) nicht zu verifizieren (Abb. 28).

Da durch zervikale Provokationshaltung durch Rumpfflexion in der 3D-RES-Methode keine signifikante Modulation der Baseline des Vertikalnystagmus feststellbar war, wurde auf den Altersgruppenvergleich zwischen UBN und DBN verzichtet.

## Ergebnisse

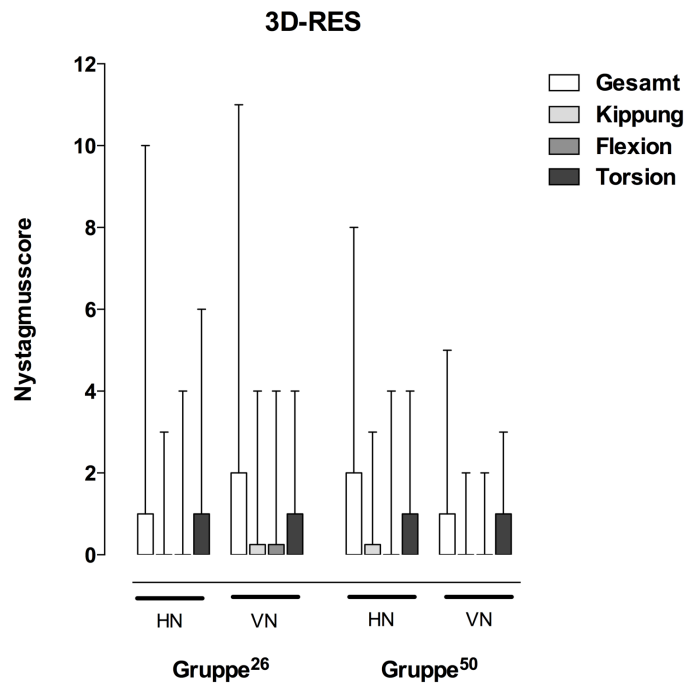


Abbildung 28: Darstellung des Altersgruppenvergleichs mittels 3D-RES-Methode in den Positionen Gesamt, Flexion, Kippung und Torsion anhand des Scoresystems

Die Provokationsnystagmen im 3D-RES mit „Punctum mobile: Rumpf“ im Altersgruppenvergleich (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>), mit dem U-Test nach Mann-Whitney für unverbundene Stichproben überprüft; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (horizontal und vertikal) ein Score für Gesamt von 18 Punkten (Kippung, Flexion, Torsion je 6 Punkte) zu erreichen; Legende: Gruppe<sup>26</sup>= 18. - 39. Lebensjahr; Gruppe<sup>50</sup>= 40. - 66. Lebensjahr; HN= Horizontalnystagmus; VN= Vertikalnystagmus; Gesamt= Summe der Nystagmen aus Kippung und Flexion; Flexion= Summe aus Ante- und Retroflexion; Kippung= Summe aus Rechts- und Linkskippung; Torsion= Summe aus Rechts- und Linkstorsion

### 4.3 Analyse des Schwerkrafteffekts auf die Nystagmusmodulation

Um den Einfluss der Schwerkraft auf den vestibulären Apparat zu überprüfen wurde die Nystagmusaktivität während einer, durch Kopfauslenkung, veränderten Kopf-Raum-Beziehung im 3D-HDT mit einer, durch Rumpfauslenkung, stabil gehaltenen Kopf-Raum-Beziehung im 3D-RES verglichen.

Es hatte sich bereits im Vergleich des zervikotonischen Provokationsnystagmus zum Spontannystagmus (Kapitel 4.2) eine methodenspezifische Nystagmusmodulation gezeigt. Im folgenden Methodenvergleich sollte kontrolliert werden ob dieser Unterschied sich als signifikant erwies. Hierfür wurden die 3D-HDT-Methode und die 3D-RES-Methode systematisch nach einer Differenz der Nystagmusaktivität hin untersucht. Dabei wurden die zervikalen Provokationspositionen Kopfkippung versus Rumpfkippung, Kopf- versus Rumpfflexion sowie der Gesamtscore in der

## Ergebnisse

horizontalen und vertikalen Nystagmusdimension verglichen. Die Torsion wurde aufgrund ihrer einmaligen Durchführung folglich nicht aufgeführt. Zudem wurden beide Altersgruppen betrachtet um einen möglichen Alterseffekt zu erfassen. Die signifikanten Unterschiede sind graphisch in Boxplots dargestellt.

### 4.3.1 Das Gesamtkollektiv

Betrachtet man die Horizontalnystagmusmodulation während der zervikotonischen Provokation „Gesamt“ fanden sich in 42 % der Probanden (n= 100) eine signifikant höhere Nystagmusaktivität in der 3D-HDT-Methode im Vergleich zur 3D-RES-Methode ( $p < 0,001$ ). Der Vertikalnystagmuscore „Gesamt“ war in 47 % der Fälle in der 3D-HDT-Methode höher ( $p < 0,001$ ), siehe Abb. 29.

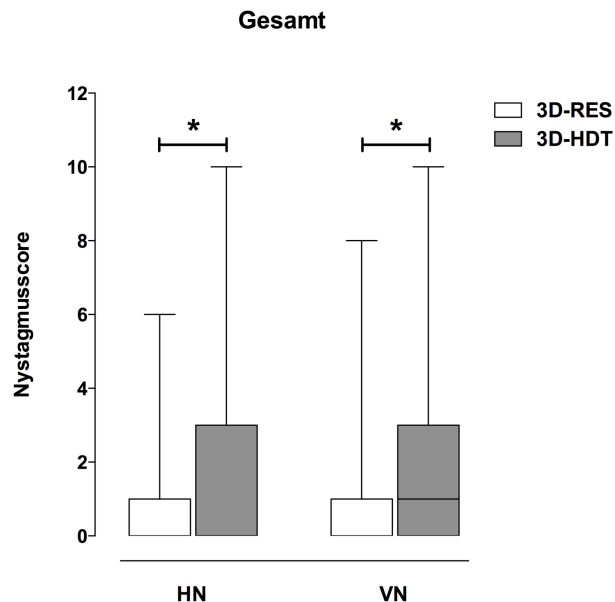


Abbildung 29: Darstellung des Methodenvergleichs „Gesamt“ anhand des Scoresystems

*Der Methodenvergleich im Sinne des Differenzvergleichs der Provokationsnystagmen in der 3D-HDT-Methode (Punctum mobile: Kopf) und der 3D-RES-Methode (Punctum mobile: Rumpf), mithilfe des Wilcoxon Tests für verbundene Stichproben durchgeführt; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (horizontal und vertikal) ein Score von 12 Punkten zu erreichen; Enthalten in diesem Score sind alle Probanden (n= 100); Legende: HN= Horizontalnystagmus; VN= Vertikalnystagmus; Gesamt= Summe der Nystagmen in Kippung und Flexion; \*= HN und VN Gesamt  $p \leq 0,001$*

Ferner wurden die Positionen Kippung und Flexion separat betrachtet, um weitere Rückschlüsse auf die Signifikanzen zu ziehen.

Beim Vergleich der Nystagmusaktivität in der horizontalen Dimension fiel auf:

## Ergebnisse

Bei 35 % der Probanden (n= 100) war in der Kippung in der 3D-HDT-Methode (Kopfkippung) gegenüber der 3D-RES-Methode (Rumpfkippung) ein gesteigerte Nystagmusaktivität abzuleiten. Dieser Unterschied zwischen den Methoden ist signifikant ( $p < 0,001$ ). In der Flexion fand sich ebenfalls ein signifikanter Aktivitätsunterschied ( $p < 0,001$ ) zwischen den Methoden. In der 3D-HDT-Methode war hier bei 27 von 100 Probanden ein deutlich höherer Nystagmuscore als in der 3D-RES-Methode zu verzeichnen.

Für den vertikalen Provokationsnystagmus zeigte sich ein ähnliches Bild. Hier wiesen 35 % der Probanden in der Kopfkippung in der 3D-HDT-Methode mehr Nystagmen als in der Rumpfkippung in der 3D-RES-Methode auf ( $p = 0,001$ ). In der Flexion war der Unterschied mit 43 % besonders stark ausgeprägt ( $p < 0,001$ ). Die Signifikanzen sind in Abbildung 30 dargestellt.

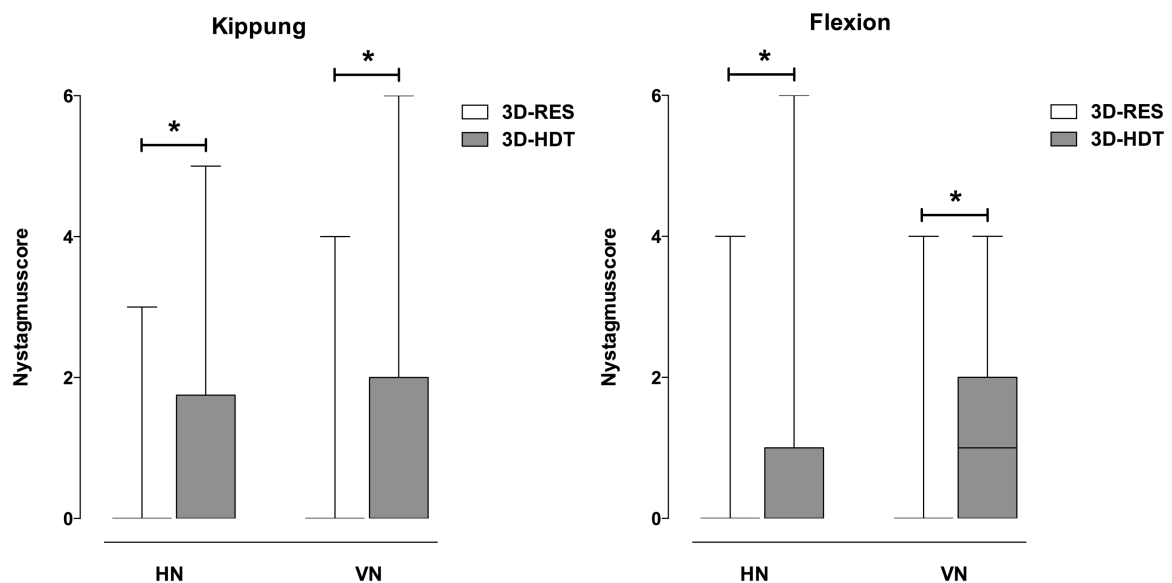


Abbildung 30: Darstellung des Methodenvergleichs in den Positionen „Kippung“ und „Flexion“ anhand des Scoresystems

*Der Methodenvergleich im Sinne des Differenzvergleichs der Provokationsnystagmen in der 3D-HDT-Methode (Punctum mobile: Kopf) und in der 3D-RES-Methode (Punctum mobile: Rumpf), mithilfe des Wilcoxon Tests für verbundene Stichproben durchgeführt; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (horizontal und vertikal) ein Score für Kippung und Flexion von je 6 Punkten zu erreichen; Enthalten in diesem Score sind alle Probanden (n= 100); Legende: HN= Horizontalnystagmus; VN= Vertikalnystagmus; Kippung= Summe der Rechts- und Linkskippung; Flexion= Summe der Ante- und Retroflexion; \* =  $p \leq 0,001$*

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die gemessenen Parameter bezogen auf die Methoden einen statistisch signifikanten Unterschied aufwiesen. Bei verändertem

## Ergebnisse

Schwerkraftvektor in der 3D-HDT-Methode war anhand der Scorepunkte eine signifikant stärkere Nystagmusmodulation zu beobachten, als mit der 3D-RES-Methode.

### 4.3.2 Die Altersgruppen

Der Methodenvergleich wurde ebenfalls nach den beiden Altersgruppen getrennt betrachtet. Es sollte beurteilt werden, ob eine der beiden Gruppen (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) maßgeblich an dem Methodenunterschied beteiligt war.

Bei Probanden der Gruppe<sup>26</sup> (n= 50) fand sich insgesamt in der horizontalen Nystagmusaktivität ein signifikanter Unterschied zwischen den Untersuchungsmethoden (p= 0,009). 34 % der Probanden (n= 50) zeigten hier insgesamt eine stärkere Nystagmusaktivität in der 3D-HDT-Methode (Abb. 31).

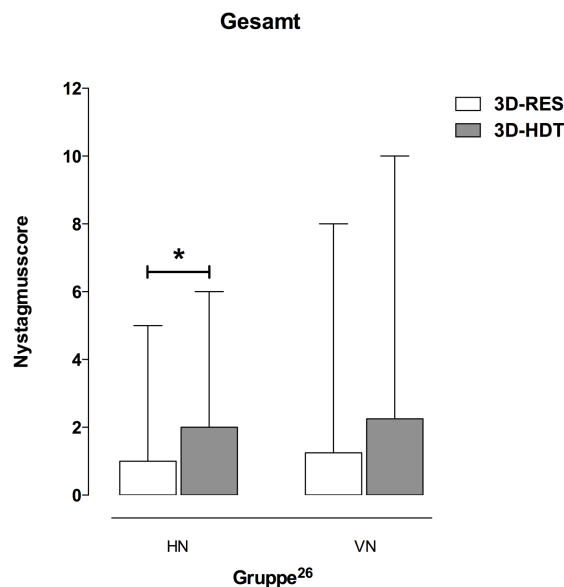


Abbildung 31: Darstellung des Methodenvergleichs „Gesamt“ bei Gruppe<sup>26</sup> anhand des Scoresystems

*Der Methodenvergleich im Sinne des Differenzvergleichs der Provokationsnystagmen in der 3D-HDT-Methode (Punctum mobile: Kopf) und der 3D-RES-Methode (Punctum mobile: Rumpf), mithilfe des Wilcoxon Tests für verbundene Stichproben durchgeführt; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (horizontal und vertikal) ein Score von 12 Punkten zu erreichen; Enthalten in diesem Score sind die Probanden der Gruppe<sup>26</sup> (n= 50); Legende: Gruppe<sup>26</sup>= 18. - 39. Lebensjahr; HN= Horizontalnystagmus; VN= Vertikalnystagmus; Gesamt= Summe der Nystagmen in Kippung und Flexion; \*= HN Gesamt p< 0,009*

## Ergebnisse

Betrachtet man die Positionen Kippung und Flexion getrennt fällt auf, dass die Kippung bei 26 % der Fälle signifikant in der 3D-HDT-Methode von der 3D-RES-Methode verschieden war ( $p=0,006$ ). Die Flexion hingegen wies keine signifikante Abweichung des Scores der Nystagmusaktivität zwischen den Methoden auf ( $p=0,233$ ), siehe Abbildung 32. In der vertikalen Nystagmusdimension fand sich in Gruppe<sup>26</sup> insgesamt keine signifikante Modulation der Nystagmusaktivität ( $p=0,665$ ). Betrachtet man die Kippung bestätigt sich dies ( $p=0,455$ ), gleiches fand sich in der Flexion ( $p=0,169$ ), siehe Abbildung 32.

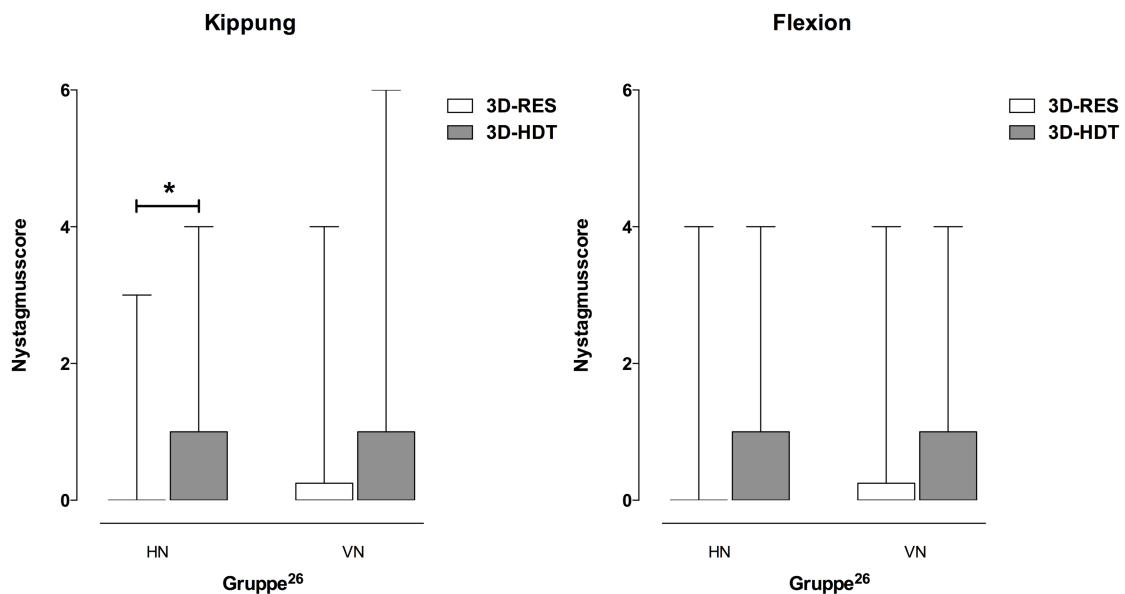


Abbildung 32: Darstellung des Methodenvergleichs in den Positionen „Kippung“ und „Flexion“ bei Gruppe<sup>26</sup> anhand des Scoresystems

*Der Methodenvergleich im Sinne des Differenzvergleichs der Provokationsnystagmen in der 3D-HDT-Methode (Punctum mobile: Kopf) und der 3D-RES-Methode (Punctum mobile: Rumpf), mithilfe des Wilcoxon Tests für verbundene Stichproben durchgeführt; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (horizontal und vertikal) ein Score für Kippung und Flexion von je 6 Punkten zu erreichen; Enthalten in diesem Score sind die Probanden der Gruppe<sup>26</sup> ( $n=50$ ); Legende: Gruppe<sup>26</sup> = 18. - 39. Lebensjahr; HN= Horizontalnystagmus; VN= Vertikalnystagmus; Kippung= Summe der Rechts- und Linkskippung; Flexion= Summe der Ante- und Retroflexion; \* =  $p < 0,006$*

Es fiel auf, dass die Gruppe<sup>26</sup> in 54 % der Fälle in der horizontalen und in 60 % der Fälle in der vertikalen Dimension keine Modulation der Provokationsnystagmusaktivität zwischen den beiden Messmethoden aufwies. Dieses Phänomen ist durch eine hohe Zahl an Bindungen zu erklären. In Gruppe<sup>50</sup> hingegen lag die Zahl der Bindungen in der horizontalen bei nur 40 % und der vertikalen Dimension nur 22 %.



