

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

DISSERTATION

Grundlagenuntersuchung der zervikovestibulären Afferenzen in  
einer placebokontrollierten klinischen Studie mit monophasischer  
zervikaler transkutaner Elektronervenstimulation

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Linda Josephine Dorn

aus Berlin

Gutachter/in:       1. PD Dr. med. Matthias Hölzl  
                          2. Prof. Dr. med. Markus Jungehülsing  
                          3. Prof. Dr. med. Birgit Mazurek

Datum der Promotion: 30.11.2012

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 Einführung</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2 Anatomische Grundlagen zur zervikovegetibulären Affferenz</b> .....	<b>5</b>
<b>1.3 Klinische Befunde bei zervikaler propriozeptiver Missempfindung</b> .....	<b>13</b>
<b>1.4 Überblick über die Historie und die bisherigen Forschungsergebnisse</b> .....	<b>15</b>
1.4.1 Bisherige diagnostische Ansätze.....	20
<b>1.5 Neuer diagnostischer Ansatz und Herleitung der Arbeitshypothese</b> .....	<b>22</b>
<b>2 MATERIAL UND METHODIK</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 Beschreibungen des Untersuchungskollektivs</b> .....	<b>27</b>
2.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien .....	27
2.1.2 Epidemiologische Charakteristika der Untersuchungskollektive.....	28
<b>2.2 Der Versuchsaufbau</b> .....	<b>30</b>
<b>2.3 Die Untersuchungsmethoden</b> .....	<b>32</b>
2.3.1 Der dreidimensionale Rumpfkursionsstuhl .....	32
2.3.2 Die Posturographie-Messplatte .....	36
2.3.3 Die dreidimensionale Videookulographie.....	39
2.3.4 Die zervikale transkutane Elektronervenstimulation .....	45
2.3.5 Das Gelkissen .....	48
<b>2.4 Datenerhebung und deren statistische Analyse</b> .....	<b>48</b>
<b>3 ERGEBNISSE</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1 Ergebnisteil A: Evaluation der Methodik</b> .....	<b>52</b>
<b>3.2 Ergebnisteil B: Die Erhebung der extraokulären Untersuchungsparamter</b> .....	<b>55</b>
3.2.1 Der Dizziness Handicap Inventory .....	53
3.2.2 Vestibulospinaler Untersuchungsparameter:Teil 1: Die Posturographie- Messplatte .....	55
3.2.3 Vestibulospinaler Untersuchungsparamater Teil 2: Der Unterberger- Tretversuch .....	57
<b>3.3 Ergebnisteil C: Die Erhebung der okulären Untersuchungsparameter</b> .....	<b>58</b>
3.3.1 Analyse der zervikotonen Provokationshaltungen im Vergleich zum Spontannystagmus.....	58
<b>3.4 Ergebnisteil D: Anwendung der zervikalen transkutanenen Nervenstimulation auf dem dreidimensionalen- Rumpfkursionsstuhl</b> .....	<b>62</b>
3.4.1 Einfluss der placebokontrollierten C-TENS Anwendung auf den Spontannystagmus.....	62
3.4.2 Der Effekt der C-TENS Behandlung auf die Nystagmusaktivität auf dem dreidimensionalen- Rumpfkursionsstuhl abhängig von verschiedenen Rumpfkursion .....	66
<b>3.5 Ergebnisteil E: Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität auf dem dreidimensionalen- Rumpfkursionsstuhl</b> .....	<b>72</b>

<b>4</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>Die Zerviko-okulärer Reaktion .....</b>	<b>78</b>
<b>4.2</b>	<b>Diskussionen der Methodik .....</b>	<b>84</b>
4.2.1	Der Dizziness Handicap Inventory.....	84
4.2.2	Der dreidimensionale- Rumpfkursionsstuhl.....	84
4.2.3	Die dreidimensionale- Videookulographie .....	88
4.2.4	Die zervikale Transkutane Elektronervenstimulation .....	89
<b>4.3</b>	<b>Die vestibulospinalen Untersuchungsparameter .....</b>	<b>93</b>
4.3.1	Die Posturographie- Messplatte .....	93
4.3.2	Der Unterberg´sche- Tretversuch .....	95
<b>4.4</b>	<b>Die okulären Untersuchungsparameter auf dem dreidimensionalen- Rumpfkursionsstuhl .....</b>	<b>96</b>
4.4.1	Der zervikotone Provokationsnystagmus bei jungen, vestibulär Gesunden .....	97
4.4.2	Einfluss der placebokontrollierten C-TENS- Anwendung auf die auf dem dreidimensionalen- Rumpfkursionsstuhl erhobenen Ergebnisse .....	97
<b>4.5</b>	<b>Die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität auf dem dreidimensionalen- Rumpfkursionsstuhl.....</b>	<b>100</b>
<b>4.6</b>	<b>Diagnostische und therapeutische Gesichtspunkte und klinische Relevanz.....</b>	<b>103</b>
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>108</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>120</b>
<b>7.1</b>	<b>Probandeninformation .....</b>	<b>120</b>
<b>7.2</b>	<b>Probandeneinwilligungserklärung.....</b>	<b>122</b>
<b>7.3</b>	<b>Dizziness Handicap Inventory .....</b>	<b>124</b>
<b>7.4</b>	<b>HWS-Untersuchungsbogen .....</b>	<b>125</b>
<b>7.5</b>	<b>Winkelabweichungsbemessung im dreidimensionalen- Rumpfkursionsstuhl .....</b>	<b>126</b>
<b>7.6</b>	<b>Nystagmusauswertungsbogen.....</b>	<b>128</b>
<b>7.7</b>	<b>Posturographie- Messplatte Auswertung .....</b>	<b>129</b>
<b>7.8</b>	<b>Dokumentation des Parästhesiemusters der Head´schen Zonen .....</b>	<b>130</b>
	<b>DANKSAGUNG .....</b>	
	<b>PUBLIKATIONSLISTE.....</b>	
	<b>ERKLÄRUNG AN EIDES STATT .....</b>	