## Ergebnisse

Im Vergleich dazu zeigte die Gruppe<sup>50</sup> (n= 50) in der Modulation der Nystagmusaktivität im Methodenvergleich einen in 50 % der Fälle signifikant höheren Gesamt-Score in der 3D-HDT-Methode vs. 3D-RES-Methode in der horizontalen (p< 0,001) und sogar 72 % der Fälle in der vertikalen (p< 0,001) Dimension (Abb. 33).

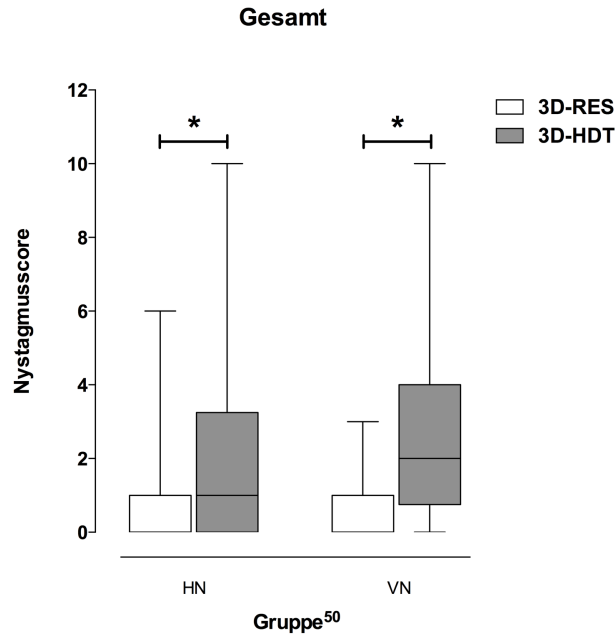


Abbildung 33: Darstellung des Methodenvergleichs „Gesamt“ bei Gruppe<sup>50</sup> anhand des Scoresystems

*Der Methodenvergleich im Sinne des Differenzvergleichs der Provokationsnystagmen in der 3D-HDT-Methode (Punctum mobile: Kopf) und der 3D-RES-Methode (Punctum mobile: Rumpf), mithilfe des Wilcoxon Tests für verbundene Stichproben durchgeführt; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (horizontal und vertikal) ein Score von 12 Punkten zu erreichen; Enthalten in diesem Score sind die Probanden der Gruppe<sup>50</sup> (n= 50); Legende: Gruppe<sup>50</sup>= 40. - 66. Lebensjahr; HN= Horizontalnystagmus; VN= Vertikalnystagmus; Gesamt= Summe der Nystagmen in Kippung und Flexion; \*= p< 0,001*

Überdies ließ sich feststellen, dass Kippung und Flexion die signifikante Provokationsmodulation ausmachten (Abb. 34). Dies galt für die horizontale und die vertikale Nystagmusdimension.

Genauer betrachtet bedeutet dies unter deskriptiven Gesichtspunkten eine Modulation des Horizontalnystagmus-Scores in der Kippung mit der 3D-HDT-Methode (durch Kopfauslenkung) in 44 % der Fälle (n= 50) gegenüber der 3D-RES-Methode (durch Rumpfauslenkung) bei gleichen Kopf-zu-Rumpf Winkeln (p< 0,001). In der Analyse der Flexion bedeutet dies respektive in 34 % der Fälle (p< 0,001).

## Ergebnisse

Für den Vertikalnystagmus fand sich bei Gruppe<sup>50</sup> in der Kippung in 28 % ( $p < 0,001$ ) und in der Flexion respektive 32 % ( $p < 0,001$ ) eine stärkere Nystagmusaktivität in der 3D-HDT-Methode gegenüber der 3D-RES-Methode.

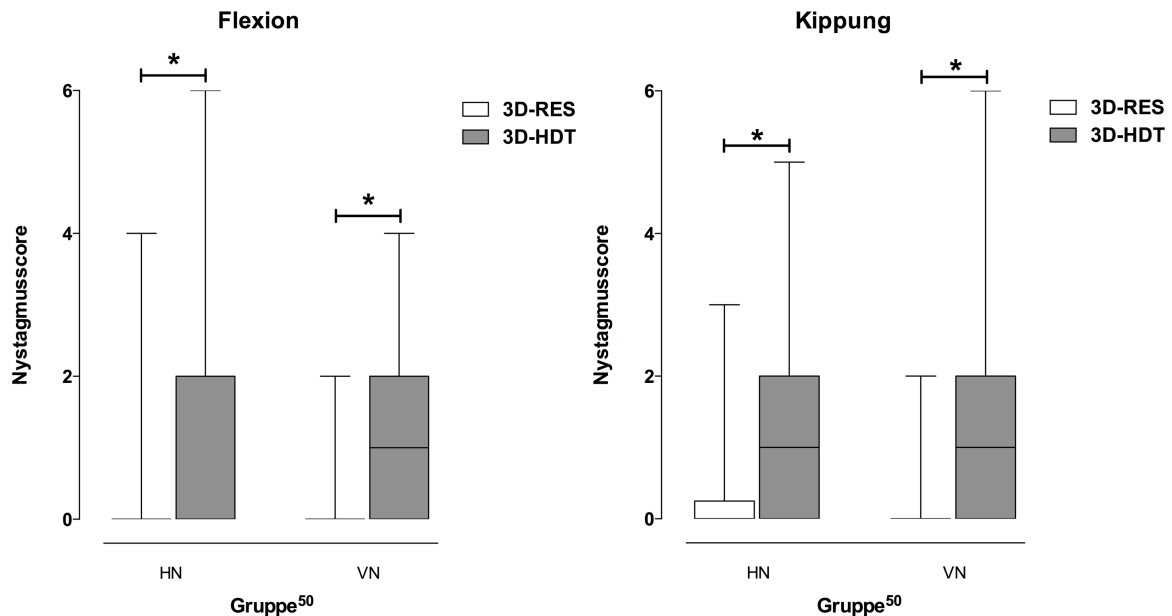


Abbildung 34: Darstellung des Methodenvergleichs in den Positionen „Flexion“ und „Kippung“ bei Gruppe<sup>50</sup> anhand des Scoresystems

Der Methodenvergleich im Sinne des Differenzvergleichs der Provokationsnystagmen in der 3D-HDT-Methode (Punctum mobile: Kopf) und der 3D-RES-Methode (Punctum mobile: Rumpf), mithilfe des Wilcoxon Tests für verbundene Stichproben durchgeführt; Ergebniserfassung gemäß dem Auswertungsmodell anhand des Nystagmuscores: Maximal war je Proband und je Nystagmusdimension (horizontal und vertikal) ein Score für Kippung und Flexion von je 6 Punkten zu erreichen; Enthalten in diesem Score sind die Probanden der Gruppe<sup>50</sup> ( $n = 50$ ); Legende: Gruppe<sup>50</sup> = 40. - 66. Lebensjahr; HN= Horizontalnystagmus; VN= Vertikalnystagmus; Kippung= Summe der Rechts- und Linkskippung; Flexion= Summe der Ante- und Retroflexion; \* =  $p < 0,001$

Für die Probanden der Gruppe<sup>50</sup> konnten im Vergleich zu jenen der Gruppe<sup>26</sup> weniger Bindungen der Nystagmusaktivität im Vergleich der beiden Methoden identifiziert werden. Folglich schien der Nystagmus im alten Kollektiv leichter durch eine Technik modulierbar, während die jungen Probanden in ihrem Ergebnis stabil blieben.

### 4.4 Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität

Die dynamische Untersuchung der kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität (KKS) wurde durch die Messung der subjektiven Nullposition mithilfe des 3D-RES durchgeführt. Während der passiven Rückföhrbewegung des Probanden sollte dieser das subjektive Erreichen der Nullposition signalisieren. Der Abweichwinkel zur objektiven Nullposition wurde daraufhin notiert.

### 4.4.1 Das Gesamtkollektiv

Beim Vergleich aller subjektiven Nullpositionen wurde eine Normalverteilung der Gruppen festgestellt. Im Mittel verfehlte das Gesamtkollektiv ( $n=100$ ) die reelle Nullposition um  $7,75^\circ$  bei einer Standardabweichung (SD) von  $3,28^\circ$ . In der Flexion wurde die Null im Mittel um  $6^\circ$  (SD  $3,8^\circ$ ), in der Kippung um  $6^\circ$  (SD  $4,2^\circ$ ) und in der Torsion um  $10,35^\circ$  (SD  $7,0^\circ$ ) verfehlt. Diese Abweichungen sind mittels t-Test für eine Stichprobe gegen Null in allen Positionen „gefühlte Nullstellung“ signifikant von null verschieden ( $p < 0,001$ ).

### 4.4.2 Die Altersgruppen

Die beiden Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) wurden ebenfalls statistisch nach einer Differenz der Abweichungswinkel hin verglichen. Die Verteilung des aus den 6 Positionen gemittelten Bewegungsausmaßes wurde zusammengefasst. Im Mittel verfehlten Probanden der Gruppe<sup>26</sup> die Null um  $7,7^\circ$  (SD  $3,5^\circ$ ), der Gruppe<sup>50</sup> um  $7,8^\circ$  (SD  $3,1^\circ$ ). Somit wurde bei der Gruppe<sup>50</sup> eine um  $0,2^\circ$  höhere Abweichung festgestellt. Dieser Unterschied ist nicht signifikant, folglich wurde die Nullhypothese bestätigt.

Dies wurde nachfolgend auch für die einzelnen Positionen überprüft. Von Rumpfflexion, Rumpftorsion und Rumpfkippung war nur in der Flexion ein signifikanter Unterschied zwischen den Altersgruppen festzustellen ( $p=0,021$ ), siehe Abbildung 35.

In der Flexion verfehlten die Gruppe<sup>26</sup> die Null um  $5,1^\circ$  (SD  $3,3^\circ$ ), die Gruppe<sup>50</sup> um  $6,9^\circ$  (SD  $4,1^\circ$ ). In der Kippung zeigte sich hier mit  $6,5^\circ$  (SD  $3,5^\circ$ ) bei Gruppe<sup>26</sup> sowie  $7,4^\circ$  (SD  $4,8^\circ$ ) bei Gruppe<sup>50</sup> ein ähnliches Bild. In der Rumpftorsion verfehlten Gruppe<sup>26</sup> die Null um  $11,5^\circ$  (SD  $8^\circ$ ), Gruppe<sup>50</sup> um  $9,2^\circ$  (SD  $5,8^\circ$ ). Hier zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Altersgruppen.

## Ergebnisse

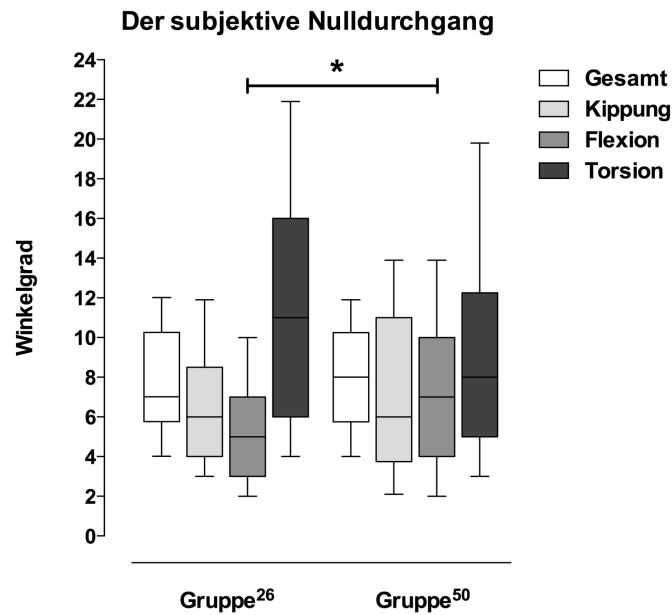


Abbildung 35: Der Altersgruppenvergleich im subjektiven Nulldurchgang der 3D-HDT-Methode  
Dargestellt ist die Abweichung der von den Probanden (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) angegebenen subjektiven Nullposition zur reellen Nullposition in Winkelgrad, mit dem t-Test für unverbundene Stichproben überprüft; Die Untersuchung wurde im dreidimensionalen Rumpfkursionsstuhl durchgeführt; Legende: Gruppe<sup>26</sup>= 18. - 39. Lebensjahr; Gruppe<sup>50</sup>= 40. - 66. Lebensjahr; Gesamt= Mittelwert der Winkelgrad aus Kippung, Flexion und Torsion; Flexion= Mittelwert aus Ante- und Retroflexion; Kippung= Mittelwert aus Rechts- und Linkskippung; Torsion= Mittelwert aus Rechts- und Linkstorsion; \*= Flexion  $p < 0,021$

## 5 Diskussion

### 5.1 Einführung

Die vorliegende Pilotstudie untersuchte an zwei vestibulär gesunden Altersgruppen die Effekte zervikaler Provokation auf das vestibuläre System. Hierzu haben wir eigens ein neues Untersuchungsinstrument, den dreidimensionalen Rumpfxursionsstuhl (3D-RES), entwickelt. Das Untersuchungskonzept der tonischen Rumpfauslenkung orientierte sich an dem der tonischen Kopfauslenkung im dreidimensionalen Halsdrehtest (3D-HDT). Im Ansatz beider Messmethoden wurde davon ausgegangen, dass die gehaltene Provokationsposition im kraniozervikalen Übergang zu einem Mismatch der verschiedenen Sensorinformationen auf Hirnstammebene führen könnte. Die in dieser 90 Sekunden gehaltenen, tonischen Phase der Auslenkung abgeleiteten Nystagmen wurden in Vorstudien mit der 3D-HDT-Methode somit als selektive Irritation des vestibulären Systems über die zervikalen Afferenzen interpretiert<sup>84</sup>. Als Zielparameter wurde der zervikotonische Provokationsnystagmus (CPN) definiert. Unsere Arbeitsgruppe überprüfte, ob durch die Verlagerung des Schwerkraftvektors bei Kopfauslenkung im Schwerfeld der Erde eine multimodale Rezeptorreizung, im Sinne einer Mitreizung des peripheren Vestibularorgans, provoziert wurde<sup>26</sup>. Da die Schwerkraft eine bislang unklare Störgröße bei der Ableitung des Zielparameters darstellte, wurden die 3D-HDT-Methode und die 3D-RES-Methode gegeneinander evaluiert. Mithilfe der 3D-RES-Methode sollten insbesondere die Otolithenorgane ohne adäquate Beschleunigung durch einen veränderten Schwerkraftvektor bleiben. So sollte mit letzter Sicherheit eine Interpretation unseres Zielparameters hinsichtlich seiner zervikalen Genese ermöglicht werden. Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität wurde dynamisch während der Rumpfrückführbewegung erstmalig im 3D-RES in allen Freiheitsgraden der Halswirbelsäule untersucht. Dieses Setting ermöglichte ebenfalls eine selektiv zervikale Analyse bezüglich des Altersgruppenunterschieds.

Nachstehend sollen die Resultate der Messungen im Einzelnen kritisch beleuchtet werden. Dabei werden die Ergebnisse der Nystagmusaktivitätsmodulation von Spontanaktivität zu zervikotonischer Provokationsposition in der jeweiligen Methode, des Altersgruppenvergleichs, der Nystagmusabhängigkeit von der Provokationsposition und des Methodenvergleichs zwischen der 3D-HDT-Methode und der 3D-RES-Methode

diskutiert. Des Weiteren wird das Augenmerk auf den Upbeat-Nystagmus des Vertikalnystagmus gelenkt, da dieser in eigenen Voruntersuchungen durch zervikotonische Provokation beeinflusst wurde<sup>84</sup>. Abschließend wird die Untersuchung der kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität anhand der Messung des subjektiven Nulldurchgangs der Kopfgelenke mithilfe der 3D-RES-Methode zur Diskussion gestellt.

## **5.2 Methodenkritik**

### **5.2.1 Diagnostische Voruntersuchungen**

Ziel der Voruntersuchungen war, neben der Erfassung der Ein- und Ausschlusskriterien, eine Vergleichbarkeit der Probanden und somit eine gute Ergebnisqualität zu gewährleisten.

#### **5.2.1.1 Die posturale Kontrolle**

Als Voruntersuchung zur Funktion der vestibulospinalen Bahnen führten wir den Romberg-Stehversuch und den Unterberger-Tretversuch durch.

Die klinische Forschung bedient sich der Posturographie, im Sinne eines Screeningtests, zur Evaluation und Therapie von Gleichgewichtsstörungen. Eine Störung der Stabilität kann Symptom eines Mismatches der sensorischen Afferenzen aus Vestibularorgan, visuellem System, zentralen Strukturen und der Propriozeption sein. Vom Durchschnitt abweichende verstärkte Schwankungen können allerdings auch bei Gesunden auftreten. Ursache kann zum Beispiel eine inhärente physiologische Standunruhe sein oder nach Alkoholkonsum vorkommen<sup>116</sup>. Laut Hülse et al. können intraindividuelle und interindividuelle Schwankungen teilweise stark variieren<sup>115</sup>. Diese Variabilität der Ergebnisse stellt laut Benvenuti et al. einen Nachteil für Test-Retest-Reliabilität der posturographischen Messung dar<sup>137</sup>. Es müssen daher weitere Untersuchungstools hinzugezogen werden um Haltung und Gleichgewicht sicher beurteilen zu können. Holmberg et al. fanden, dass auch somatoforme Störungen, wie der phobische posturale Schwankschwindel, zu pathologischen Messergebnissen führen<sup>117</sup>. Folglich lassen nicht nur organische Pathologien, sondern auch andere Einflüsse eine Veränderung von Schwankungsparametern zu.

In Messungen von Endo et al. konnten Simulanten von Patienten mittels PUG nach einem Schleudertrauma anhand ihrer Schwankungsmuster voneinander unterschieden werden<sup>85</sup>. Die Simulanten zeigten kleinere und schwächere Schwankungen, während

## Diskussion

die kranke Gruppe große, lange Schwankungsflächen aufwies. Dies könnte als Anhalt für die zervikale Beeinflussung des Gleichgewichtsempfindens mittels PUG gedeutet werden.

Kogler et al. konnten in einer Studie 32 Gesunde von 10 Patienten mit Nackenbeschwerden und assoziierten Defiziten der Balance anhand ihrer posturalen Stabilität bei bestimmten Nackenpositionen unterscheiden<sup>114</sup>. Außerdem wurden die Patienten in vier Altersgruppen eingeteilt. Alle Gruppen von Patienten schnitten bei der Performance signifikant schlechter ab, als die Gruppen des Kontrollkollektivs. Die einzelnen Altersgruppen des gesunden Kollektivs erbrachten die gleichen Leistungen. Außerdem wurde festgestellt, dass eine Rückneigung des Kopfes für alle Probanden die größte Herausforderung darstellte. Der Autor räumte ein, dass die Studie die Frage ob diese schlechteren Ergebnisse mit der Positionierung der Otolithen, den zentralen integrativen Funktionen oder den zervikalen propriozeptiven Afferenzen zusammenhängen nicht beantworten könne.

Untersuchungen von Woodhouse et al. aus dem Jahre 2010 konzentrierten sich auf die Stabilität des Kopfes bei isometrischen Flexionen des Nackens. Dazu verglich die Arbeitsgruppe Patienten nach Schleudertrauma (n= 59), Patienten mit Nackenbeschwerden ohne Trauma (n= 57) und ein gesundes Kontrollkollektiv (n= 57). Es wurde eine verringerte Stabilität in Assoziation mit Nackenschmerzen und Schwindel nach einem Trauma beobachtet<sup>138</sup>.

Laut Studien, u.a. von Aydog et al. aus dem Jahre 2006, ist im steigendem Alter durch verminderte Aktivität, Muskelmasse und kognitive Fähigkeiten mit erhöhter Sturzgefahr zu rechnen<sup>118</sup>. Training soll dem entgegenwirken können. Der dynamische Unterberger-Test des Gleichgewichtes wird laut Studien von Sportlern sicherer absolviert als von Nichtsportlern<sup>139</sup>. Lindemann et al. fanden anhand eines, auf motorische Geschicklichkeit programmiertes, Computer Balance-Trainingsprogramms bei seinem Kollektiv eine Verbesserung des Gleichgewichts<sup>140</sup>.

Die Überprüfung dieser posturalen Reflexe erschien anhand oben genannter Studien als Voruntersuchung von Relevanz. Erwartet wurde, dass die Probanden dieser Studie keine pathologischen Auffälligkeiten zeigten. Dies galt andernfalls als Ausschlusskriterium. Leichte Abweichungen im Unterberger-Tretversuch wurden, wie oben beschrieben, unter Ausschluss anderer Symptome als intraindividuelle Normvariationen toleriert. Bei den in die Studie eingeschlossenen Probanden wurden

erwartungsgemäß im Unterberger-Tretversuch und Romberg-Standversuch keine Pathologien im Sinne von Instabilität oder Sturzgefahr gefunden. Anhand der vorstehend dargestellten Literatur wurde erwartet, dass sich die beiden Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) in ihren Schwankungsparametern unterscheiden würden.

Ein signifikanter Altersgruppenunterschied konnte jedoch in keinem der beiden posturalen Testverfahren bestätigt werden. Diese Ergebnisse erscheinen mit jenen von Treleaven et al. vergleichbar, welche in Messungen mittels PUG nur in einem älteren Kollektiv mit Nackenbeschwerden im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe eine Verschlechterung der Schwankungsparameter feststellen konnte<sup>47</sup>.

Anhand der gewonnenen Ergebnisse bestätigte sich die Vergleichbarkeit unserer Probanden. Für zukünftige Studien mit zervikal defizitären Schwindelpatienten könnte die Posturographie eine geeignete Kontrollinstanz darstellen. Vor und nach vestibulärem Training auf der Messplatte könnte eine Nystagmuskontrolle mithilfe der 3D-RES-Methode erfolgen.

### **5.2.1.2 Die Baseline der Videookulographie**

Die Stichprobe wurde auf eine spontane Nystagmusaktivität hin untersucht. Ein Spontannystagmus (SPN), welcher mit der Videookulographie bei völliger Dunkelheit gemessen wurde, hat laut Erkenntnissen unter anderem von Mulch et al. und Takahashi et al. keinen Krankheitswert, wenn sonstige Symptomfreiheit bestätigt ist<sup>127,136</sup>. Takahashi et al. fanden bei ihren Untersuchungen bei 5 von 30 Gesunden in der Untersuchung der Elektronystagmographie einen Spontannystagmus. Die Arbeitsgruppe von Mulch et al. fand bei der wesentlich unsensitiveren Methode der Frenzelbrille bei 2 von 102 gesunden Testpersonen einen spontanen Horizontalnystagmus. Zwischen den Patienten vom 11. bis 70. Lebensjahr fiel dabei kein Unterschied auf. In unserer Arbeitsgruppe wurden daher Probanden mit einer Aktivität  $\leq 1$ , des in Kapitel 3.10 beschriebenen angewandten Punktesystems, in die Studie eingeschlossen. Es wurde bei 14 von 100 Probanden eine spontane Nystagmusaktivität von 1 registriert. Diese, initial registrierte sogenannte Baseline, diente nachfolgend als Ausgangswert für den Vergleich zu den Provokationspositionen. Wir konnten das Ergebnis von Mulch et al. bestätigen, dass sich die Probanden der Gruppe<sup>26</sup> hinsichtlich ihrer horizontalen oder vertikalen Nystagmusaktivität nicht von jenen der Gruppe<sup>50</sup> unterschieden. Somit war zudem eine Vergleichbarkeit der beiden



Altersgruppen sichergestellt. Die Ähnlichkeit der Baseline der zervikal und vestibulär gesunden Probandengruppen erscheint schlüssig, da die Ruheposition die geringste Anforderung an das vestibuläre System stellt. In Provokationspositionen hingegen müssen multiple Sensorinformationen verarbeitet, integriert und in eine Effektorreaktion umgesetzt werden <sup>71,136</sup>.

### 5.2.2 Die dreidimensionale Videookulographie

Die Videookulographie ist ein etabliertes, objektives Messsystem der okulären Reaktionen, besonders in der Diagnostik vestibulärer Störungen. Die dreidimensionale VOG (3D-VOG) stellt das modernste und sensibelste Mittel der Untersuchung aller drei Nystagmusdimensionen dar. Eine aktuelle Studie von Naguib et al. bestätigt in seiner Studie die VOG als sicheres und kosteneffektives Mittel um Störungen der Balance nach Schädeltraumata zu erfassen und zu verfolgen <sup>126</sup>. Verschiedene weitere Autoren vertreten anhand ihrer Untersuchungen die Ansicht, dass ein Nystagmus durch Irritation der zervikalen Region abgeleitet werden kann <sup>141,142</sup>. Der in Vorstudien, bezüglich der zervikalen Afferenz, relevant erscheinende vertikale Nystagmus kann durch die 3D-VOG mitbeurteilt werden. Die Ausprägung einer zervikalen Störung anhand des vertikalen Nystagmus wurde bereits 1985 von Scherer et al. und später von Hölzl et al. beschrieben <sup>26,143</sup>.

Der sogenannte „zervikale Nystagmus“ zeigte sich in Vorstudien sehr variabel und teilweise schwach ausgeprägt, aus diesem Grund musste die Auswertung der Aufzeichnungen visuell-manuell erfolgen. Unsere Arbeitsgruppe richtete sich hierfür nach dem in Vorstudien bereits eingeführten Score-System (0 bis 3 Punkte pro Position) <sup>84</sup>. Die Punkte orientierten sich in aufsteigender Intensität an Amplitude und Frequenz (Kapitel 3.10.1). Dieses Auswertungskonzept weist den qualitativen Mangel auf, dass eine subjektive Interpretation nicht gänzlich ausgeschlossen werden konnte <sup>144</sup>. Die sich dadurch ergebende Einschränkung der Objektivität musste zum derzeitigen Entwicklungsstand akzeptiert werden, bietet somit zumindest Möglichkeiten zur Weiterentwicklung. Einen weiteren qualitativen Mangel stellt die Artefaktentstehung bei solch einem sensitiv messenden System dar. Dunkles Make-up oder leichteste Verschmutzung der Maske führten häufig zu Störungen. Die in diesem Untersuchungssetting gewonnenen Daten der torsionalen Nystagmusdimension wiesen eine hohe Störanfälligkeit durch starke Artefaktüberlagerung auf. Sie waren somit nicht

sicher auszuwerten als auch lückenhaft und konnte daher nicht berücksichtigt werden. In Vorstudien von Hölzl et al. wurde bisher kein Indiz für eine Beziehung der torsionalen Nystagmen zur zervikalen Afferenz gefunden, daher wurde diese Dimension von den Ergebnissen ausgeschlossen<sup>26</sup>.

### **5.2.3 Schwerkraftabhängige zervikotonische Provokation**

Den Vorteil der Anwendung des klassischen Halsdrehtests (HDT) stellt der geringe technische sowie zeitliche Aufwand dar. Er wurde bereits häufig, u.a. von Holtmann et al., Hülse et al. und Scherer et al., als Messinstrument für den zervikookulären Reflex verwendet<sup>30,58</sup>. Die Auslenkung der Halswirbelsäule wurde im eindimensionalen HDT nur in der torsionalen Ebene durch Kopf- oder Rumpfdrehung erreicht. Mit Hilfe der Elektronystagmographie konnten währenddessen die Augenbewegungen in allen Nystagmusdimensionen aufgezeichnet werden. Beispielsweise Holtmann et al. führten die Messung während der dynamischen Bewegung durch, was eine Untersuchung von Typ Ia Afferenzen bedeutet<sup>58</sup>. Fortgeschrittene Studien u.a. unserer Arbeitsgruppe konzentrierten sich dabei auf die Messung der okulären Parameter in der statischen Provokationshaltung, wobei die Typ II Afferenz beurteilt wurde<sup>84</sup>. In diesem weiterentwickelten sogenannten 3D-HDT konnte zudem die Untersuchung mit ante- und retroflektiertem sowie zur Seite geneigtem Kopf untersucht werden<sup>26,84</sup>. Dies sollte die Ableitung von, durch die Bewegung entstehenden und störanfälligen, Reflexmechanismen vermeiden. Da eine physiologische Reflexsituation verhindert wurde, bezeichneten Hölzl et al. den so abgeleiteten Nystagmus als Reaktion, bzw. als „zervikotonischen Provokationsnystagmus“ (CPN)<sup>26</sup>.

Einen Schwachpunkt der zuletzt angewandten 3D-HDT-Methode stellte die manuelle Auslenkung und Haltung durch den individuellen Untersucher dar. Durch diesen Umstand war keine standardisierbare oder reproduzierbare Untersuchungssituation gewährleistet. Hinzu kommt der entscheidende Faktor, dass eine Reizung der Otolithen bei der Auslenkung im kraniozervikalen Übergang bisher in Kauf genommen werden musste, der Einfluss dieser zusätzlichen Rezeptorprovokation allerdings unbekannt ist. Während einer Kopfbewegung kommt es physiologisch zu einer Auslösung des vestibulookulären Reflexes (VOR), während einer gehaltenen Kopfkippung wird der otolithokuläre Reflex (OOR) provoziert. Eine Reizung im Besonderen des Otolithenorgans, welches auf eine Vektoränderung zur Erdbeschleunigung reagiert, galt es zu verhindern<sup>145</sup>. Andernfalls könnten abgeleitete Nystagmen eine Mischung

verschiedener Reizeinströme in den Vestibulariskernkomplex (VKK) darstellen. Die Projektionen der Halsafferenzen und des Labyrinths enden beide an den vestibulospinalen und vestibulookulomotorischen Neuronen des VKK.

Als folgerichtige methodische Verbesserung der Untersuchung zum zervikalen Nystagmus wurde der 3D-Rumpfxkursionsstuhl, in der 3D-RES-Methode angewendet, von unserer Arbeitsgruppe umgesetzt <sup>26</sup>.

### **5.2.4 Schwerkraftunabhängige zervikotonische Provokation**

Wie soeben beschrieben stellte die 3D-RES-Methode eine Weiterentwicklung der 3D-HDT-Methode dar. Die Nystagmusdimensionen (vertikal, horizontal) konnten nun unter stationärer Kopfposition und reproduzierbarem Bewegungsradius des Rumpfes untersucht werden. Dabei konnten mithilfe der 3D-RES-Methode außerdem alle Freiheitsgrade des kraniozervikalen Übergangs (Flexion, Kippung, Torsion) über die manuelle Auslenkung des Rumpfes vom Untersucher eingestellt werden. Mit diesem neuen Untersuchungstool wurden so selektiv die zervikovegetibulären Afferenzen, durch das Ableiten zervikotonischer Provokationsnystagmen, okulär erfasst. Durch die stabile Kopffixierung konnte im 3D-RES, unter Ausschluss einer Schwerkraftvektorverlagerung auf die Otolithen, von einer zuverlässigen Untersuchungssituation ausgegangen werden. Zudem konnte erstmals die subjektive Nullposition in allen Dimensionen der Halswirbelsäule kontrolliert durchgeführt werden.

Kritisch zur Untersuchung der 3D-RES-Methode anhand des Rumpfxkursionsstuhls ist anzumerken, dass sie sich als wesentlich aufwendiger darstellt, als mittels der üblichen 3D-HDT-Methode anhand eines einfachen Stuhls. Die Einstellung der Einzelpositionen und die manuelle Auslenkung durch den Untersucher beanspruchen deutlich mehr Zeit und Expertise. Ebenso stellt die Exklusivität und kostenintensive Anschaffung, Installation als auch Bedienung des neuen Untersuchungstools eine der Limitationen dar. In der allgemeinen HNO-Praxis oder Klinik steht diese Untersuchungsmöglichkeit nicht zur Verfügung und ist dafür auch nicht geeignet. Der Einsatz des Rumpfxkursionsstuhles dient zur Zeit experimentellen Pilotstudien, welche der primären Informationsgewinnung dienen. Eine Tauglichkeit in der alltäglichen Praxis war vorläufig keine Zielsetzung.

Die Auslenkung des 3D-RES wurde bewusst manuell konzipiert. Da die okulären Reaktionen nur in tonischer Haltephase gemessen werden sollten, lässt sich bei dieser

Untersuchung die Frage nach einer gleichmäßigen Beschleunigung als Qualitätskriterium vernachlässigen. Eine automatische Steuerung durch einen Motor wäre für eine exakte Untersuchung der subjektiven Nullposition jedoch von Vorteil gewesen. Eine identisch reproduzierbare Rückführung in die Ausgangsposition bei konstanter Geschwindigkeit könnte schwankungsbedingte Fehlinterpretationen bei der Untersuchung der kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität minimieren. Aus Sicherheits- sowie Kostengründen einer elektronischen Steuerung wurde diese Einschränkung in Kauf genommen. Erwähnenswert für die Planung von Folgestudien an Patienten erscheint ebenfalls der Umgang des Patienten mit einer Rumpfauslenkung bei fixiertem Kopf. Besonders nach einem traumatischen Unfallereignis, könnte die Fixierung möglicherweise beklemmend wirken. Da bisher nur gesunde Probanden untersucht wurden, stellte die Fixierung kein Hindernis dar.

Außerdem ist zu beachten, dass die apparativ bedingten maximalen Auslenkgrenzen in der Rumpfflexion und -kipfung der 3D-RES-Methode etwas geringer als die physiologisch möglichen HWS Freiheitsgrade waren, wohingegen in der Rumpftorsion bis an die physiologisch endstellige zervikale Gelenkrotation gegangen werden konnte. Zu erklären ist diese Einschränkung durch das gebotene Maß an statischer Sicherheit während der Massenauslenkung auf dem 3D-Rumpfxursionsstuhl. Für beide Methoden wurden für die Vergleichbarkeit die gleichen maximalen Auslenkwinkel festgelegt. Zudem wurden die individuellen subjektiven Auslenkungsgrade des jeweiligen Probanden eingehalten.