**ABKÜRZUNGEN**

<b>A.</b>	Arteria
<b>BPLS</b>	benigner paroxysmaler Lagerungsschwindel
<b>CCG</b>	Craniocorpurographie
<b>CCN</b>	Nucleus cervicalis centralis
<b>COR</b>	Zerviko-okulärer Reflex
<b>C-PN</b>	zervikaler Provokationsnystagmus
<b>CRFN</b>	zervikale Radiofrequenz- Neurotomie
<b>C-TENS</b>	zervikale transkutane Elektronervenstimulation
<b>DHI</b>	Dizziness Handicape Inventory
<b>ENG</b>	Elektronystagmographie
<b>GSO</b>	Golgi-Sehnen-Organ
<b>HDT</b>	Halsdrehtest
<b>HN</b>	Horizontalnystagmus
<b>HNO</b>	Hals-, Nasen-, Ohren
<b>Hrsg</b>	Herausgegeben
<b>HWS</b>	Halswirbelsäule
<b>IN</b>	Interneuron
<b>M.</b>	Morbus
<b>MN</b>	Motoneuron
<b>N.</b>	Nervus
<b>Nucl.</b>	Nucleus
<b>OKN</b>	Optokinetischer Reflex
<b>PUG</b>	Posturographie
<b>RM</b>	Rückenmark
<b>Rr.</b>	Rami
<b>SHT</b>	Schleuderhirntrauma/ Whiplash Injury/ Beschleunigungstrauma
<b>Sp</b>	Stichprobe
<b>SPN</b>	Spontannystagmus
<b>TENS</b>	Transkutane Elektronervenstimulation
<b>u. U.</b>	unter Umständen
<b>WDR Neuron</b>	wide dynamic range-Neuron
<b>VAS</b>	Visuelle Analogskala

<b>VKK</b>	Vestibulariskernkomplex
<b>VN</b>	Vertikalnystagmus
<b>VOG</b>	Videookulographie
<b>VOR</b>	Vestibulo-okulärer Reflex
<b>z. B.</b>	zum Beispiel

**Einheiten**

<b>cm</b>	Zentimeter
<b>Hz</b>	Hertz ( $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1} = 1/\text{s}$ )
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>mA</b>	Milliampere ( $10^{-3}$ Ampere (A), $A = 1 \text{ Coulomb(C)}/\text{s}$ )
<b>min</b>	Minuten
<b>ms</b>	Millisekunden
<b>μs</b>	Mikrosekunden ( $10^{-6}$ s)
<b>kp</b>	Kilopound ( $1 \text{ N (Newton)} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \approx 0,102 \text{ kp}$ )
<b>s</b>	Sekunden

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Einführung

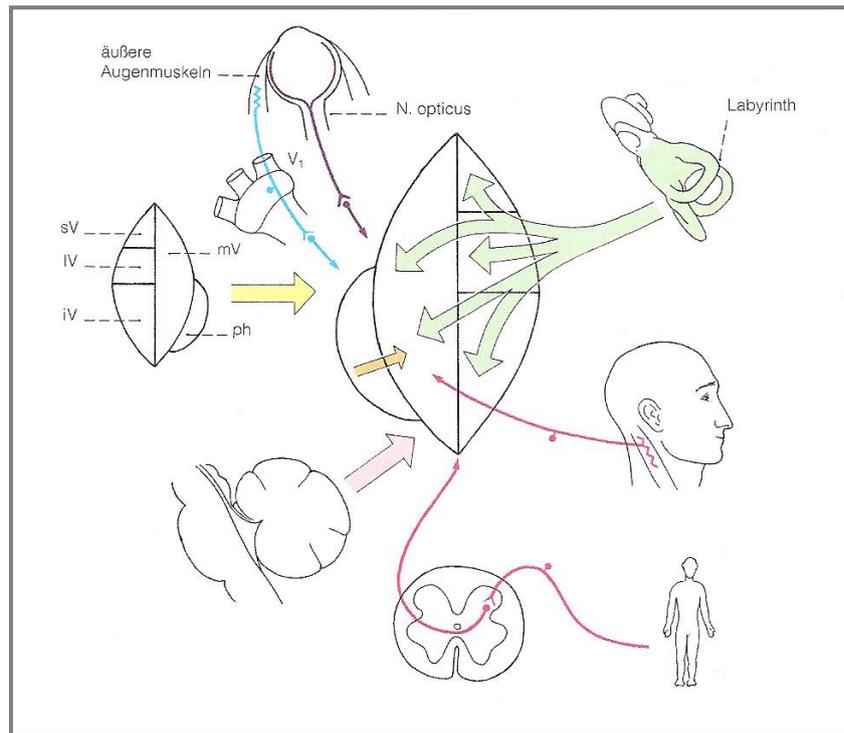
Schwindel ist keine einheitliche Krankheit, sondern umfasst multisensorische und sensomotorische Symptome unterschiedlicher Pathogenese und Ätiologie [Strupp (2008)]. Neben Kopfschmerzen stellt Schwindel eines der häufigsten klinischen Leitsymptome mit einer Lebenszeitprävalenz von 20 – 30 % dar. [Neuhauser (2007)]

Nach heutiger Auffassung ist Schwindel als das Ergebnis eines Konfliktes zwischen unterschiedlichen Meldungen aus verschiedenen Sinnesorganen zu verstehen. Treffen differente Informationen aus verschiedenen Sinneskanälen in den Zentren des Orientierungs- und Gleichgewichtssystems ein, wird dieses „Mismatch“ als Erregungsmuster zur Hirnrinde weitergeleitet, wo dann die Schwindelwahrnehmung entsteht [Hamann (2001)].

Die Feststellung der Körperhaltung und die Orientierung im Raum werden durch ein komplexes Zusammenwirken verschiedener Systeme gewährleistet. Hierzu erhält das Individuum über afferente Bahnen vestibuläre, auditive, propriozeptive und visuelle Informationen, die zentral unter Einbeziehung des kognitiven Systems verarbeitet werden. Über abgestimmte Reaktionen und Reflexe wird der Blick gerichtet, stabilisiert und die Körperbalance gehalten.

Festzustellen ist, dass sich die Diagnostik der vestibulär relevanten Rezeptorfunktionen weiter verbessert hat. Lediglich bei der vestibulär relevanten somatosensiblen Rezeptorleistung fehlten in der aktuellen Literatur ausreichende Evidenzen für objektive Messparameter für diagnostische Zwecke [Hölzl (2009)]. Dies könnte erklären, warum bis heute weiterhin unvereinbare Ansichten über die Relevanz somatosensibler Rezeptoren einander gegenüber stehen.

Befürworter der relevanten zervikalen Somatosensibilität argumentieren, dass für eine leistungsfähige Raumorientierung die schon sehr präzisen intrakraniellen Informationen über die Kopf-im-Raum-Position mit weiteren extrakraniellen Sensorinformationen unterstützt werden müssen. Denn die Halspropriozeptoren erweitern hierbei als extrakranielle Sensoren die Erfassung der Kopf-Rumpf-Koordination, und zwar durch phasische wie tonische Informationen aus der suboccipitalen Muskulatur die Stellungsinformationen der Gelenke, die die Winkelbeziehung Kopf-zu-Rumpf wiedergeben [Detjeen (2005)]. Die neuroanatomischen Grundlagen und Verschaltungswege sind neben der Erkenntnis, dass die Somatosensibilität eine Informationsquelle für das vestibuläre System bildet, bekannt und unumstritten (Abb. 1) [Mergner (1982)]; [Neuhuber (1998)]; [Thoden (1979)]. In Tierversuchen lässt sich zeigen, dass Propriozeptoren im Bereich der Kopfgelenke eine neuroanatomische Verbindung zu den Vestibulariskernen besitzen [Neuhuber (1998)].



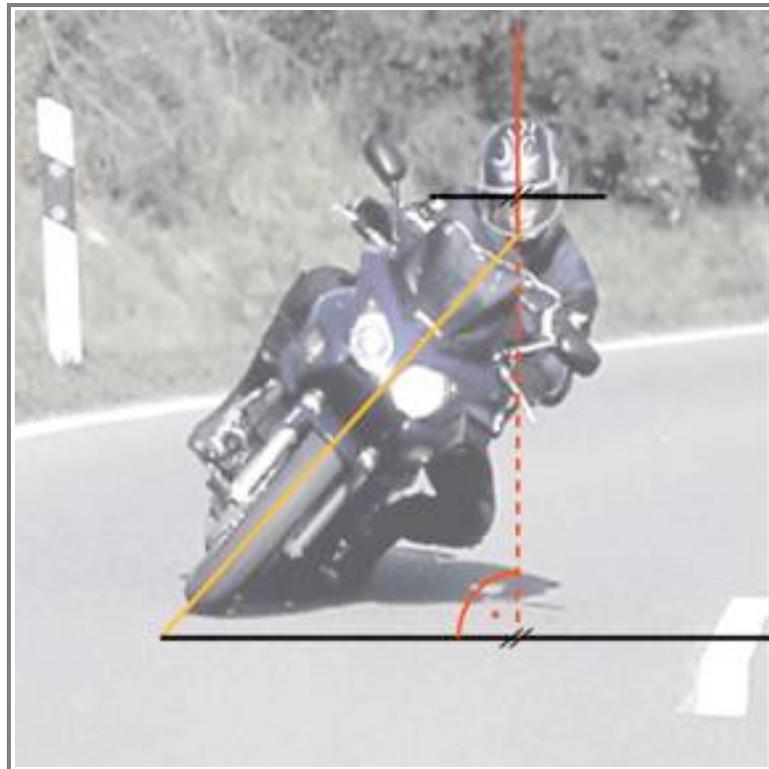
**Abb. 1** zeigt eine graphische Zusammenfassung der Afferenzen zum VCK [Benninghoff (2004)]

**Legende:** *V1*: Nervus optalmicus, *sV*, *IV*, *iV*, *mV*: Nucleus. Vestibulares superior, laerales, inferior und mediales (kontralateral), *ph*: Nucleus prepositus hypoglossii

Zervikale Funktionsstörungen mit propriozeptivem Fehlempfinden und der sich u. U. daraus entwickelnde Schwindel sind in der Praxis meistens sehr schwer zu diagnostizieren, da nicht alle Störungen im vestibulären System vergleichbar eindeutige Symptome hervorrufen. Viel häufiger sind die Ursachen weder anamnestisch noch messtechnisch eindeutig fassbar, so dass das tatsächliche Ausmaß des individuellen Leidensdruckes des Patienten oft nicht klar bestimmbar ist [Hölzl (2009)]. Daraus resultiert für die meisten betroffenen Patienten ein langer und mühsamer Weg der Diagnosefindung.

In den Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Neurologie wird Schwindel als das zweithäufigste Leitsymptom, nicht nur in der Neurologie, beschrieben. Bei über 30.000 Befragten zeigte die Prävalenz von Schwindel in Abhängigkeit vom Alter zwischen 17-39% [Davis (2003)]. In bevölkerungsbezogenen Studien lag die Lebenszeitprävalenz für mittelstarken bis heftigen Schwindel bei 29,5% [Neuhauser (2007)]. In Prozent ausgedrückt verteilen sich die Schwindelätiologien auf folgende Ursachen laut Leitlinien: 18,6% leiden unter einem Benignen peripheren paroxysmalen Lagerungsschwindel (BPPV), 15,6% der Patienten leiden an einem phobischen Schwankschwindel, 12,4 % unter zentral-vestibulärem Schwindel, 10,2% unter einer basiliären/ vestibulären Migräne, 9,4% an einem Morbus Menière, 7,4% an einer Neuritis

vestibularis, 5,1% an bilateralen Vestibulopathien, 3,9% an Vestibularisparoxysmie, 3,2% an psychogenem Schwindel, 0,6% an einer Perilymphfistel und 13,6% werden unter unklaren oder anderen Schwindelsyndromen beschrieben [Leitlinien 2008].



**Abb. 2** Darstellung der zervikalen propriozeptiven Leistung bei der optimalen Rumpfauslenkung beispielsweise demonstriert in einer Kurve eines Motorradfahrers. Diese Justierung läuft unabhängig von der Otolithen- und Vestibularorganwahrnehmung und der damit verbundenen horizontalen Ausrichtung der Kopfposition ab.

Diese Arbeit widmet sich der Bedeutung der somatosensorischen Vestibularisafferenzen aus den Bewegungssegmenten der oberen Halswirbelsäule.

Im Folgenden sollen zum besseren Verständnis die anatomischen Grundlagen der zervik vestibulären Afferenzen sowie deren neuronale Verschaltungswege beschrieben werden. Zusätzlich werden die klinischen Auswirkungen von zervikalen Funktionsstörungen, deren klinische Relevanz mit einem sich anschließenden Überblick über die bereits vorhandenen Forschungsansätze und der sich daraus entwickelnden Arbeitshypothesen beschrieben.