### **5.3 Analyse der Provokationspositionen im Vergleich zur Baseline**

#### **5.3.1 Das Gesamtkollektiv**

In Voruntersuchungen zur 3D-HDT-Methode von Hölzl et al. wurde eine signifikante Nystagmusmodulation von Spontan-nystagmusaktivität zu Aktivität während zervikotonischer Provokation durch Kopfxursion gefunden<sup>26</sup>. Es sollte in dieser Studie prinzipiell überprüft werden, ob sich in unserem Untersuchungssetting zervikotonische Provokationsnystagmen (CPN) durch Kopf- oder Rumpfxursion ableiten ließen. Durch den Einsatz des Rumpfxursionsstuhls in der 3D-RES-Methode wurde eine selektive zervikale Reizung angestrebt und folglich mit einer geringeren Nystagmusaktivitätsmodulation gerechnet.

## Diskussion

Bisherige Studien orientierten sich an dem phasischen Untersuchungsansatz und konzentrierten sich auf die Torsion des Rumpfes. Von Holtmann et al. wurde dabei angemerkt, dass ein Nystagmus, der bei Gesunden durch zervikale Provokation ausgelöst würde, keinen pathognomonischen Wert hätte<sup>23</sup>. Außerdem beobachtete die Arbeitsgruppe in der Studie zur phasischen Untersuchung der zervikookulären Reflexe keinen Unterschied zwischen Probanden und zervikal defizitären Patienten<sup>23</sup>. Dies führt vor Augen, dass es unter phasischen Reflexbedingungen schwieriger zu sein scheint Differenzierungen möglich zu machen. Durch die selektive Untersuchung der Rumpftorsion konnte zwar eine Reizung des Vestibularorgans durch Kopfauslenkung vermieden werden. Allerdings stellte offensichtlich die aktive Drehbewegung wiederum einen störenden Afferenzstrom dar.

In neueren Studien von Kelders et al. sowie von Montfoort et al. konnte jedoch die besondere Relevanz der zervikookulären Reflexe durch signifikante Gruppenunterschiede zwischen Schleudertrauma-Patienten und Probanden im phasischen Untersuchungsgang weiter untermauert werden<sup>53,107</sup>. Auch Studien von Bronstein et al. und Carmona et al. zum Verhalten des zervikookulären Reflexes (COR) zum vestibulookulären Reflex (VOR) und optokinetischen Reflex (OKN) bei vestibulär defizitären Patienten im Vergleich zu Gesunden ergaben einen signifikanten Gruppenunterschied. Dieser fand sich in einem veränderten „Gain“ (Verstärkungsfaktor) des COR bei Probanden mit einem Labyrinthdefekt, einem Schleudertrauma oder höherem Alter im Sinne eines konstanten „Gain“-Anstieges. Diese Erkenntnisse stützten so die Theorie der kompensatorischen Hochregulation des COR<sup>59,104</sup>. In weiteren Studien u.a. von Treleaven et al. konnten bei Betrachtung der langsamen Augenfolgebewegung, beispielsweise anhand des „Smooth Pursuit Neck Torsion Test“, Schleudertrauma-Patienten durch eine veränderte Reaktion identifiziert werden<sup>47</sup>. Mandellos et al. konnten diese Ergebnisse in seinen Untersuchungen ebenfalls anhand des Smooth Pursuit bestätigen<sup>146</sup>. Die Ergebnisse dieser Studien sind allerdings aufgrund ihres phasischen Ansatzes nicht identisch mit dem tonischen Ansatz dieser Arbeit und somit nur eingeschränkt verwertbar für Vergleiche. Dennoch bilden sie einen Anteil an der Forschung zu der zervikalen Afferenz.

In unserer Studie bestätigte sich die Vermutung, dass während der tonischen Kopfauslenkung in der 3D-HDT-Methode insgesamt eine signifikante Modulation der

## Diskussion

Nystagmusaktivität in horizontaler als auch vertikaler Dimension im Vergleich zur Baseline, dem Spontannystagmus (SPN), registriert werden kann (siehe Kapitel 4.2.1). In einer Studie von Hölzl et al. hatte sich bei Gesunden, zervikal und vestibulär defizitären Patienten während dreidimensionaler tonisch gehaltener Kopfauslenkung zur Schwerkraft bei fixiertem Rumpf ebenfalls eine Nystagmusmodulation nachweisen lassen. Im Vergleich der Baseline zu den sechs zervikalen Provokationspositionen durch tonische Kopfauslenkung bestätigte sich dort die Aktivitätssteigerung bei zervikal gesunden Probanden nur für die Flexionsposition in der vertikalen Nystagmusdimension ( $p=0,002$ )<sup>84</sup>.

Eine signifikante Modulation der Nystagmusreaktion fand sich ebenfalls in unseren Ergebnissen des Vertikalnystagmus nach Provokation durch Kopfauslenkung in Kopfseitkipfung (Linkskippung  $p=0,003$ , Rechtskipfung  $p<0,001$ ) und Kopfflexion (Anteflexion  $p<0,001$ , Retroflexion  $p<0,001$ ) in der 3D-HDT-Methode. Die Rumpftorsion wurde ausschließlich mit der 3D-RES-Methode durchgeführt, da sich die Vorgehensweise für beide Methoden identisch darstellte und somit eine zweimalige Durchführung für redundant befunden wurde.

Die selektive Reizung der tiefen Halsmuskulatur in der 3D-RES-Methode hingegen erzeugte in der Gesamtstichprobe weder in der Rumpfflexion noch der -kipfung eine signifikante Modifikation der Nystagmusaktivität im Verhältnis zur Baseline. Lediglich in der gelenkendstelligen Rumpftorsion war eine signifikante Horizontalnystagmusmodulation im Vergleich zum SPN zu verzeichnen (Torsion rechts  $p=0,009$ ; Torsion links  $p=0,017$ ). Ähnliche Ergebnisse ließen sich in Voruntersuchungen von Hölzl et al. bei vestibulär und zervikal gesunden Probanden unter physiologischen Bedingungen ableiten: Die Arbeitsgruppe zeigte, dass es prinzipiell möglich war bei unveränderter Kopfposition in Neutralstellung und endstelligem kraniozervikalem Auslenkwinkel durch Bauch- und Rückenlage sowie Rumpftorsion einen zervikalen Provokationsnystagmus bei Gesunden unter physiologischen Bedingungen auszulösen<sup>26</sup>. Allerdings konnten bei dem dort gewählten Studiendesign aus technischen Gründen keine Parameter für die Kippung gewonnen werden.

In Arbeiten von Bisdorff et al., Fernandez et al. und Clarke et al. wurde bestätigt, dass die Vektorveränderung der Otolithen zur Schwerkraft bei gehaltener Kopfauslenkung einen konstanten Beschleunigungsreiz bedeutet<sup>16,19,32,145</sup>. In Anbetracht der hier und in Vorstudien gewonnenen Resultate scheint eine Differenzierung zwischen schwerkraftbedingter Otolithenorganreizung und zervikaler Reizung in der 3D-HDT-

Methode als Ursache der Nystagmusmodulation nicht eindeutig möglich. Es kann zudem vermutet werden, dass durch die selektive zervikale Untersuchung mit der 3D-RES-Methode diese otolithäre Stimulation eliminiert wurde. Aufgrund der dargelegten Argumente interpretieren wir lediglich die in der gelenkendstelligen Rumpftorsion abgeleiteten Nystagmusmodulationen als Anzeichen für ein zervikovestiläres Sensormismatch auf Hirnstammebene.

Zusammenfassend ist zu bestätigen, dass im tonischen Setting von Spontannystagmus zu Provokationsnystagmus eine Veränderung ableitbar war. Dies unterstützt insgesamt die Annahme, dass zervikookuläre Bahnen in tonischen Kopf-zu-Rumpf-Untersuchungen signifikante Nystagmusmodulationen messbar werden lassen und sich somit für die Erforschung zervikaler Afferenzen zu eignen scheinen.

Es ist kritisch anzumerken, dass die apparativ bedingten maximalen Auslenkungsgrenzen in der Rumpfflexion und -kipfung der 3D-RES-Methode eine unvorteilhafte Bedingung darzustellen scheinen. Nur in der endstelligen zervikalen Gelenkrotation der Rumpftorsion konnte eine signifikante Nystagmusmodulation abgeleitet werden. Zu erklären ist diese Einschränkung durch das gebotene Maß an statischer Sicherheit während der Massenauslenkung auf dem 3D-Rumpfflexionsstuhl.

Ob sich diese Erkenntnisse im klinischen Einsatz bei der Untersuchung von zervikal defizitären Patienten bestätigen, technisch umsetzbar oder erforderlich sind, muss in weiteren Studien evaluiert werden.

### **5.3.2 Die Altersgruppen**

Es finden sich in der Literatur Hinweise für einen Zusammenhang zwischen Gleichgewichtsstörungen und degenerativen Prozessen insbesondere der wichtigen vestibulären Peripherie als auch der zentralvestibulären Bahnen<sup>5,51</sup>. Propriozeption, Hören, Sehen sowie die kognitiven Fähigkeiten verschlechtern sich häufig ebenfalls. Da somit im Alter meist mehr als nur ein Sensor betroffen ist, wird die Kompensation von Ausfällen erschwert. Dies sollte anhand der Untersuchung zweier Altersgruppen (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) und den beiden Untersuchungsmethoden weiter erforscht werden.

Bei getrennter Betrachtung der beiden Altersgruppen in ihrer Reaktion auf Provokation durch Kopfauslenkung mittels 3D-HDT-Methode konnte beobachtet werden, dass im

## Diskussion

älteren Kollektiv im Gegensatz zum jüngeren Kollektiv eine Aktivitätsmodulation in allen Positionen der vertikalen und horizontalen Nystagmusdimension abzuleiten war (Signifikanzen siehe Kapitel 4.2.1.2). Die jungen Probanden wiesen eine signifikant gesteigerte horizontale Nystagmusreaktion lediglich in der Kippung (Linkskippung  $p=0,020$ , Rechtskipfung  $p=0,014$ ) sowie Retroflexion ( $p=0,036$ ) und der vertikalen Dimension in der Retroflexion ( $p=0,028$ ) auf. Daraus wird deutlich, dass in der 3D-HDT-Methode besonders die Probanden mit dem höheren Altersmedian (Gruppe<sup>50</sup>) für die Signifikanzen im statistischen Vergleich von Baseline zu Provokation im Gesamtkollektiv verantwortlich zu machen waren.

Die Reaktionen auf schwerkraftabhängige zervikotonische Provokationen in der 3D-HDT-Methode zeigten im anschließenden statistischen Altersgruppenvergleich (Gruppe<sup>26</sup>; Gruppe<sup>50</sup>) in der vertikalen Dimension in allen Positionen, Kopfkippung ( $p=0,004$ ) und Kopfflexion ( $p=0,002$ ), eine signifikant stärkere Nystagmusmodulation in Gruppe<sup>50</sup> als in Gruppe<sup>25</sup>. In der horizontalen Dimension blieben sich die Gruppen in ihrer Reaktion hingegen ähnlich.

Wie bereits zuvor dargestellt, fand sich für das Gesamtkollektiv in der Rumpfflexion und Rumpfkippung mittels 3D-RES-Methode keine signifikante Modulation der Nystagmusaktivität. Bei Betrachtung der jeweiligen Altersgruppen fällt jedoch auf, dass einzig Gruppe<sup>26</sup> in der Kippung im Vergleich zur Ruhemessung einen knapp signifikanten Anstieg der vertikalen Nystagmusaktivität zu verzeichnen hatte (links:  $p=0,031$ ; rechts:  $p=0,047$ ). Außerdem fand sich bei Gruppe<sup>26</sup> in der Rumpfrotation in der horizontalen Nystagmusaktivität eine signifikante Steigerung (Torsion rechts  $p=0,010$ , Torsion links  $p=0,037$ ). Gruppe<sup>50</sup> zeigte keine signifikante Aktivitätsänderung im Vergleich zur Baseline. Bei schwerkraftunabhängiger Exkursion in der 3D-RES-Methode war hingegen entgegen der initialen Erwartungen weder in Flexion, Kippung noch Torsion des Rumpfes ein signifikanter Altersgruppenunterschied zwischen Gruppe<sup>26</sup> und Gruppe<sup>50</sup> zu verzeichnen (siehe Kapitel 4.2.2.2).

Von den Autoren wurde die Präzision der zervikalen Propriozeption auf einen Alterseffekt hin untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass vorwiegend unter Messbedingungen der Schwerkraftsänderung ein besagter Altersgruppenunterschied nachweisbar wurde. Dies lässt die Annahme einer höheren Störanfälligkeit des vestibulären Systems der zervikalen Propriozeption in Gruppe<sup>50</sup> denkbar werden. Auch



## Diskussion

ein zentraler Integrationsfehler beider berechtigter Sensorinformationen im vestibulären Kerngebiet scheint eine mögliche und denkbare Interpretation. Zumindest ließ sich durch selektive zervikale Stimulation keine Nystagmusmodulation zwischen den Altersgruppen als Zeichen eines Funktionsdefizites der zervikalen Afferenzen statistisch signifikant darstellen.

Dies stimmt mit den Erkenntnissen von Ishiyama et al. zu Schwindelbeschwerden im Alter überein. Die Autoren fanden, dass sich der Bestand an Zellen des Innenohrs mit der Zeit progressiv vermindert<sup>51</sup>. Dies führe laut den Autoren zu einem Balanceverlust. Schweigart et al. hingegen führten die Verschlechterung der Gleichgewichtsstabilität im Alter auf einen vestibulären Funktionsverlust zurück<sup>70</sup>. Die Arbeitsgruppe untersuchte, ob ein vestibuläres Defizit aufgrund von Alterungsprozessen durch die Propriozeptoren des Nackens auszugleichen sei. Sie fand heraus, dass die Aufgaben ohne propriozeptive Informationen wesentlich schlechter gelöst wurden, als mit deren Hilfe<sup>70</sup>. Bronstein et al. und Carmona et al. fanden einen veränderten zervikookulären Reflex bei Probanden mit Labyrinthdefekt, Schleudertrauma oder höherem Alter<sup>59,104</sup>. Auch die Erkenntnisse von Kelders et al. untermauern, durch den beobachteten kompensatorischen Anstieg des zervikookulären Reflexes (COR) im phasischen Halsdrehtest, den Verlust von vestibulärer Funktion im Alter<sup>105</sup>.

Eine Einschränkung hinsichtlich der wissenschaftlichen Verwertbarkeit muss trotz allen präventiven Maßnahmen in der intraindividuellen Streuung des Trainingszustandes und der Vigilanz gesehen werden. In dieser Studie betrug der Altersmedian der Gruppe<sup>50</sup> (40. bis 66. Lebensjahr) 50 Jahre. Der Einschluss von Probanden mit höherem Lebensalter hätte eventuell einen Einfluss auf die Ergebnisse erzielt, jedoch sind mit steigendem Alter häufiger medikamentös einzustellende Krankheiten und andere Einschränkungen anzutreffen, was eine unkontrollierbare Fehlerquelle für die abgeleiteten Reaktionen darstellen kann. Aufgrund des erstmaligen Einsatzes dieses Untersuchungstools wurde auch aus Sicherheitsgründen darauf verzichtet, ein älteres Kollektiv einzuschließen.

Schlussfolgernd lassen unsere Ergebnisse ein Sensordefizit der Otolithen im voranschreitenden Alter als eine mögliche Interpretation erscheinen. Außerdem stützen die gewonnenen Resultate die Theorie, dass durch Auslenkung des Kopfes eine multimodale Rezeptorreizung nicht auszuschließen ist. Die Qualität der neuronalen

Sensorintegration vestibulärer Informationen erscheint altersabhängig. Dies ergibt sich aus dem altersabhängigen signifikanten Unterschied der Nystagmusmodulation in der 3D-HDT-Methode. Diese Untersuchungsergebnisse müssen weiter überprüft werden. Insbesondere sind Einschränkungen eines vestibulär gesunden Probandenkollektivs zu berücksichtigen.

### 5.3.3 Der Vertikalnystagmus

#### 5.3.3.1 Das Gesamtkollektiv

Die Beurteilung des Vertikalnystagmus (VN) wurde bisher in der Hals-Nasen-Ohrenheilkunde wenig einbezogen, da er als zentralvestibuläres Phänomen gewertet und vornehmlich der Neurologie zugeordnet wird. Dem Upbeat-Nystagmus (UBN) und dem Downbeat-Nystagmus (DBN) werden zudem unterschiedliche Bedeutungen zugesprochen<sup>147</sup>. Halmagyi et al. zählen als Gründe für einen DBN eine Chiari Malformation, hereditäre spinozerebelläre Ataxie, Kleinhirndegeneration, Langzeit Lithium Therapie oder Kompression des kaudalen Hirnstammes auf. Zum Upbeat-Nystagmus hingegen gibt es eine sehr karge Studienlage. Pierrot-Deseilligny et al. fanden, dass UBN durch Schäden im Bereich der kaudalen Medulla oblongata (insbesondere im Bereich des Nucleus vestibularis superior), DBN durch Schädigungen im Bereich des Flocculus ausgelöst würden<sup>101</sup>. Sie vermuteten zudem, dass eine Störung im inhibitorischen Kontrollkreis zwischen der kaudalen Medulla oblongata, dem Kleinhirn und dem Nucleus vestibularis superior einen UBN verursachen könne<sup>101,148</sup>. Des Weiteren fand diese Arbeitsgruppe, dass durch zentrale Läsionen ausgelöste UBN als auch DBN durch Änderungen der Schwerkraft in ihrer Aktivität beeinflusst werden können<sup>149</sup>. Auch Helmchen et al. bestätigten die Verbindung zur kaudalen Medulla oblongata als Läsionsort für den UBN<sup>109</sup>. Studien von Leigh et al. weisen auf Läsionen des perihypoglossalen und medialen vestibulären Nucleus als Auslöser eines UBN hin<sup>150</sup>.