## 1.2 Anatomische Grundlagen zur zervik vestibulären Afferenz

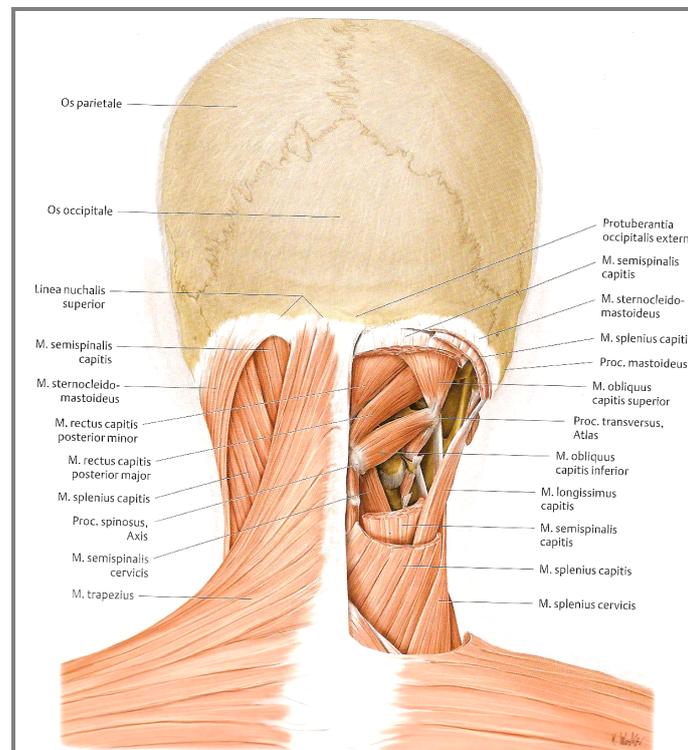
Das Innenohr liegt in einem kleinen Hohlraumsystem (knöchernes Labyrinth) innerhalb des Felsenbeins, eines Teils des Schläfenbeins. In diesem knöchernen Labyrinth befindet sich das membranöse oder häutige Labyrinth (Labyrinthus membranaceus), bestehend aus der Gehörschnecke (Labyrinthus cochlearis) und dem Gleichgewichtsorgan (Labyrinthus

vestibularis). Das wichtigste Organ bei der Gleichgewichtswahrnehmung stellt das häutige Labyrinth dar, welches Informationen über die Bewegung im Raum mittels vieler intra- und extrakranieller Sensoren bezieht. Ihrer Funktion entsprechend wird das häutige Labyrinth in drei häutige Bogengänge und zwei Otolithenorgane (Macula utriculi et sacculi) eingeteilt. Für das Vestibularorgan ist der adäquate Sinnesreiz die Beschleunigung. Die in den Bogengängen befindlichen drei Drehbeschleunigungssensoren (Crista ampularis) stehen jeweils in 90°-Winkeln zueinander und haben gemessen zur Horizontalen einen nach vorne offenen Winkel von 30°. Bei einem natürlichen Gangbild von 30° Anteflexion sind die rechtwinkligen Lagebeziehungen der drei Bogengänge auf die Horizontale ausgerichtet. Neben den Drehbeschleunigungssensoren wird die geradlinige Beschleunigung durch Sensoren der Otolithenorgane erfasst [Scherer (1985 b)]

Die vestibuläre Gleichgewichtswahrnehmung wird mit Hilfe der Propriozeption durch eine gezielte Wahrnehmung von Reizen über den Zustand von Muskeln, Sehnen und Gelenken unterstützt. Es gibt zahlreiche Sinnesorgane des Bewegungsapparates, welche die Wahrnehmung der Lage der Extremitäten, des Rumpfes und des Kopfes ermöglichen. Besondere Bedeutung haben die Rezeptoren der Muskeln (Muskelspindeln als Dehnungsrezeptoren), der Sehnen (Golgi-Sehnen-Organ (GSO) als Spannungsrezeptoren) und der Gelenke (in Bändern und Kapseln) (Tab.1). Neben den beschriebenen Funktionen machen die Propriozeptoren einen reibungslosen Ablauf von Bewegung der einzelnen Körperteile sowie einen Schutz vor Überlastung der Gelenke, Bänder, Muskeln und Sehnen möglich.

Nach vorherrschender Meinung sind es v. a. die Muskelspindeln, von denen die wesentlichen Informationen über die Gelenkstellungen kommen, was an Gelenken der Extremitäten belegt werden konnte [Taylor (1992)]. Auch im Kopf-Hals-Bereich erfüllt die Muskelspindel diese wichtige Aufgabe [Dutia (1991)]. Die gesamte quergestreifte Skelettmuskulatur besitzt in der Regel Muskelspindeln. Die Anzahl variiert abhängig vom Muskeltyp, seiner Funktion und Struktur. Muskelspindeln kommen besonders häufig in der Muskulatur der Haltefunktion (posturale Muskeln) und in Muskeln, die sehr feine Bewegungen ausführen, vor. Mit besonders hoher Dichte sind neben den äußeren Augenmuskeln und der Larynxmuskulatur die kurzen Nackenmuskeln (Abb. 3) zu nennen [Benninghoff (2004)]. An Untersuchungen mit Katzen [Richmond (1982)] und Menschen [Voss (1971)] konnte gezeigt werden, dass suboccipitale und andere Muskeln des kraniozervikalen Übergangs eine sehr hohe Anzahl Muskelspindeln, aber auch andere Mechanosensoren wie zum Beispiel Lamellenkörperchen pro Gramm Muskelgewicht aufweisen [Neuhuber (1998)].

Aus Arbeiten von Voss et al., Zenker und Christ ist bekannt, dass der M. multifidus, die kleinen Rotatoren, der M. longissimus capitis bis zu 10-mal mehr Spindelrezeptoren aufweisen als die übrige lange Rückenmuskulatur [Christ (1993)]; [Zenker (1994)]; [Voss (1971)].

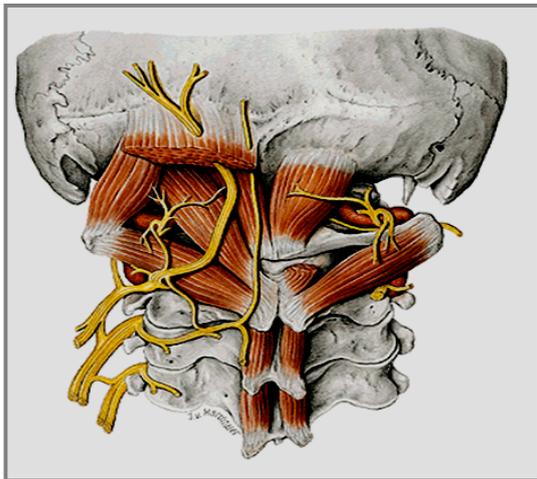


**Abb. 3** zeigt den anatomischen Aufbau der tiefen und oberflächlichen Nackenmuskulatur [Schünke (2005)].

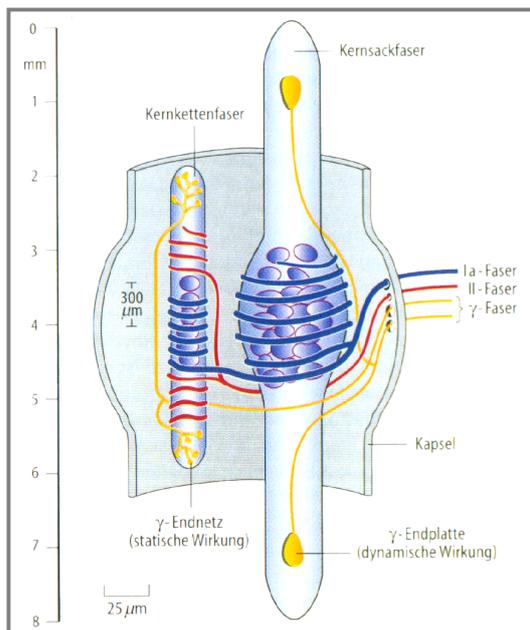
Die größte Muskelspindeldichte findet sich in der suboccipitalen Muskulatur (Abb. 3 und 4), mit bis zu 312 Muskelspindeln pro Gramm Muskel [Christ (1993)]. Nach Taylor kommt diesen als halspropriozeptiv dienenden Muskelspindeln eine wesentliche Rolle bei der Kontrolle sowohl der Kopfstellung als auch der Körper-, Extremitäten- und Augenstellung zu. Insbesondere seien die Propriozeptoren bei langsamen Kopfbewegungen dem Vestibularorgan bei der Feinregistrierung überlegen [Taylor (1992)].

Die Muskelspindel gehört zur Gruppe der eingekapselten Mechanorezeptoren des Bewegungsapparates und gleicht mikroskopisch einem „Muskel im Muskel“. Es handelt sich um 2–5 mm lange, spindelförmige Gebilde in der Skelettmuskulatur, die von einer Bindegewebskapsel umhüllt sind und etwa sechs bis zehn kleine quergestreifte Muskelfasern enthalten (intrafusale Muskeln). Sie ziehen parallel zum Verlauf der Skelettmuskulatur.

Je nach Anordnung der Muskelfaserkerne unterscheidet man Kernsackfasern (Kerne „haufenförmig“ angeordnet) von Kernkettenfasern (Kerne „kettenförmig“ angeordnet) (Abb. 5).



**Abb. 4** zeigt die Anatomie der Tiefensensibilität mit dem Plexus cervicalis und der tiefen Nackenmuskulatur [Putz (2006)].



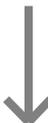
**Abb. 5** zeigt die afferente und efferente Verschaltung der Muskelspindel und den anatomischen Aufbau der Kernsack- und der Kernkettenfaser [Schmidt (2001)].

Die Kernkettenfasern sind 7  $\mu\text{m}$  breit, dabei nur unwesentlich länger als die Kapsel und treten ca. 2- bis 11-mal pro Spindel auf. Kernsackfasern durchmessen ca. 17  $\mu\text{m}$  und ragen weit in die extrafusale Muskulatur hinein. Dabei lassen sich zwei intrafusale Fasertypen unterscheiden, die Nuclear-bag-Fasern Typ 1 für eher dynamische Empfindlichkeit und die Nuclear-bag-Fasern Typ 2 für eher statische Empfindlichkeit bei Dehnungsreizen. Hierbei treten sie weitaus seltener auf als die Kernkettenfasern, welche nur 1- bis 5-mal pro Muskelspindel vorkommen. Des Weiteren existieren Nuclear-chain-Fasern, die häufiger pro Muskelspindel auftreten (bis zu 10). Die Kernketten- und Nuclear-bag-Fasern Typ 1 kontrahieren sich in einer tonischen Weise, ohne dass dabei ein Aktionspotenzial über die Faser läuft. Nuclear-bag-Fasern Typ 2 dagegen vollführen phasische Kontraktionen, die sich durch Aktionspotenziale über die Muskelfaser ausbreiten.

Die Muskelspindel wird afferent von myelinisierten Nervenfasern **Typ Ia (primär)** und **II (sekundär)** innerviert. Die sensiblen Fasern, welche die intrafusalen Muskelfasern in der Mitte

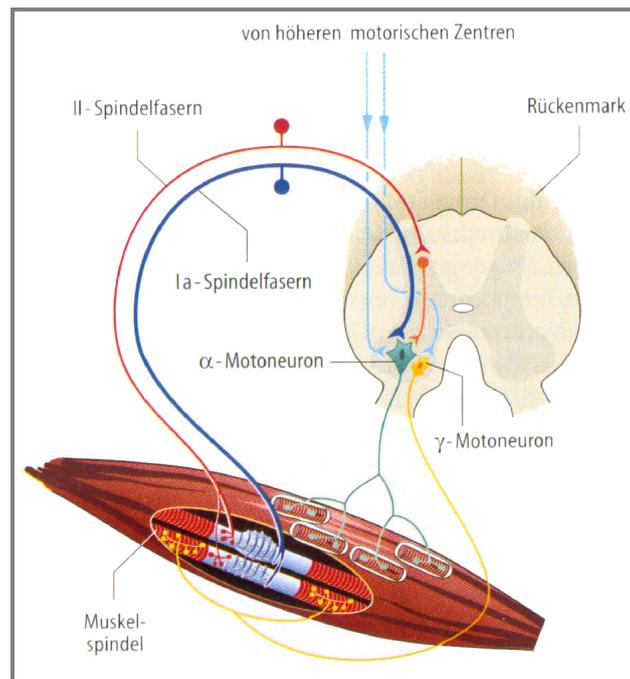
als anulospirale Endigung umschlingen, nehmen jede Längenänderung derselben wahr. Die Ia-Fasern gehören zu den dicksten (15 – 20 µm) Nervenfasern. Ihre Nervenleitgeschwindigkeit schwankt zwischen 70 – 120 m/s. Ihre Funktion ist die Wahrnehmung dynamischer Reize, wie zum Beispiel die Relativbewegung zwischen Kopf und Körper. Die Typ-II-Nervenfasern sind dünner (9 µm) und besitzen eine deutlich langsamere Nervenleitgeschwindigkeit von 25 – 70 m/s. Die sekundären dünnkalibrigen Typ-II-Fasern messen statische Reize und tragen entscheidend zur kinästhetischen sensiblen Gelenksbestimmung bei [Schmidt (1993)].