Der Nucleus prepositus hypoglossi dient als präokulomotorisches Zentrum. In ihm werden unter anderem Afferenzen aus dem Cerebellum, dem Nucleus oculomotorius, der Formatio reticularis und den Nuclei vestibularis integriert. Diese Informationen werden in vertikale und horizontale Blickbewegungen umgesetzt. Laut Forschungsarbeiten von Wiksten et al. am Modell der Katze entspricht der Nucleus prepositus hypoglossi in der kaudalen Medulla oblongata einem Ort zu dem auch

## Diskussion

zervikale Afferenzen hin konvergieren<sup>151</sup>. Eine Arbeit von Gdowski et al. weist auf neuronale Konvergenzen der zervikalen Afferenzen in den Nucleus prepositus hypoglossi in Versuchen mit Affen hin<sup>106</sup>. Diese neuroanatomischen Erkenntnisse lassen eine Verbindung von Schwerkraft, zervikaler Afferenz und okulärer Reaktion als theoretisch möglich erscheinen.

Da sich in eigenen Vorarbeiten während zervikotonischer Provokation der Upbeat-Nystagmus gegenüber dem Downbeat-Nystagmus als dominante Schlagrichtung gezeigt hatte, wurde ein Zusammenhang mit der zervikalen Afferenz vermutet<sup>26,84</sup>.

Nach der aktuellen Ergebnislage dieser Studie konnten wir eine gesteigerte Aktivität im Vertikalnystagmus mit Dominanz des UBN gegenüber dem DBN nur in der 3D-HDT-Methode bestätigen. Diese Methode schloss jedoch das Risiko der Beobachtung von zervikalen als auch vestibulären Afferenzströmen ein. Dies scheint durch das Ausbleiben einer signifikanten Vertikalnystagmusmodulation in der 3D-RES-Methode bestätigt. Wie der beschriebene Effekt in der 3D-HDT-Methode endgültig zu interpretieren ist, kann aus den hier gewonnenen Daten nicht abschließend geklärt werden. Es ist zum einen möglich, dass der UBN unter diesen Umständen als Reiz des Schwerkraftvektors auf die Otolithen zu interpretieren ist. Zum anderen könnte die otolithenbasierte Schwerkraftinformation und gleichzeitige propriozeptiv-somatosensorische Information der Halsafferenz eine modulierte Nystagmusreaktion ableitbar machen.

Bisdorff et al. untersuchten Probanden in fünf verschiedenen statischen Kopf-im-Raum Positionen nach Nystagmen. Diese zeigten in Rücken- und Bauchlage unter Suppression der visuellen Fixation häufig Upbeat-Nystagmen. Laut den Autoren legt dies nahe, dass die beobachteten Nystagmusmodulationen otolithären Ursprungs waren<sup>145</sup>. Andere Autoren beobachteten ebenfalls Horizontal- und Vertikalnystagmen bei vestibulär gesunden Probanden in statischer Bauch- und Rückenlage<sup>152,153</sup>. Diese Daten geben einen weiteren möglichen Hinweis auf die otolithäre und kraniozervikale Einflussgröße in der multimodalen Sensorintegration, welche in Folgestudien weiter überprüft werden sollte.

Zusammenfassend erscheint es nachvollziehbar, dass durch die Otolithenreizung in der 3D-HDT-Methode möglicherweise auch Nystagmen ausgelöst wurden. Jedoch hielt es

sich bei dem untersuchten Kollektiv um zervikal sowie vestibulär gesunde Probanden. Daher ist anzumerken, dass das Ausbleiben einer signifikanten Nystagmusmodulation bei Untersuchungen mittels der 3D-RES-Methode keine endgültige Aussage über den Zusammenhang von Vertikalnystagmen, insbesondere den UBN, und zervikalem propriozeptiven Defizit zulässt.

Es war des Weiteren von Interesse festzustellen, ob sich ein vermuteter Altersgruppenunterschied im anschließenden Gruppenvergleich bestätigte.

### **5.3.3.2 Die Altersgruppen**

Da eine Dominanz des Vertikalnystagmus in der 3D-HDT-Methode auffiel sollte dieser Effekt im Altersgruppenvergleich aufgeschlüsselt werden. In dieser Methode muss die mögliche vestibuläre Mitbeteiligung an Provokationsnystagmen und somit den gewonnenen Ergebnissen kritisch hinterfragt werden.

Wie bereits im Kapitel 5.3.2 dargelegt, wurde von uns bei Probanden mit höherem Altersmedian (Gruppe<sup>50</sup>) ein zervikales Defizit im Vergleich zu den Probanden mit niedrigerem Altersmedian (Gruppe<sup>26</sup>) vermutet. Anhand der Ergebnisse ließ sich diese Interpretation nicht mehr mit Sicherheit halten. Der Altersgruppenunterschied schien sich nur bei gleichzeitiger vestibulärer und zervikaler Sensorstimulation als signifikant zu erweisen.

In der Aufschlüsselung des Vertikalnystagmus zeigte sich im Altersgruppenvergleich zwischen Gruppe<sup>26</sup> und Gruppe<sup>50</sup> in der 3D-HDT-Methode keine signifikante Aktivitätsänderung des UBN. Anhand dieser Ergebnisse wurde der bislang vermutete Zusammenhang zwischen zervikotonisch provoziertem Nystagmus und UBN zumindest nicht bestätigt. In Untersuchungen von Hölzl et al. fand sich bei zervikal defizitären Probanden jedoch ein nachweisbarer Zusammenhang zum UBN<sup>84</sup>.

Gruppe<sup>50</sup> wies signifikant mehr DBN als Gruppe<sup>26</sup> auf (siehe Kapitel 4.2.1.3). Dies könnte auf eine vestibuläre Genese der abgeleiteten Nystagmusreaktionen hinweisen. Die Arbeitsgruppe von Pierrot-Deseilligny fand heraus, dass durch zentrale Läsionen ausgelöste UBN als auch DBN, durch Änderungen in der Schwerkraft in ihrer Aktivität beeinflusst werden können<sup>149</sup>. Marti et al. wiesen in ihrer Studie nach, dass auch eine statische Kopfauslenkung einen DBN hervorrufen kann<sup>154</sup>. Diese Arbeitsgruppe äußerte die Vermutung, dass ein Kollektiv mit intaktem Vestibulocerebellum die Reaktion des Otolithenorgans auf einen Schwerkraftreiz, im Sinne eines otolithokulären Reflexes (OOR), minimieren würde. Bei einer Läsion allerdings wäre ein resultierender

DBN möglich. Eine Reaktion der Otolithen und Bogengänge konnte in unserer Studie mittels der 3D-HDT-Methode aufgrund der Kopfneigung nicht sicher ausgeschlossen werden. Hiermit könnte die in Gruppe<sup>50</sup> gesteigerte Ableitung von DBN erklärbar sein. Besonders im höheren Alter ist erwiesenermaßen mit zentralen und vestibulären Funktionseinschränkungen zu rechnen. Ishiyama et al. schlussfolgerten aus ihren Forschungsergebnissen, dass die Ursache von Schwindelbeschwerden im Alter vorwiegend bei der Störanfälligkeit der vestibulären Peripherie läge<sup>51</sup>. Dies wird von verschiedenen Autoren mit spinocerebellärer Degeneration, Multisystematrophie und degenerativen vaskulären Läsionen erklärt<sup>70-72</sup>. Im Alter ist ein verstärktes Auftreten von idiopathischen DBN auch von Wagner et al. beschrieben worden<sup>155</sup>. Diese Tatsachen könnten die zuvor diskutierte altersabhängige Otolithendegeneration und das sich daraus ergebende Sensordefizit bei der Lagebestimmung des Kopfes im Raum abbilden.

Abschließend muss eingeräumt werden, dass unter Änderung des Schwerkraftvektors keine signifikante altersabhängige Modulation des UBN beobachtet werden konnte. Vielmehr fiel hier eine altersspezifische Modulation des DBN auf. Es könnte somit geschlossen werden, dass eine gut belegte altersabhängige Funktionsabnahme der Otolithen als plausible Erklärung in Frage käme. Ob dieser Zusammenhang herzustellen ist, muss in weiteren Studien geklärt werden. Denn es gilt festzuhalten, dass durch die Untersuchung eines vestibulär sowie zervikal gesunden Kollektivs den Ergebnissen nur eine eingeschränkte Aussagekraft beigemessen werden kann. Für eine weitere Interpretation dieser Ergebnisse und der Rolle des Vertikalnystagmus erscheint eine systematische Registrierung ableitbarer Nystagmen in Rückenlage und ohne zervikale Auslenkung bei älteren versus jüngeren Probanden, als auch zervikal versus otolithär defizitären Patienten als von großem Interesse.

## **5.4 Analyse des Schwerkrafteffekts auf die Nystagmusmodulation**

### **5.4.1 Das Gesamtkollektiv**

Es hatte sich bereits im Vergleich zwischen dem zervikotonischen Provokationsnystagmus und dem Spontannystagmus eine methodenspezifische Nystagmusmodulation gezeigt. Daher sollte dieser Effekt im anschließenden Methodenvergleich näher analysiert und verstanden werden.

In der statistischen Gegenüberstellung der Methoden bestätigte sich insgesamt eine signifikant stärkere Provokationsnystagmusmodulation in der 3D-HDT-Methode gegenüber der 3D-RES-Methode. Diese signifikant höhere Aktivitätsmodulation zeigte sich in den Positionen „Gesamt“, „Kippung“ und „Flexion“ in beiden Nystagmusdimensionen ( $p < 0,001$ ), siehe Kapitel 4.3.1. Dies bestätigte die bereits in Kapitel 4.2 beschriebene Tendenz der zervikotonisch provozierten Nystagmen in der 3D-HDT-Methode im Verhältnis zur Baseline.

Der Einfluss der Schwerkraft auf das periphere Vestibularorgan in einer durch Kopfauslenkung veränderten Kopf-Raum-Beziehung in der 3D-HDT-Methode sollte somit als relevant eingestuft werden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es zu einem Integrationsfehler berechtigter Informationen im vestibulären Kerngebiet auf Hirnstammebene kommt. Die geringere Aktivitätsmodulation in der 3D-RES-Methode könnte auf den isolierten Reiz der zervikalen Afferenzen in einem vestibulär und zervikal gesunden Kollektiv zurückgeführt werden.

Es kann geschlussfolgert werden, dass bei der Untersuchung vestibulär relevanter zervikookulärer Bahnen mittels der neuen 3D-RES-Methode relevante perihervestibuläre Störfaktoren ausreichend ausgeschlossen werden können. Dadurch qualifiziert sich diese Methode als Untersuchungsinstrument für weitere zervikalvestibuläre Fragestellungen.

### **5.4.2 Die Altersgruppen**

Um diese Erkenntnisse in einem zweiten Schritt auf einen Alterseffekt hin zu überprüfen wurde das Gesamtkollektiv von 100 Probanden in zwei Altersgruppen aufgeteilt. Diese Gruppen wurden anschließend statistisch in ihrer Reaktion auf zervikale und otolithäre Stimulation in der 3D-RES- und der 3D-HDT-Methode verglichen.

Dabei zeigten sich in Gruppe<sup>26</sup> insgesamt geringere Modulationsunterschiede durch die jeweilige Methode als in Gruppe<sup>50</sup>. Bei Probanden mit niedrigerem Altersmedian (Gruppe<sup>26</sup>) war allein in der Kopfkippung in der 3D-HDT-Methode eine stärkere horizontale Nystagmusaktivität als durch Rumpfkippung in der 3D-RES-Methode auszulösen ( $p = 0,006$ ). In der Aktivität des Vertikalnystagmus schien die Untersuchungsmethode keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Gruppe<sup>26</sup> zu haben (siehe Kapitel 4.3.2). Dies scheint durch ein stärkeres Bindungsverhalten der Gruppe<sup>26</sup>,

also eine gleichbleibende Aktivität unabhängig von der Untersuchungsmethode, erklärbar. „Bindungen“ bedeutet, dass, falls eine Nystagmusmodulation bestand, sich diese nicht durch die jeweilige Methode modifizieren ließ, sondern stabil blieb.

Die Probanden mit dem höheren Altersmedian (Gruppe<sup>50</sup>) hingegen zeigten in der horizontalen und vertikalen Dimension bei Auslenkung des Kopfes gegenüber der Schwerkraft (3D-HDT-Methode) eine signifikant stärkere Nystagmusaktivität in Kippung und Flexion als bei Auslenkung des Rumpfes (3D-RES-Methode), siehe Kapitel 4.3.2.

Die Unterschiede in der zervikookulären Nystagmusreaktion zwischen den Altersgruppen könnte als eine gesteigerte Sensibilität gegenüber afferenten Reizströmen auf den Vestibulariskernkomplex und ein progredienter otolithärer Funktionsverlust im Alter interpretiert werden<sup>51</sup>. Auch Schweigart et al. führten die Verschlechterung der Gleichgewichtsstabilität im Alter auf einen vestibulären Funktionsverlust zurück<sup>70</sup>. Er stellte fest, dass durch eine kompensatorische Hochregulation der Propriozeption eine vestibuläre Schwäche, zum Beispiel durch Krankheit, Unfall oder Alter, ausgeglichen werden kann. In weiteren Untersuchungen an Senioren zur Effektivität von vestibulärem Training zeigte sich eine starke Verbesserung in vestibulären Tests, der VOG und dem DHI<sup>131,140</sup>.

Zusammenfassend müssen die hier gemessenen Aktivitätsunterschiede durch Reizung oder Ruhigstellung des peripheren Vestibularorgans als der bestimmende Parameter für die Entstehung von Nystagmen angesehen werden.

Mithilfe der neuen Messmethode, dem 3D-RES, konnten neue Daten gewonnen werden. Diese stützen eine wissenschaftlich bereits gesicherte Evidenz: Die Exklusion des, für Gravitationsänderungen sensiblen, Gleichgewichtsorgans scheint für eine Verhinderung von Messverzerrungen essentiell zu sein. Die dargestellten Ergebnisse belegen dies sowohl für die horizontale als auch vertikale Nystagmusdimension, welche es weiterhin zu erforschen gilt.

## **5.5 Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität**

### **5.5.1 Das Gesamtkollektiv**

Zervikale Afferenzen können auch unabhängig von okulären Parametern evaluiert werden. In der aktuellen Literatur ist eine häufig verwendete Methode der Evaluation von Gleichgewichtsstörungen die Untersuchung der kraniozervikalen kinästhetischen

Sensibilität (KKS). Dabei handelt es sich um eine dynamische Messung der Typ Ia Afferenzen. Dazu wurde unter anderem der sogenannte Repositioning-Test durchgeführt, bei welchem der Kopf zu einer Ursprungs oder sogenannten „target position“ zurückgeführt werden sollte<sup>88</sup>. Bei Untersuchungen von Malmström et al. mit labyrinthlosen Patienten oder von Ceyte et al. in Schwerelosigkeit fiel auf, dass die Probanden in der Lage waren ihre Ausgangsposition wieder herzustellen bzw. sich zu orientieren und auszurichten<sup>17,68</sup>. Es wurde schlussfolgernd in Betracht gezogen, dass die zervikale Afferenz im Bedarfsfall hochreguliert werden kann, wenn andere Referenzen nicht zur Verfügung stehen. Eine Untersuchung von Mulavara et al. bestätigte die Autoren in ihrer Annahme, dass somatosensible Einflüsse die Aktivität der vestibulären Kernneuronen modulieren können<sup>18</sup>. In einer Studie von Woodhouse et al. aus dem Jahr 2010 zeigt sich bei Whiplash-Patienten mit chronischen Beschwerden die Standbalance und Kopfrepositionierung gestört<sup>138</sup>. Besonders die langsame Bewegung des Kopfes wird laut dieser Autoren besser durch die propriozeptive Information als die vestibuläre koordiniert<sup>45</sup>. Weikert et al. konnten in der Messung des „subjektiven Nulldurchgangs“ der Kopfgelenke Patienten mit zervikal-somatosensorischem Defizit von gesunden Probanden abgrenzen<sup>90</sup>. Hierbei wurde bei dem sitzenden Patienten der Rumpf unter dem Kopf durchrotiert. Mouton et al. belegten im Jahre 2009 neuroanatomisch eine Relaisfunktion der Zellen des oberen Zervikalmarks zum CCN<sup>111</sup>. Die Anwendung der KKS spielt somit eine wichtige Rolle bei der Erfassung und Therapie von Gleichgewichtsstörungen.