**Tab. 1** zeigt eine Einteilung der Propriozeptoren nach Rezeptortyp, den dazugehörigen Afferenzen, den für sie auslösenden Reiz und deren Sinnesmodalität [Trepel (2004)].

Rezeptortyp	Afferenz	Adäquater Reiz	Sinnesmodalität	Kaliber/ Nervenleit- geschwindigkeit
Muskelspindel primär	Ia	Muskeldehnung	Propriozeption ( <i>dynamisch</i> )	15 – 20 µm/ 70 – 120 m/s
Golgi-Sehnenorgan	Ib	Sehnenspannung	Muskelspannung	 9 µm/ 25 – 70 m/s
Muskelspindel sekundär	II	Muskeldehnung	Propriozeption ( <i>statisch</i> )	
Gelenkrezeptoren	II, III	Gelenkbewegung, Druck	Propriozeption	

Die Klassifikation nach Lloyd beschreibt von I – IV hierbei speziell die Muskelafferenzen, wohingegen sich die A-/B-/C-Einteilung nach Erlanger und Gasser allgemein auf Nerven bezieht [Neuhuber (1998)].

Die motorische Innervation findet an der Muskelspindel durch die  $\gamma$ -Fasern (2 – 8 µm) statt, welche über motorische Endplatten die intrafusalen Muskelzellen aktivieren, sowie zusätzlich durch  $\alpha$ -Motoneurone (MN), welche die extrafusale Muskulatur innervieren (Abb. 6). Die Afferenzen der Muskelspindel und supraspinaler Zentren (z. B. der Pyramidenbahn) enden direkt bzw. indirekt durch zwischengeschaltete Interneurone (IN) an den  $\alpha$ - und  $\gamma$ -MN. IN dienen der Regulation der MN, die als die „letzte gemeinsame Endstrecke“ bezeichnet werden, da sie letztendlich die Skelettmuskulatur innervieren. Bei einer Muskeldehnung kommt es auch zu einer Dehnung der intrafusalen Muskelfasern. Die Rezeptoren der Muskelspindel werden durch diese Dehnung aktiviert und es entsteht eine Weiterleitung über **Ia- und II-Afferenzen** zum RM.



**Abb. 6** grafische Darstellung der afferenten und efferenten Verschaltung der Muskelspindel über Ia- und II-Nervenfasern [Schmidt (1993)].

Im ZNS laufen die afferenten Fasern im Hinterhorn, um synaptisch am  $\alpha$ -Motoneuron (MN) zu enden und über Glutamat getriggert zu einer Kontraktion des gedehnten Muskels zu führen. Das MN erregt den Muskel hierbei über die gleiche motorische Endplatte und es wird so die ursprüngliche Länge des Muskels wiederhergestellt (Abb.6).

Die Beendigung des Reflexes erfolgt durch die Entdehnung der Muskelspindel und durch die Aktivierung sogenannter Renshaw-Zellen, die inhibitorisch auf die Erregung des MN wirken.

Die Golgi-Sehnen-Organen (GSO) werden hingegen von einer oder mehreren afferenten Typ-Ib-Fasern versorgt und finden sich fast ausschließlich (zu 90 %) am Muskel-Sehnen-Übergang, der Rest liegt in den Sehnen selbst. Auch bei den GSO ist die Anzahl vom Muskeltyp abhängig. Die Muskeln der roten Muskulatur und jene, die an der posturalen Kontrolle beteiligt sind, weisen bedeutend mehr GSO auf als andere Muskelgruppen. Funktionell lassen sich die GSO als langsam adaptierende Mechanorezeptoren beschreiben, die den Spannungssensor der Skelettmuskulatur bilden. Sowohl durch Kontraktion als auch durch Dehnung des Muskels werden sie erregt. Es wird angenommen, dass eine Erregung durch die vermehrte Spannung der Sehne die kollagenen Fasern im GSO einander näher bringt und so die zwischen ihnen verwobenen Nervenendigungen mechanisch deformiert werden. Das GSO reagiert bereits bei minimaler Kontraktion, also auch bei physiologischen Muskelkontraktionen [Beninghoff (2004)].

Gelenkrezeptoren stellen hingegen rezeptive Nervenendigungen der Gelenkkapsel und ihrer Bänder dar. Sie sind an der Vermittlung des Stellungs- und des Bewegungssinns beteiligt, spielen allerdings eine untergeordnete Rolle bei der Propriozeption, da beispielsweise Patienten nach einer Hüft-TEP (totale Endoprothese, mit Entfernung der Gelenkkapsel sowie aller Rezeptoren) einen normalen Stellungssinn der unteren Extremitäten besitzen. Die Gelenkrezeptoren werden in vier Rezeptortypen unterteilt. Es sei an dieser Stelle nur der Typ-II-Rezeptor erwähnt, der in allen tiefen Schichten der Gelenkkapsel und ihrer Umgebung zu finden ist. Diese sind schnell adaptierend und reagieren auf Bewegung sowie schnelle Druckveränderungen in der Kapsel. Versorgt werden sie von Nervenfasern der Klasse II und III. Die somatosensible Bahn vermittelt feine Tastempfindungen und bewusste Wahrnehmungen aus dem Bewegungsapparat. Diese propriozeptiven Impulse aus peripheren Fortsätzen, die entweder als freie Nervenendigungen oder an Rezeptorstrukturen in Haut, Gelenken und Muskeln enden, gelangen mit dem ersten pseudounipolaren Neuron aus der Haut und aus dem Bewegungsapparat (Gelenk-, Muskel-, Sehnenrezeptoren) zu den Spinalganglien (Ganglion trigeminale), um dann weiter ins ZNS zu reichen (Abb. 6). Die beschriebenen pseudounipolaren Neurone dienen mit ihren axodendritischen Fortsätzen der rezeptiven Aufnahme von Sinneseindrücken, während die zentralen Fortsätze in die verschiedenen Laminae des RM (periphere Termination) oder aufsteigend bis ins Gehirn projizieren.