Es finden sich in der Literatur vielzählige qualitativ hochwertige Untersuchungsansätze, welche vestibuläre Einflüsse einschließen. Eine Wiederholung dieser Ansätze erschien an dieser Stelle folglich als redundant. Die Einschränkung der bisherigen Untersuchungen stellte jedoch die ungewollte unselektive Messung verschiedener Rezeptoreinflüsse dar. So konnte der Einfluss der zervikalen Sensorleistung nur eingeschränkt beurteilt werden.

Mithilfe der 3D-RES-Methode wurde die Untersuchung des „subjektiven Nulldurchgangs der Kopfgelenke“ erweitert und standardisiert. Hierbei sollte selektiv das Bewegungssegment der Halswirbelsäule ohne Reizung der Otolithen durch Verlagerung des Kopfes und somit des Schwerkraftvektors überprüfbar gemacht werden. Es wurde während der rückführenden Bewegung aus den sechs Provokationspositionen die subjektive Kopf-zu-Körperposition im Raum gemessen.



Aufgrund der Voruntersuchungen u.a. von Weikert et al. war zu erwarten, dass eine Performance allein durch zervikale Informationen möglich sein müsste bzw. durch deren Störung verändert wäre<sup>90</sup>. Angenommen wurde von der Arbeitsgruppe auch, dass die beiden Altersgruppen sich in ihrer Reaktion aufgrund der degenerativen Prozesse an Muskulatur, neuronaler Struktur und Knochen unterscheiden. Aufgrund der damaligen methodischen Möglichkeiten konnte jedoch nur die torsionale Ebene erfasst werden. Die anderen Freiheitsgrade hätten ohne eine aktive Kopfauslenkung nicht ermittelt werden können. Aktive und passive Bewegungen führen jedoch laut Schweigart et al. zu unterschiedlichen Reaktionen<sup>70</sup>.

Für die 3D-RES-Methode wurden erstmalig Standardwerte für alle drei Freiheitsgrade an Probanden unterschiedlichen Alters definiert und diese miteinander verglichen. Für gesunde Probanden zeigte sich im Mittel eine Abweichung zur Nullposition von 7,75°. In der Flexion und Kippung um 6° und in der Torsion um 10,35° (siehe Kapitel 4.4). Beim Vergleich mit vorherigen Studien, u.a. von Weikert et al., ähneln diese Ergebnisse den Erwartungswerten der Torsion eines gesunden Kollektivs<sup>90</sup>. Hölzl et al. schlugen vor, einen mittleren Abweichwinkel von > 10° als pathologisch einzustufen<sup>156</sup>. Dieser Einschätzung kann sich anhand der hier erhobenen Ergebnisse angeschlossen werden. Die Annahme, dass über die zervikale Propriozeption Informationen zum Vestibulariskernkomplex und weiter an den Hirnstamm geleitet werden, scheint hierdurch unterstützt. Eine ausreichende Schätzung des Nulldurchgangs der Kopfgelenke in diesem Kollektiv wurde allein durch die zervikale Information erreicht.

### **5.5.2 Die Altersgruppen**

In den Ergebnissen zum Altersgruppenvergleich präsentierte sich lediglich in der Flexion eine schlechtere Performance der Probanden mit dem höheren Altersmedian, Gruppe<sup>50</sup> (Kapitel 4.4.2, Abb. 35). Über ähnliche Ergebnisse berichteten Teng et al., bei deren Untersuchungen sich die älteren Probanden bei Kopfrepositionierung als weniger akkurat als die jüngeren präsentierten<sup>87</sup>. Insgesamt kam bei den Autoren jedoch ein Einfluss der vestibulären Funktionsverschlechterung im Alter in den Ergebnissen nicht zum tragen, was eine Annäherung der Resultate erklären kann. Diese Ergebnisse stimmen, bis auf die Flexion, mit jenen der okulären Untersuchungen in der 3D-RES-Methode überein, in denen sich kein Altersunterschied präsentierte. Hierbei ist festzuhalten, dass es sich prinzipiell um zervikal und vestibulär gesunde Probanden

handelte. Ein Altersunterschied alleine schien hierbei nicht in allen Positionen zu einem ableitbaren zervikalen Defizit zu führen. Die Suffizienz der zervikalen Propriozeption für eine Repositionierung im Raum wurde bereits mehrfach u.a. von Lackner et al. beschrieben<sup>11</sup>. Patienten nach Vestibularisausfall, untersucht von Geisinger et al. 2010, oder in Schwerelosigkeit, untersucht von Ceyte et al., erzielten ähnliche Ergebnisse wie Gesunde im Schwerfeld der Erde<sup>66,68,69</sup>.

Bei Untersuchungen anderer Autoren an zervikal defizitären Patienten hatte sich jedoch eindeutige Unterschiede zu gesunden Probanden gezeigt<sup>90</sup>. Heikkilä et al. konnten in der aktiven Rückführung des Kopfes Whiplash-Patienten von einem Kontrollkollektiv unterscheiden<sup>86</sup>.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei insgesamt zervikal und vestibulär gesunden Probanden zweier Altersgruppen lediglich in der selektiven Flexion ein Performanceunterschied feststellbar war. Wie dies zu werten ist, müsste in weiteren Untersuchungen anhand zervikal defizitärer Patienten erörtert werden. Die sonst gleiche Fähigkeit der beiden Gruppen die Nullposition nach Auslenkung dynamisch einzuschätzen, lässt sich mit der gleichbleibenden Nystagmusaktivität in der statischen Messung mittels 3D-RES vergleichen. Prinzipiell scheint eine Reduktion von anderen, eine dynamische Untersuchung störenden Sinnesrezeptoreinflüssen, als von Vorteil.

### **5.6 Schlussfolgerung und Ausblick**

Die ersten richtungsweisenden Ergebnisse dieser Pilotstudie lassen die Schlussfolgerung zu, dass Kopf-zu-Rumpf Untersuchungen sich prinzipiell eignen, um zervikotonische Nystagmusmodulationen nachzuweisen.

Die Untersuchung des zervikookulären Provokationsnystagmus (CPN) mittels der 3D-Rumpfkursionsstuhl-Methode (3D-RES-Methode) liefert den Ergebnissen zufolge wichtige neue Informationen. Die festgestellten Methodeneffekte als auch Alterseffekte auf die Ergebnisse der Nystagmusaktivität scheinen die Hypothese zu bestätigen, dass der Messmethode eine große Bedeutung zukommt. Der Einfluss der bisher verwandten 3D-Halsdrehtest-Methode (3D-HDT-Methode) auf das periphere Vestibularorgan könnte eine bisher nicht einschätzbare Ergebnisverzerrung bedeuten. Aus den Resultaten kann geschlussfolgert werden, dass ein CPN bei Gesunden in der 3D-RES-Methode weitaus seltener zu provozieren ist, als bisher angenommen wurde. Dies vereinfacht die Interpretation von Untersuchungsbefunden im Falle eines zervikal defizitären Untersuchungskollektivs. Bei der Beurteilung der zervikal-vestibulären Propriozeption

## Diskussion

scheint es folglich von Vorteil zu sein, eine selektive dreidimensionale Rumpfxkursion bei unveränderter Kopfposition vorzunehmen. Das Alter scheint ebenfalls einen relevanten Einfluss auf die Modulierbarkeit der Nystagmusreaktion auszuüben. Jedoch konnte der Zusammenhang zur zervikalen Afferenz in diesem Untersuchungssetting nicht belegt werden. Der Altersunterschied im Rahmen der dynamischen Untersuchung der kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität könnte einen Hinweis auf diesen Zusammenhang geben.

Die Tragweite der Ergebnisse kann aufgrund des explorativen Charakters der Pilotstudie und der alleinigen Untersuchung eines gesunden Probandenkollektivs nicht abschließend beurteilt werden. Die Ergebnisse scheinen zumindest in einem gesunden Kontrollkollektiv eine Minimierung der Otolithenorganreizung bei verhinderter Schwerkraftvektorverlagerung mithilfe des 3D-Rumpfxkursionsstuhls zu bestätigen und somit erstmals eine standardisierte, selektiv zervikale Afferenzmessung zu ermöglichen. Die Aussagekraft der Untersuchung eines gesunden Kollektivs ist jedoch durchaus begrenzt. Besonders bei der Analyse des Upbeat-Nystagmus im Zusammenhang zur zervikalen Propriozeption bestätigten nicht die bisherigen Erkenntnisse. Da seine Dominanz nur in der 3D-HDT-Methode augenscheinlich war, könnte er ebenso als physiologischer Reiz des Schwerkraftvektors auf die Otolithen zu interpretieren sein. Erst durch anschließende Folgeuntersuchungen auch an zervikal und vestibulär defizitären Patienten können die Effekte der 3D-RES-Methode in der dynamischen Untersuchung der kraniozervikalen kinästhetischen Sensibilität und die pathologische Relevanz der statischen Untersuchung von Nystagmusmodulationen weiter beurteilt werden.

Kritisch sollte der höhere zeitliche sowie technische Untersuchungsaufwand erwähnt werden. Der 3D-RES diene vorerst der primären Informationsgewinnung, weshalb die eingeschränkte praktische klinische Tauglichkeit aktuell keine Zielsetzung darstellte. Die automatische Nystagmusauswertung würde eine Verbesserung der Methodik darstellen. Sie ist durch die Variabilität der zervikalen Nystagmen allerdings bisher noch nicht realisierbar. Die adäquaten Auslenkungsgrenzen im 3D-RES bedürfen ebenfalls weiterer Evaluation.

Die Entwicklung einer effektiven und effizienten Diagnostik bei funktionellen Halswirbelsäulen-Störungen liegt im Interesse der Therapeuten, der Patienten und auch

## Diskussion

der Kostenträger. Eine objektive Diagnostik verbessert die Effektkontrolle von rehabilitativen sowie interventionellen Maßnahmen und sorgt für eine zukünftig bessere Anerkennung und Therapie der Symptomatik. Es sollte in jedem Falle eine interdisziplinäre Abklärung unklarer Schwindelbeschwerden erfolgen, um strukturelle und funktionelle Störungen voneinander abzugrenzen.

Eine manuelle Therapie ist aufgrund ihrer häufig beschriebenen Effektivität definitiv bei einem festgestellten funktionellen Defizit einzuleiten. Exemplarisch sei hier eine Studie von Reid et al. aus dem Jahre 2008 aufgeführt. An 34 randomisierten Probanden mit HWS-Beschwerden und Schwindel führte die Arbeitsgruppe eine placebokontrollierte Studie zu einer manuellen Therapie genannt „Sustained Natural Apophyseal Glides (SNAGs)“ durch <sup>130</sup>. Dabei zeigte sich eine signifikante Besserung der Beschwerden unter der Therapie. Nach 6 Behandlungen zeigte sich im 12-Wochen Follow-Up eine signifikante Abnahme des Schwindels im DHI-Score, der Häufigkeit der Schwindelattacken und der Nackenschmerzen. Aktuell rekrutiert die Arbeitsgruppe 90 Teilnehmer für eine weitere Studie, in der verschiedene Techniken zur Reduktion von zervikogenem Schwindel und assoziiertem Schmerz verglichen werden <sup>157</sup>.

Selbst wenn die Ergebnisse aus dem Bereich der Manualtherapie von Kritikern oft als nicht valide kritisiert werden, sollte diese Therapie als eine der wenigen effektiven Therapieoptionen keinem Patienten vorenthalten bleiben. Verschiedene therapeutische Maßnahmen sind in Tabelle 20 aufgeführt. Auch in der Facharztausbildung sollte mehr Wert auf die Weiterbildung im manualmedizinischen Bereich gelegt werden, da die Interpretation von funktionellen Befunden und deren Relevanz nachgewiesenermaßen vom Erfahrungsgrad des Untersuchers abhängen <sup>76</sup>.

Tabelle 20: Maßnahmen zur Behandlung von zervikalen Schwindelbeschwerden

<b>Passive Maßnahmen</b>	<b>Aktive Maßnahmen</b>
Wärmeanwendung	Postisometrische Relaxationen
Analgesierende Elektrotherapie	HWS stabilisierende Funktionsgymnastik
Detonisierende Massagen	Dekontraktionen und Haltungskorrektur
Entlastende axiale Traktionen und segmentale Mobilisation	Propriozeptive neuromuskuläre Faszilitation (PNF)
Manuelles Lösen von Blockaden	Gleichgewichtstraining mittels PUG

Der Schwerpunkt der Behandlung von Patienten mit einer Gleichgewichtsstörung liegt weiterhin auf dem Gleichgewichtstraining. Bei einseitigem Labyrinthausfall konnte so in Studien eine Kompensation über die vestibulospinalen Bahnen erreicht werden <sup>6</sup>. In

## Diskussion

Untersuchungen mit Senioren zur Effektivität von vestibulärem Training zeigte sich eine starke Verbesserung in vestibulären Tests, der VOG und dem DHI<sup>131,140</sup>. Bei einem zervikalen Defizit könnte durch eine Verbesserung der peripher-vestibulären Leistung eine Kompensation ermöglicht werden. Eine weitere mögliche Behandlungsstrategie bezüglich der Schmerzen stellt die zervikale Radiofrequenz-Neurotomie (CRFN) dar. Hierbei werden Nerven koaguliert, um Schmerzen zu lindern. Eventuell stellt dies für den zervikalen Schwindel ebenfalls eine vielversprechende Option dar<sup>96</sup>. Zusammenfassend scheint zur Vermeidung von Gleichgewichtsstörungen die Anwendung vestibulärer als auch propriozeptiver Rehabilitation im Sinne von Gleichgewichtstraining und Muskelaufbau effektiv zu sein<sup>131,157</sup>. Ein anerkanntes objektives Verfahren zur Diagnosefindung bei HWS-Beschwerden könnte die Grundlage einer korrekten Behandlung bilden und so den langen und kostspieligen Weg zu Diagnosefindung und Therapie verkürzen. Eine engere Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen stellt eine dringende Notwendigkeit dar, um die häufig chronischen Leiden durch angemessene Diagnostik und Therapien zu verhindern.

## 6 Literaturverzeichnis

1. Equilibrium CoHa. Committee on Hearing and Equilibrium, Guidelines for the diagnosis and evaluation of therapy in Meniere's diseases. *Otolaryngology--head and neck surgery: official journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery* 1995;113:181-5.
2. Yardley L, Owen N, Nazareth I, et al. Prevalence and presentation of dizziness in a general practice community sample of working age people. *Br J Gen Pract* 1998;48:1131-5.
3. Hamann KF. Grundsätzliche Überlegungen zum Thema Schwindel. In: Biesinger E, Iro H., ed. *HNO Praxis heute: Schwindel*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag; 2007:1-8.
4. Stuckrad-Barre S. Leitsymptom Schwindel - Ein häufiges Symptom mit unterschiedlichen, aber oftmals gut behandelbaren Ursachen. *Hessisches Ärzteblatt* 2002;5:261-6.
5. Kruschinski C, Kersting M, Breull A, et al. Frequency of dizziness-related diagnoses and prescriptions in a general practice database. *Z Evid Fortbild Qual Gesundheitswes* 2008;102:313-9.
6. Strupp MB, T. Diagnosis and Treatment of Vertigo and Dizziness. *Deutsches Ärzteblatt* 2008;105:173-80.
7. Fink W, Haidinger G. Prevalence of Health Problems in a Family Practice Observed Over 10 Years. *Zeitschrift für Allgemeinmedizin* 2007;83:102-8.
8. Wetmore SJ, Eibling DE, Goebel JA, et al. Challenges and opportunities in managing the dizzy older adult. *Otolaryngology-head and neck surgery: official journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery* 2011;144:651-6.
9. Poole E, Treleaven J, Jull G. The influence of neck pain on balance and gait parameters in community-dwelling elders. *Manual Therapy* 2008;13:317-24.
10. Neuhauser HK. Epidemiology of dizziness and vertigo. *Nervenarzt* 2009;80:887-94.
11. Lackner JR, DiZio P. Vestibular, proprioceptive, and haptic contributions to spatial orientation. *Annual review of psychology* 2005;56:115-47.
12. Brandt T, Bronstein AM. Cervical vertigo. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry* 2001;71:8-12.

## Literaturverzeichnis

13. Angelaki DE, Cullen KE. Vestibular system: the many facets of a multimodal sense. *Annual review of neuroscience* 2008;31:125-50.
14. Clarke AH. Das vestibuläre System - eine Kurzbeschreibung. In: Biesinger E, Iro, H., ed. *HNO Praxis heute: Schwindel*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; 2007:10-21.
15. Neuhuber WL. Peculiarities of innervation of the head and neck. *Orthopade* 1998;27:794-801.
16. Clarke AH, Kornilova L. Ocular torsion response to active head-roll movement under one-g and zero-g conditions. *Journal of vestibular research: equilibrium & orientation* 2007;17:99-111.
17. Ceyte H, Trousselard M, Barraud PA, et al. Perceived head-trunk angle during microgravity produced by parabolic flight. *Aviat Space Environ Med* 2008;79:420-3.
18. Mulavara AP, Ruttley T, Cohen HS, et al. Vestibular-somatosensory convergence in head movement control during locomotion after long-duration space flight. *Journal of vestibular research: equilibrium & orientation* 2012;22:153-66.
19. Clarke AH, Just K, Krzok W, et al. Listing's plane and the 3D-VOR in microgravity--the role of the otolith afferences. *J Vestib Res* 2013;23:61-70.
20. Ringelstein B. Zervikogener Schwindel, Fast immer eine Verlegenheitsdiagnose. *Fortbildung „Neurotransmitter“* 2008.
21. Hamann KF. Critical remarks on so-called cervicogenic vertigo. *Laryngologie, Rhinologie, Otologie* 1985;64:156-7.
22. Poeck K. Zur neurologischen Begutachtung nach "HWS-Schleudertrauma". *Akt Neurol* 2002;29:288-94.
23. Holtmann S, Reiman V, Schops P. Clinical significance of cervico-ocular reactions. *Laryngorhinootologie* 1993;72:306-10.
24. Castro WH, Schilgen M, Meyer S, et al. Do "whiplash injuries" occur in low-speed rear impacts? *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 1997;6:366-75.
25. Hallpike CS. The caloric tests. *Practica oto-rhino-laryngologica* 1955;17:173-8.
26. Hölzl M, Weikert S, Gabel P, et al. Cervicoproprioceptive provocation of horizontal and vertical nystagmus in test subjects. *HNO* 2008;56:1013-9.