Die graue Substanz des RM wird in Laminae I – X eingeteilt, zum Hinterhorn zählen Laminae I – VII, zum Vorderhorn VIII – IX und die Lamina X bildet die Commissura grisea. Die Primärafferenzen von Propriozeptoren und Mechanorezeptoren bilden nach Abgabe von Kollateralen die Hinterstränge. Typ-I-, -II-Fasern der Propriozeption projizieren in die Laminae VI, VII und IX. Die Ia (*dicke, dynamische*) Fasern der Muskelspindel projizieren in die Laminae VI, VII und IX und die Typ II (*dünne, statische*) Fasern in die Laminae VI und VII. Zusätzlich treten weitere zervikale Kollateralen des med. Bündels der oberen vier Halssegmente in den Nucl. cervicalis centralis ein. Das med. Bündel besteht v. a. aus dickeren myelinisierten Nervenfasern (I und II), die im Grenzbereich zwischen Hinterhorn und Hinterstrang in die tieferen Laminae des RM bzw. in den Hinterstrang einsteigen. Der Hinterstrang besitzt Fasern, die zu den supraspinalen Zentren aufsteigen. Im RM ziehen die Bahnen am Hinterhorn vorbei und münden in somatotopischer Anordnung direkt in die ipsilateralen Hinterstränge ein. Fasern des ersten Neurons enden im dorsokaudalen Bereich der Medulla oblongata in den Hinterstrangkernen (Nucl. cuneatus). Nach der hier erfolgten Verschaltung auf das zweite Neuron ziehen die Axone nach ventromedial, kreuzen auf die Gegenseite und ziehen von dort im Hirnstammtegmentum rostral.

Auf Höhe der Pons schließen sich dann epikritische Fasern des Trigeminiusbereichs von medial her mit an. Alle Fasern der epikritischen Bahnen ziehen im Lemniscus medialis weiter und enden wieder in somatotopischer Anordnung im Nucl. ventralis post. des Thalamus. Hier werden sie auf das dritte Neuron verschaltet und durch den hinteren Schenkel der Capsula interna zum primären somatosensiblen Kortex (Gyrus postcentralis) geleitet.

Eine Sonderstellung nimmt hierbei die spinocerebelläre Bahn ein. Diese Fasern finden ihren Ausgang vom Ncl. dorsalis (Ncl. thoracicus, Stilling-Clarke) des Hinterhorns und führen propriozeptive sensible Informationen der ipsilateralen Körperseite über den Pedunculus cerebellaris inferior und Tractus spinocerebellaris zum Kleinhirn. [Trepel (2004)]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das somatosensible Hauptrezeptorenfeld des Gleichgewichtssystems im Bereich der drei oberen Zervikalnerven (C1-C3) liegt [Hülse (1983)]. Bis zu 2/3 der somatosensiblen Projektion der vestibulären Kernregionen (Nucl. inferior et mediales) entstammen aus der suboccipitalen Muskulatur [Voss (1971)]. Es muss aber angenommen werden, dass somatosensorische Informationen der Gelenk- und Hautrezeptoren sowie der Sehnenorgane (Typ Ib-Faser) zusätzlich generiert werden können [Neuhuber (1992)]. Dass die propriozeptiven Afferenzen aus dem Nackenbereich zum Vestibulariskernkomplex (VKK) sowohl von Kernketten- als auch von Kernsackfasern stammen, wird in der heutigen Literatur angenommen, genaue Untersuchungen dazu fehlen jedoch. Allgemein ist zu sagen, dass die anulospiralen (dynamischen) Ia-Afferenzen von beiden Spindelfasertypen herkommen.

Laut mündlichem Beitrag von Prof. Neuhuber ist es möglich, den afferenten Ia-Fasern eine dynamische und den II-Fasern eine statische (tonische) Funktion zuzuordnen. Die Ia-Axone der dynamischen Afferenzen endigen anulospiral sowohl an Kernsack- als auch an Kernkettenfasern. Gleiches ist für die Typ-II-Axone, die statischen Afferenzen, zu beschreiben. Sie enden mit sogenannten *Flower-spray-Endigungen* ebenfalls an beiden intrafusalen Fasertypen. Welche Fasertypen vermehrten Einfluss auf den somatoafferenten Einstrom zu den Vestibulariskernen ausüben und welche Afferenztypen vorherrschen, ist laut Studienlage experimentell noch nicht geklärt.

Dickkalibrige zervikale Muskelafferenzen zeichnen sich insbesondere durch ihre direkte Projektion zum Nucl. cuneatus ext., vor allem aber zum (VKK) aus. Die Halsafferenzen erhalten so ungefilterten Zugang zu vestibulospinalen, vestibulo-okulomotorischen und weiteren Neuronen des VKK, wo auch die Afferenzen des Labyrinths enden [Neuhuber (1998)]. Ein weiteres prominentes Endigungsgebiet für Muskelspindelafferenzen im rostralen Zervikalmark (Segment C1 – 3) stellt der Nucl. cervicalis centralis (CCN), ein Kerngebiet beidseits des Zentralkanals, und das Gebiet des ventralen Cochleariskerns dar [Pfaller (1988)]. Der CCN ist

Ursprung einer gekreuzten Bahn zum Kleinhirnwurm (Flocculus), zum VKK und besonders zum Nucl. vestibularis lat. [Matsushita (1995)]; [Sato (1997)]. Der CCN empfängt andererseits Informationen aus den Bogengängen über den VKK [Thomson (1996)].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der VKK eine zentrale Stelle für die Integration von labyrinthären und halspropriozeptiven Informationen zur Körperstellung bildet [Neuhuber (1990)].

Die Projektion wie auch die propriozeptive Afferenz zum VKK ist am deutlichsten aus den Spinalnerven C2 und C3 im Gegensatz zu den unteren Zervikal- und Thorakolumbalsegmenten zu beschreiben [Neuhuber (1998)]; [Matsushita (1995)]. Im Besonderen weist vor allem die afferente Innervation des Kopf-Hals-Bereiches entscheidende Unterschiede zu der des Rumpfes und der Extremitäten auf [Neuhuber (1998)].