## Literaturverzeichnis

27. Cullen KE. The vestibular system: multimodal integration and encoding of self-motion for motor control. *Trends in neurosciences* 2012;35:185-96.
28. Klinke R, Pape H.C., Silbernagl S. Gleichgewichts-, Lage- und Bewegungssinn. In: Verlag GT, ed. "Lehrbuch der Physiologie". Stuttgart und New York: Georg Thieme Verlag; 2005:676-84.
29. Gianna C, Heimbrand S, Gresty M. Thresholds for detection of motion direction during passive lateral whole-body acceleration in normal subjects and patients with bilateral loss of labyrinthine function. *Brain research bulletin* 1996;40:443-7; discussion 8-9.
30. Scherer H. Das Gleichgewicht. Berlin: Springer Verlag; 1997.
31. Mergner T, Siebold C, Schweigart G, et al. Human perception of horizontal turnk and head rotation in space during vestibular and neck stimulation. *Exp Brain Res* 1991;85:389-404.
32. Fernandez C, Goldberg JM. Physiology of peripheral neurons innervating otolith organs of the squirrel monkey. I. Response to static tilts and to long-duration centrifugal force. *Journal of neurophysiology* 1976;39:970-84.
33. Paige GD, Seidman SH. Characteristics of the VOR in response to linear acceleration. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1999;871:123-35.
34. Merfeld DM, Teiwes W, Clarke AH, et al. The dynamic contributions of the otolith organs to human ocular torsion. *Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale* 1996;110:315-21.
35. Imai T, Moore ST, Raphan T, et al. Interaction of the body, head, and eyes during walking and turning. *Exp Brain Res* 2001;136:1-18.
36. Schmidt R, Thews, G. *Physiologie des Menschen*. Berlin, Heidelberg, NY: Springer-Verlag; 1993.
37. Peterka RJ. Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of neurophysiology* 2002;88:1097-118.
38. Banks RW. An allometric analysis of the number of muscle spindles in mammalian skeletal muscles. *Journal of anatomy* 2006;208:753-68.
39. Christ B. Anatomische Besonderheiten des Halses. *Manuelle Med* 1993:67–6.
40. Voss H. Tabulation of the absolute and relative muscular spindle numbers in human skeletal musculature. *Anatomischer Anzeiger* 1971;129:562-72.



## Literaturverzeichnis

41. Richmond FJ, Bakker DA. Anatomical organization and sensory receptor content of soft tissues surrounding upper cervical vertebrae in the cat. *Journal of neurophysiology* 1982;48:49-61.
42. Bankoul S, Goto T, Yates B, et al. Cervical primary afferent input to vestibulospinal neurons projecting to the cervical dorsal horn: an anterograde and retrograde tracing study in the cat. *The Journal of comparative neurology* 1995;353:529-38.
43. Hülse M, Neuhuber, WL, Wolff, H. Die obere Halswirbelsäule. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2005.
44. Taylor JL. Perception of the orientation of the head on the body in man. Oxford University Press, New York 1992:488-90.
45. Fitzpatrick R, McCloskey DI. Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans. *The Journal of physiology* 1994;478 ( Pt 1):173-86.
46. Tjell C, Rosenhall U. Smooth pursuit neck torsion test: a specific test for cervical dizziness. *The American journal of otology* 1998;19:76-81.
47. Treleaven J, Jull G, LowChoy N. Smooth pursuit neck torsion test in whiplash-associated disorders: relationship to self-reports of neck pain and disability, dizziness and anxiety. *Journal of rehabilitation medicine: official journal of the UEMS European Board of Physical and Rehabilitation Medicine* 2005;37:219-23.
48. Putz R, Pabst, Sobotta, Atlas der Anatomie des Menschen. München, Wien, Baltimore: Urban&Schwarzenberg; 1993.
49. Neuhuber WL, Bankoul S. Der "Halsteil des Gleichgewichtsapparats"-Verbindung zervikaler Rezeptoren zu Vestibulariskernen. *Manuelle Med* 1992;30:53-7.
50. Treleaven J. Sensorimotor disturbances in neck disorders affecting postural stability, head and eye movement control. *Manual Therapy* 2008;13:2-11.
51. Ishiyama G. Imbalance and vertigo: the aging human vestibular periphery. *Seminars in neurology* 2009;29:491-9.
52. Chan YS, Lai CH, Shum DK. Spatial coding capacity of central otolith neurons. *Exp Brain Res* 2006;173:205-14.
53. Kelders WP, Kleinrensink GJ, van der Geest JN, et al. The cervico-ocular reflex is increased in whiplash injury patients. *J Neurotrauma* 2005;22:133-7.
54. Benninghoff A, Drenckhahn D. Anatomie, Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie. Elsevier München 2004;16. Auflage.

## Literaturverzeichnis

55. Anastasopoulos D, Mergner T. Canal-neck interaction in vestibular nuclear neurons of the cat. *Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale* 1982;46:269-80.
56. Matsushita M, Gao X, Yaginuma H. Spinovestibular projections in the rat, with particular reference to projections from the central cervical nucleus to the lateral vestibular nucleus. *The Journal of comparative neurology* 1995;361:334-4.
57. Thomson DB, Isu N, Wilson VJ. Responses of neurons of the cat central cervical nucleus to natural neck and vestibular stimulation. *Journal of neurophysiology* 1996;76:2786-89.
58. Holtmann S, Reiman V, Scherer H. Cervico-ocular eye movements in relation to different neck torsion velocities. *Acta oto-laryngologica Supplementum* 1989;468:191-6.
59. Bronstein AM, Hood JD. The cervico-ocular reflex in normal subjects and patients with absent vestibular function. *Brain Res* 1986;373:399-408.
60. Hülse M, Neuhuber WL, Wolff HD. *Der kranio-zervikale Übergang. Grundlagen, Klinik, Pathophysiologie.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; 1998.
61. Neuhuber WL, Zenker W. Central distribution of cervical primary afferents in the rat, with emphasis on proprioceptive projections to vestibular, perihypoglossal, and upper thoracic spinal nuclei. *The Journal of comparative neurology* 1989;280:231-53.
62. Rader AA, Oman CM, Merfeld DM. Motion perception during variable-radius swing motion in darkness. *Journal of neurophysiology* 2009;102:2232-44.
63. Hamann C, Schonfeld U, Clarke AH. Otolith-ocular reflex in linear acceleration of low frequencies. *HNO* 2001;49:818-24.
64. Green AM, Angelaki DE. Coordinate transformations and sensory integration in the detection of spatial orientation and self-motion: from models to experiments. *Prog Brain Res. Netherlands;* 2007:155-80.
65. Green AM, Shaikh AG, Angelaki DE. Sensory vestibular contributions to constructing internal models of self-motion. *Journal of neural engineering* 2005;2:S164-79.
66. Geisinger D, Ferreira E, Suarez A, et al. Head tilt response: A complementary test to the Subjective Visual Vertical. *Journal of vestibular research: equilibrium & orientation* 2010;20:381-9.

## Literaturverzeichnis

67. Parker DE. Spatial perception changes associated with space flight: implications for adaptation to altered inertial environments. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation* 2003;13:331-43.
68. Malmstrom EM, Karlberg M, Fransson PA, et al. Cervical proprioception is sufficient for head orientation after bilateral vestibular loss. *Eur J Appl Physiol* 2009;107:73-81.
69. Pinsault N, Vuillerme N, Pavan P. Cervicocephalic relocation test to the neutral head position: assessment in bilateral labyrinthine-defective and chronic, nontraumatic neck pain patients. *Archives of physical medicine and rehabilitation* 2008;89:2375-8.
70. Schweigart G, Chien RD, Mergner T. Neck proprioception compensates for age-related deterioration of vestibular self-motion perception. *Exp Brain Res* 2002;147:89-97.
71. Hirvonen TP, Aalto H, Pyykko I, et al. Changes in vestibulo-ocular reflex of elderly people. *Acta oto-laryngologica Supplementum* 1997;529:108-10.
72. Bartzokis G, Beckson M, Lu PH, et al. Age-related changes in frontal and temporal lobe volumes in men: a magnetic resonance imaging study. *Archives of general psychiatry* 2001;58:461-5.
73. McPartland JM, Brodeur RR, Hallgren RC. Chronic neck pain, standing balance, and suboccipital muscle atrophy--a pilot study. *Journal of manipulative and physiological therapeutics* 1997;20:24-9.
74. Wolff H. *Neurophysiologische Aspekte des Bewegungssystems*. Berlin, Heidelberg, NY: Springer-Verlag; 1996.
75. Graf M, Moll H., Harke G. Manuelle Diagnostik und Therapie der Halswirbelsäule. *Manuelle Medizin* 2010;48:6-15.
76. Kayser R, Heyde CE. Functional disorders and functional diseases in the region of the upper cervical spine particularly regarding the cervical joints. Current status and clinical relevance. *Orthopade* 2006;35:306-18.
77. Biesinger E. Diagnosis and therapy of vertebrogenic vertigo. *Laryngologie, Rhinologie, Otologie* 1987;66:32-6.
78. Graf M, Grill G, Wedig H.-D. *Beschleunigungsverletzung der Halswirbelsäule - HWS Schleudertrauma*: Steinkopff-Verlag; 2009.
79. Crowe HE. *Injuries to the cervical spine*. Western Orthopaedic Association 1928.

## Literaturverzeichnis

80. Barré JA, Lieou L.C. Le syndrome sympathique arvieale postérieure, . Strasburg: Schuler & Kind; 1927.
81. Nylén CO. Experimenteller Kopflagenystagmus. Acta Oto-Laryngologica 1926.
82. Hassenstein B. Der Kopfgelenkbereich im Funktionsgefüge der Raumorientierung: systemtheoretische bzw. biokybernetische Gesichtspunkte. In: Wulff HD, ed. Die Sonderstellung des Kopfbereichs-Grundlagen, Klinik, Begutachtung. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag; 1988:1-18.
83. Hülse M, Hölzl M. The efficiency of spinal manipulation in otorhinolaryngology. A retrospective long-term study. HNO 2004;52:227-34.
84. Hölzl M, Gabel P, Weikert S, et al. Influence of different head-trunk positions to the upbeat-nystagmus. Laryngorhinootologie 2009;88:92-100.
85. Endo K, Suzuki H, Yamamoto K. Consciously postural sway and cervical vertigo after whiplash injury. Spine 2008;33:E539-42.
86. Heikkilä HV, Wenngrén BI. Cervicocephalic kinesthetic sensibility, active range of cervical motion, and oculomotor function in patients with whiplash injury. Archives of physical medicine and rehabilitation 1998;79:1089-94.
87. Teng CC, Chai H, Lai DM, et al. Cervicocephalic kinesthetic sensibility in young and middle-aged adults with or without a history of mild neck pain. Manual Therapy 2007;12:22-8.
88. Revel M, André-Deshays C, Minguet M. Cervicocephalic kinesthetic sensibility in patients with cervical pain. Archives of physical medicine and rehabilitation 1991;72:288-91.
89. Treleaven J, Jull G, Sterling M. Dizziness and unsteadiness following whiplash injury: characteristic features and relationship with cervical joint position error. Journal of rehabilitation medicine: official journal of the UEMS European Board of Physical and Rehabilitation Medicine 2003;35:36-43.
90. Weikert S, Gabel P, Orawa H, et al. Investigations concerning the head-trunk-coordination. Laryngo-Rhino-Otologie 2008;87:245-51.
91. Volle E, Montazem A. MRI video diagnosis and surgical therapy of soft tissue trauma to the craniocervical junction. Ear, nose, & throat journal 2001;80:41-4, 6-8.
92. Anderson SE, Boesch C, Zimmermann H, et al. Are There Cervical Spine Findings at MR Imaging That Are Specific to Acute Symptomatic Whiplash Injury? A

## Literaturverzeichnis

- Prospective Controlled Study with Four Experienced Blinded Readers. *Radiology* 2012;262:567-75.
93. Wilson VJ, Maeda M, Franck JI, et al. Mossy fiber neck and second-order labyrinthine projections to cat flocculus. *Journal of neurophysiology* 1976;39:301-10.
  94. Lord SM, Barnsley L, Bogduk N. The utility of comparative local anesthetic blocks versus placebo-controlled blocks for the diagnosis of cervical zygapophysial joint pain. *The Clinical journal of pain* 1995;11:208-13.
  95. Liu JX, Thornell LE, Pedrosa-Domellof F. Muscle spindles in the deep muscles of the human neck: a morphological and immunocytochemical study. *The journal of histochemistry and cytochemistry: official journal of the Histochemistry Society* 2003;51:175-86.
  96. Prushansky T, Pevzner E, Gordon C, et al. Cervical radiofrequency neurotomy in patients with chronic whiplash: a study of multiple outcome measures. *Journal of neurosurgery Spine* 2006;4:365-73.
  97. MacVicar J, Borowczyk JM, MacVicar AM, et al. Cervical medial branch radiofrequency neurotomy in New Zealand. *Pain medicine* 2012;13:647-54.
  98. Frenzel H. Spontan- und Provokationsnystagmus als Krankheits-Symptom. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; 1955.
  99. Pschyrembel. *Klinisches Wörterbuch*. New York: Walter de Gruyter; 2010.
  100. Helmchen C, Büttner U., Dietrich M. Vestibular Eye Movements and their Disorders (Nystagmus, VOR, Deficits, Tonic Deficits). *Klin Neurophysiol* 2000;31:237-46.
  101. Pierrot-Deseilligny C, Milea D. Vertical nystagmus: clinical facts and hypotheses. *Brain* 2005;128:1237-46.
  102. Kobayashi Y, Yagi T, Kamio T. Cervico-vestibular interaction in eye movements. *Auris, nasus, larynx* 1986;13 Suppl 2:S87-95.
  103. Barlow D, Freedman W. Cervico-ocular reflex in the normal adult. *Acta Otolaryngol* 1980;89:487-96.
  104. Carmona S, Nieto D. The specificity and sensitivity of uninhibited COR in labyrinthine-defective patients. *Ann N Y Acad Sci* 2005;1039:508-12.
  105. Kelders WP, Kleinrensink GJ, van der Geest JN, et al. Compensatory increase of the cervico-ocular reflex with age in healthy humans. *The Journal of physiology* 2003;553:311-7.

## Literaturverzeichnis

106. Gdowski GT, Belton T, McCrea RA. The neurophysiological substrate for the cervico-ocular reflex in the squirrel monkey. *Exp Brain Res* 2001;140:253-64.
107. Montfoort I, Kelders WPA, van der Geest JN, et al. Interaction between ocular stabilization reflexes in patients with whiplash injury. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 2006;47:2881-4.
108. Doerr M, Thoden U. Eye movements during voluntary head motion with minimized cervical input. *Archives of oto-rhino-laryngology* 1989;246:20-5.
109. Helmchen C. Zentraler Schwindel. *Med Welt* 2007;58.
110. Dutia MB. The muscles and joints of the neck: their specialisation and role in head movement. *Progress in neurobiology* 1991;37:165-78.
111. Mouton LJ, Eggens-Meijer E, Klop EM. The ventrolateral upper cervical cell group in cat projects to all rostrocaudal levels of the periaqueductal gray matter. *Brain research* 2009;1300:79-96.
112. Hirai N, Hongo T, Sasaki S, et al. Neck muscle afferent input to spinocerebellar tract cells of the central cervical nucleus in the cat. *Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale* 1984;55:286-300.
113. Gauchard GC, Vancon G, Meyer P, et al. On the role of knee joint in balance control and postural strategies: effects of total knee replacement in elderly subjects with knee osteoarthritis. *Gait & posture* 2010;32:155-60.
114. Kogler A, Lindfors J, Odkvist LM, et al. Postural stability using different neck positions in normal subjects and patients with neck trauma. *Acta Oto-Laryngologica* 2000;120:151-5.
115. Hülse M, Hölzl M. Vestibulospinal reactions in cervicogenic disequilibrium. Cervicogenic imbalance. *HNO* 2000;48:295-301.
116. Palm HG, Waitz O, Strobel J, et al. Effects of low-dose alcohol consumption on postural control with a particular focus on the role of the visual system. *Motor control* 2010;14:265-76.
117. Holmberg J, Karlberg M, Fransson PA, et al. Phobic postural vertigo: body sway during vibratory proprioceptive stimulation. *Neuroreport* 2003;14:1007-11.
118. Aydog E, Bal A, Aydog ST, et al. Evaluation of dynamic postural balance using the Biodex Stability System in rheumatoid arthritis patients. *Clinical rheumatology* 2006;25:462-7.
119. Romberg M. *Lehrbuch der Nervenkrankheiten des Menschen*. Berlin: Duncker; 1851.

## Literaturverzeichnis

120. Claussen CF. Der Schwindelkranke Patient - Grundlagen der Neurootologie und Äquilibrimetrie, . Hamburg: Edition m + p; 1992.
121. Diener HC, Dichgans J. Applications and uses of static and dynamic measurement of posture (posturography). Fortschritte der Neurologie-Psychiatrie 1988;56:249-58.
122. Luzerner Messplatte. Happersberger Otopront GmbH. (Accessed March 6, 2012, at <http://www.otopront.de/de/home/produkte/diagnose-und-therapie/luzerner-messplatte.html>.)
123. Unterberger S. Neue objektiv registrierbare Vestibularis-Körperdrehreaktion, erhalten durch Treten auf der Stelle. Der "Tretversuch". European Archives of Oto-Rhino-Laryngology 1938;145:478-92.
124. Claussen CF. Der Schwindelkranke und seine neurootologische Begutachtung. Hamburg: Edition m+p; 1976.
125. Claussen CF, Von Lümann, M. Das Elektronystagmogramm und die neurootologische Kennliniendiagnostik – Hinweise für praktische Untersuchung und Therapie von Schwindelkranken. Hamburg, Neu-Isenburg: Edition m+p; 1975.
126. Naguib MB, Madian Y, Refaat M, et al. Characterisation and objective monitoring of balance disorders following head trauma, using videonystagmography. The Journal of laryngology and otology 2012;126:26-33.
127. Takahashi J, Kitamura K, Miyata M. Spontaneous nystagmus in normal subjects. ORL; journal for oto-rhino-laryngology and its related specialties 1996;58:42-5.
128. Software SM. (Accessed June 10, 2013, at <http://www.posersmithmicro.com>)
129. Jacobson GP, Newman CW. The development of the dizziness handicap inventory. Archives of Otolaryngology-Head & Neck Surgery 1990;116:424-7.
130. Reid SA, Rivett DA, Katekar MG, et al. Sustained natural apophyseal glides (SNAGs) are an effective treatment for cervicogenic dizziness. Manual Therapy 2008;13:357-66.
131. Bayat A, Pourbakht A, Saki N, et al. Vestibular rehabilitation outcomes in the elderly with chronic vestibular dysfunction. Iranian Red Crescent medical journal 2012;14:705-8.
132. Ernst A FWB. Funktionsstörungen im Kopf-Hals-Bereich: Georg Thieme Verlag; 2007.
133. Halmagyi GM. Diagnosis and management of vertigo. Clin Med 2005;5:159-65.

## Literaturverzeichnis

134. Claussen CF, Aust G, Schäfer W.D., von Schlachta I. Atlas der Elektronystagmusgraphie. Hamburg: Medicin + Pharmacie Edition m+p; 1986.
135. Tianwu H, Watanabe Y, Asai M, et al. Effects of alcohol ingestion on vestibular function in postural control. *Acta oto-laryngologica Supplementum* 1995;519:127-31.
136. Mulch G, Lewitzki W. Spontaneous and positional nystagmus in healthy persons demonstrated only by electronystagmography: physiological spontaneous nystagmus or "functional scar"? *Archives of oto-rhino-laryngology* 1977;215:135-45.
137. Benvenuti F, Mecacci R, Gineprari I, et al. Kinematic characteristics of standing disequilibrium: reliability and validity of a posturographic protocol. *Archives of physical medicine and rehabilitation* 1999;80:278-87.
138. Woodhouse A, Liljebäck P, Vasseljen O. Reduced head steadiness in whiplash compared with non-traumatic neck pain. *Journal of rehabilitation medicine : official journal of the UEMS European Board of Physical and Rehabilitation Medicine* 2010;42:35-41.
139. Taniewski M. Vestibulo-spinal and vestibulo-ocular reflexes in athletes. *Otolaryngologia polska The Polish otolaryngology* 1995;49:31-8.
140. Lindemann U, Rupp K, Mücke R, et al. Improving balance by improving motor skills. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie* 2004;37:20-6.
141. Olszewski J, Repetowski M. Clinical analysis in patients with cervical vertigo in ENT. *Otolaryngologia polska The Polish otolaryngology* 2008;62:283-7.
142. Reker U. Cervical nystagmus caused by proprioceptors of the neck. *Laryngologie, Rhinologie, Otologie* 1983;62:312-4.
143. Scherer H. Neck-induced vertigo. *Arch Otorhinolaryngol Suppl* 1985;2:107-24.
144. Des Courtis A, Castrillon R, Haenggeli CA, et al. Evaluation of subjectivity in the interpretation of videonystagmography. *Acta Oto-Laryngologica* 2008;128:892-5.
145. Bisdorff AR, Sancovic S, Debatisse D, et al. Positional nystagmus in the dark in normal subjects. *Neuro-ophthalmology* 2000;24:283-90.
146. Mandellos D, Anastasopoulos D, Becker W. Smooth pursuit rather than visual signals mediate short-term adaptation of the cervico-ocular reflex in humans. *Exp Brain Res* 2006;169:153-61.
147. Halmagyi GM, Leigh RJ. Upbeat about downbeat nystagmus. *Neurology* 2004;63:606-7.



## Literaturverzeichnis

148. Pierrot-Deseilligny C, Gaymard B. Smooth pursuit disorders. *Bailliere's clinical neurology* 1992;1:435-54.
149. Pierrot-Deseilligny C. Effect of Gravity on Vertical Eye Position. In: *Basic and Clinical Aspects of Vertigo and Dizziness*; 2009:155-65.
150. Leigh RJ. Human vestibular cortex. *Annals of Neurology* 1994;35:383-4.
151. Wiksten B. Further studies on the fiber connections of the central cervical nucleus in the cat. *Exp Brain Res* 1987;67:284-90.
152. Goltz HC, Irving EL, Steinbach MJ, et al. Vertical eye position control in darkness: orbital position and body orientation interact to modulate drift velocity. *Vision research* 1997;37:789-98.
153. McAuley JR, Dickman JD, Mustain W, et al. Positional nystagmus in asymptomatic human subjects. *Otolaryngology--head and neck surgery: official journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery* 1996;114:545-53.
154. Marti S, Palla A, Straumann D. Gravity dependence of ocular drift in patients with cerebellar downbeat nystagmus. *Annals of Neurology* 2002;52:712-21.
155. Wagner JN, Glaser M, Brandt T, et al. Downbeat nystagmus: aetiology and comorbidity in 117 patients. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry* 2008;79:672-7.
156. Hölzl M. *Evaluation halspropriozeptiver Leistungen bei Patienten mit Schwindelbeschwerden*. Berlin: Charité - Universitätsmedizin Berlin; 2008.
157. Reid SA, Rivett DA, Katekar MG, et al. Efficacy of manual therapy treatments for people with cervicogenic dizziness and pain: protocol of a randomised controlled trial. *BMC musculoskeletal disorders* 2012;13:201.

## 7 Anhang

### 7.1 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ca.	circa
CCD	Charge-coupled device
CCG	Kraniokorpographie
CCN	Nucleus cervicalis centralis
cm	Zentimeter
COR	Zervikookulärer Reflex
CPN	Zervikaler Provokationsnystagmus
CPU	Central Processing Unit
CRFN	Zervikale Radiofrequenz Neurotomie
CT	Computertomographie
C-TENS	Zervikale transkutane Elektronervenstimulation
DBN	Downbeat-Nystagmus
DHI	Dizziness Handicap Inventory
dpt	Dioptrie
ENG	Elektronystagmographie
Gruppe <sup>26</sup>	Probandengruppe mit dem Altersmedian 26
Gruppe <sup>50</sup>	Probandengruppe mit dem Altersmedian 50
GSO	Golgi-Sehnen-Organ
HN	Horizontalnystagmus
HNO	Hals-Nasen-Ohren
HWS	Halswirbelsäule
Hz	Hertz ( $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1} = 1/\text{s}$ )
kg	Kilogramm
KKS	Kraniozervikale kinästhetische Sensibilität
kp	Kilopond
L-VOR	Linearer vestibulookulärer Reflex
M	Mittelwert
M.	Musculus
Md	Median

min	Minuten
MRT	Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunde
n	Anzahl der Probanden
Nucl.	Nucleus
OKN	Optokinetischer Nystagmus
OOR	Otolithokulärer Reflex
PN	Provokationsnystagmus
PUG	Posturographie
RM	Rückenmark
s	Sekunden
SD	Standardabweichung
SMI	SensoMotoric Instruments
SNAGs	Sustained natural apophyseal glides
SPN	Spontannystagmus
UBN	Upbeat-Nystagmus
VAS	Visuelle Analogskala
VKK	Vestibulariskernkomplex
VN	Vertikalnystagmus
VOG	Videookulographie
VOR	Vestibulookulärer Reflex
ZNS	Zentrales Nervensystem
1D-HDT	Eindimensionaler Halsdrehtest
3D-HDT	Dreidimensionaler Halsdrehtest
3D-RES	Dreidimensionaler Rumpfxkursionsstuhl

### **7.2 Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Darstellung der Lage des Innenohrs

Abbildung 2: Darstellung der Reaktion von Ampulle und Cupula bei Drehbewegung des Kopfes

Abbildung 3: Darstellung der Auswirkung von Beschleunigung auf Macula utriculi und sacculi

Abbildung 4: Afferente und efferente Verschaltung der Muskelspindel <sup>36</sup>

## Anhang

- Abbildung 5: Die Muskelansätze der 5 kurzen Muskeln am Atlasquerfortsatz <sup>48</sup>
- Abbildung 6: Beeinträchtigungsmechanismen des zervikalen somatosensorischen Inputs bei Funktionsstörungen des Nackens nach Treleaven <sup>50</sup>
- Abbildung 7: Darstellung der Afferenzen zum Vestibulariskernkomplex <sup>54</sup>
- Abbildung 8: Die vestibuläre Untersuchungssituation im 3D-Rumpfxursionsstuhl
- Abbildung 9: Der Bildschirm und die Messplattform der Firma Otopront <sup>122</sup>
- Abbildung 10: Durchführung des Irisscans
- Abbildung 11: Die Eichwinkel (gelbe Balken) der neun Punkte auf dem Eichkreuz
- Abbildung 12: Die dreidimensionale Videookulographie (3D-VOG)
- Abbildung 13: Darstellung der Kopfpositionen in der 3D-HDT-Methode <sup>128</sup>
- Abbildung 14: Der dreidimensionale Rumpfxursionsstuhl
- Abbildung 15: Darstellung der einzelnen Rumpfpositionen mit dem 3D-RES <sup>128</sup>
- Abbildung 16: Beispielhafte Darstellung der Winkelabweichung des Kopfes im Helm
- Abbildung 17: Darstellung der Rumpfpositionen in der 3D-RES-Methode
- Abbildung 18: Ausgangsposition im subjektiven Nulldurchgang der Kopfgelenke
- Abbildung 19: Darstellung des Versuchsablaufs
- Abbildung 20: Auswertung des Differenzvergleichs von Spontan- (SPN) zu Provokationsnystagmus (CPN) je Methode am Beispiel der Rechtskipfung
- Abbildung 21: Auswertung des Altersgruppenvergleichs in zervikotonischer Provokationsposition je Methode am Beispiel der Flexion
- Abbildung 22: Auswertung des Methodenvergleichs in zervikotonischer Provokationsposition bei variablem Schwerkraftvektor am Beispiel der Flexion
- Abbildung 23: Ergebnisse im Romberg-Stehversuch
- Abbildung 24: Ergebnisse im Unterberger-Tretversuch
- Abbildung 25: Darstellung des Altersgruppenvergleichs mittels 3D-HDT-Methode in den zervikalen Provokationspositionen Gesamt, Flexion und Kippung anhand des Scoresystems
- Abbildung 26: Altersgruppenvergleich der UBN und DBN der 3D-HDT-Methode
- Abbildung 27: Altersgruppenvergleich der UBN und DBN der 3D-HDT-Methode in den Positionen Kopfflexion und Kopfkipfung
- Abbildung 28: Darstellung des Altersgruppenvergleichs mittels 3D-RES-Methode in den

## Anhang

Positionen Gesamt, Flexion, Kippung und Torsion anhand des Scoresystems

Abbildung 29: Darstellung des Methodenvergleichs „Gesamt“ anhand des Scoresystems

Abbildung 30: Darstellung des Methodenvergleichs in den Positionen „Kippung“ und „Flexion“ anhand des Scoresystems

Abbildung 31: Darstellung des Methodenvergleichs „Gesamt“ bei Gruppe<sup>26</sup> anhand des Scoresystems

Abbildung 32: Darstellung des Methodenvergleichs in den Positionen „Kippung“ und „Flexion“ bei Gruppe<sup>26</sup> anhand des Scoresystems

Abbildung 33: Darstellung des Methodenvergleichs „Gesamt“ bei Gruppe<sup>50</sup> anhand des Scoresystems

Abbildung 34: Darstellung des Methodenvergleichs in den Positionen „Flexion“ und „Kippung“ bei Gruppe<sup>50</sup> anhand des Scoresystems

Abbildung 35: Der Altersgruppenvergleich im subjektiven Nulldurchgang der 3D-HDT-Methode

### 7.3 Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Die Rezeptortypen und ihre Afferenzen
- Tabelle 2: Bezeichnungen für die zervikale Missempfindung
- Tabelle 3: Einteilung zervikaler Funktionsstörungen nach Kayser et al.<sup>75</sup>
- Tabelle 4: Forschungsansätze zu der zervikalen Afferenz
- Tabelle 5: Winkelabweichung des Kopfes im Helm bei Auslenkung im 3D-RES
- Tabelle 6: Durchschnittliches Bewegungsausmaß der Halswirbelsäule<sup>131</sup>
- Tabelle 7: Deskriptive Stichprobenbeschreibung
- Tabelle 8: Nystagmuskategorien und deren Einteilung im Punktescore
- Tabelle 9: Schematische Darstellung der Score-Punktebewertung
- Tabelle 10: Darstellung des Altersgruppenvergleichs
- Tabelle 11: Torsionsabweichung der Probanden in Grad im Unterberger-Tretversuch
- Tabelle 12: Darstellung der absoluten Häufigkeiten und der Verteilung von horizontalen und vertikalen Nystagmen
- Tabelle 13: Statistische Kennwerte der 3D-HDT-Methode vor und während zervikaler

## Anhang

Provokation durch Kopfauslenkung bei Probanden anhand des Scoresystems

Tabelle 14: Statistische Kennwerte der 3D-HDT-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Kopfauslenkung der Gruppe<sup>26</sup> anhand des Scoresystems

Tabelle 15: Statistische Kennwerte der 3D-HDT-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Kopfauslenkung der Gruppe<sup>50</sup> anhand des Scoresystems

Tabelle 16: Darstellung der Häufigkeiten horizontaler und vertikaler (Upbeat- und Downbeat-) Nystagmen in den verschiedenen zervikalen Provokationspositionen mit der 3D-HDT-Methode

Tabelle 17: Statistische Kennwerte der 3D-RES-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Rumpfauslenkung bei Probanden anhand des Scoresystems

Tabelle 18: Statistische Kennwerte der 3D-RES-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Rumpfauslenkung der Gruppe<sup>26</sup> anhand des Scoresystems

Tabelle 19: Statistische Kennwerte der 3D-RES-Methode vor und während zervikaler Provokation durch Rumpfauslenkung der Gruppe<sup>50</sup> anhand des Scoresystems

Tabelle 20: Maßnahmen zur Behandlung von zervikalen Schwindelbeschwerden

## 7.4 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Annabelle Victoria Lappat, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Grundlagenuntersuchung der zervikovegetibulären Afferenzen in Abhängigkeit zu Schwerkraftrichtung und Probandenalter“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -[www.icmje.org](http://www.icmje.org)) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

## **7.5 Lebenslauf**

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.



## **Danksagung**

Herrn Privatdozent Dr. med. Matthias Hölzl danke ich sehr herzlich für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas, die umfangreichen und konstruktiven Diskussionen sowie engagierte Förderung zur Fertigstellung dieser Arbeit.

Ebenso danke ich Sabrina Rauschenberger, welche mich in die Bedienung und Auswertung der VOG-System und PUG-Messplatte einführte, Murad Tukhtaev, welcher mir in die Untersuchung der Halswirbelsäule erläuterte und Herrn Bischoff für die Hilfe bei der Erstellung von Grafiken und technischen Installationen am Rumpfxkursionsstuhl. Auch meiner guten Freundin Linda Dorn gilt besonderer Dank, für die kreativen Anregungen und das Teamwork in jeder Phase unserer Arbeiten.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei allen Probanden und Mitarbeitern der Audiologie, die an diesem Projekt mitgewirkt haben.

Ich möchte an dieser Stelle einen ganz besonderen Dank an meine Freundin Priv. Doz. Dr. rer. med. Tamara Fischmann richten. Ohne ihre Aufmunterungen, ihre konstruktive Kritik und ihre technische sowie wissenschaftliche Expertise wäre ich nicht soweit gekommen. Meinem Freund Fredrik gilt hier auch ein großer Dank für seine unendliche Geduld, sein andauerndes Verständnis, seinen Glauben an mich und die aufopferungsvolle Mithilfe, welche maßgeblich zur Fertigstellung der Arbeit beigetragen haben.

Zuletzt gilt mein Dank meiner großartigen Familie, die in jeder Phase meines Studiums und meiner Promotion mit uneingeschränkter Unterstützung an meiner Seite war.

Ohne Euch wäre es mir nie gelungen! Vielen Dank!