Am craniozervikalen Übergang treffen die Hirnnerven N. vagus und N. trigeminus mit den Innervationsgebieten der Spinalnerven aufeinander, so dass sich eine enorme Möglichkeit an Interaktion mit Primärafferenzen zervikaler Segmente und jenen von Hirnnerven an sekundären Neuronen ergibt. Diese stellen wiederum Ausgangspunkte für lokale Reflexverschaltungen sowie auf- und absteigende Bahnen dar [Neuhuber (1998)], [Pfaller (1998)]. Neuhuber nimmt an, dass sekundäre Neurone einen konvergierenden Input aus Hals- und Trigeminafferenzen erhalten (Kap. 1.3) [Neuhuber (1998)]. Die Konvergenz von labyrinthären und propriozeptiven Halsafferenzen wird in der Literatur als eine „Verrechnungsstelle“ von Signalen des Labyrinths und des Halses beschrieben und erlaubt so eine genauere Registrierung der Körperstellung im Raum [Hassenstein (1998)].

### **1.3 Klinische Befunde bei zervikaler propriozeptiver Missempfindung**

Das Symptommuster von Patienten mit HWS- und Schwindelbeschwerden ist vielfältig und uncharakteristisch [Scherer (1996)]. Die Betroffenen berichten über ein „Drehempfinden“, häufiger noch über ein Unsicherheitsgefühl. Teilweise ist der Schwindel kopf- und körperbewegungsabhängig [Scherer (1997)]. Der zervikale Schwindel wird oft nachts beschrieben oder ist morgens am stärksten. Er kann sich anfallsartig äußern, unterscheidet sich aber eindeutig vom benignen paroxysmalen Lagerungsschwindel (BPLS) oder einem Morbus Ménière, indem er deren charakteristischen Symptome wie Krescendo-Dekrescendo-Verhalten beim BPLS und Erbrechen beim M. Ménière nicht aufweist. Typisch ist der sehr fluktuierende „Sekundenschwindel“ (1 – 2 s), wobei die Patienten angeben, beim Gehen kurz zur Seite gezogen zu werden [Scherer (1997)].

Anamnestisch richtungsweisend sind „Nackenschmerzen“ mit bitemporalem oder temporalem Schmerz (Insertionstendopathien der kurzen zervikalen Muskeln am Okziput) oder ein Ohrdruck (Insertionstendopathien am Atlasquerfortsatz) [Scherer (1997)]. Unter Umständen kann die Abgrenzung zu einem M. Mernière schwierig werden, da neben dem Ohrdruck auch ein Tieftonhörverlust/-störung vorliegen kann. Als Abgrenzungsindiz hilft die Beurteilung der Beidseitigkeit der Beschwerden (abzugrenzen ist hier der M. Mernière mit nur einseitigen Beschwerden), die Angabe von begleitenden Kopfschmerzen (bei „zervikaler Missempfindung“) oder einer im Trigeminusgebiet bestehenden Sensibilitätsstörung. Bei Nasennebenhöhlenbeschwerden ohne bildgebenden Befund ist ebenfalls an eine Funktionsstörung der Kopfgelenke zu denken. Anamnestische Informationen wie Traumata und Operationen an der Wirbelsäule in der Vergangenheit oder segmentale Störungen sind ebenfalls zielführend und somit zu erfragen.

Orientierende Untersuchungen, um Dysfunktionen im Bereich der Kopfgelenke festzustellen, sind die manuelle Untersuchung, der 2-Waagentest nach Lewitt [Scherer (1997)], der Patrick-Test (häufige Korrelation von Hüft- und HWS-Beschwerden), das Röntgenbild, die Posturographie (PUG) und Craniocorpographie (CCG).

Die klinisch funktionelle Untersuchung der HWS umfasst eine Palpation auf schmerzhafte Resistenzen, prüft die Statik sowie die Beweglichkeit und gibt somit Aufschluss über das Vorhandensein und den Ort der zervikal funktionellen Störung [Biesinger (1987)]. Klinisch fassbar sind also ein palpatorisch auffälliger Befund im Rahmen einer Myogelose und eine meist hyperlordotische Fehllhaltung der HWS [Biesinger (1987)]. Durch Fehlhaltungen und Überanspruchungen der betreffenden Gelenke und Muskulatur kommt es aufgrund von Dekompensation der Muskulatur zu schmerzhaften Resistenzen, Bewegungsstörungen der Kopfgelenke, Myogelosen und Insertionstendopathien mit begleitenden Schmerzen. Die Myogelosen, v. a. der langen zervikalen Halsmuskeln, sind, wie auch die Insertionstendopathien am Atlasquerfortsatz gut tastbar [Scherer (1997)]. Bildgebende Verfahren helfen im Zusammenhang mit der Diagnosefindung nur begrenzt weiter, da beschwerdefreie Patienten z. T. auffällige Befunde im Röntgenbild zeigen und Patienten mit Symptomen u. a. keine Veränderungen in der Röntgenfunktionsaufnahme aufweisen [Biesinger (1987)].

Beim Ausfall der Hinterstrangbahn beobachtet man klinisch nicht nur einen Verlust der Exterozeption, sondern auch ein Aufheben der Vibrationswahrnehmung und der Propriozeption, was in eine Gangataxie und Gangunsicherheit übergehen kann.

In Studien konnte der Erfolg von Krankengymnastik sowie von Manual- und Traktionstherapie in der Korrektur der Statik und der Wiederherstellung des Muskelgleichgewichtes gezeigt

werden. Die Ursache des zervikal ausgelösten Schwindels ist in der Regel eine funktionelle Störung der ersten zwei HWS-Segmente. [Biesinger (1987)] Die Anamnese, manuelle Tastbefunde und Funktionsaufnahmen der Kopfgelenke und der oberen Zervikalwirbel bilden heutzutage den schwer zu objektivierenden Kanon der Diagnostik.

Für die Erfassung des zerviko-okulären Reflexes (COR) gilt als gängige Untersuchungsmethode in der Literatur der sog. *Halsdrehtest* (HDT).

#### **1.4 Überblick über die Historie und die bisherigen Forschungsergebnisse**

Ein historischer Rückblick zeigt, dass die Beschäftigung mit dem gestörten Kopf-Hals-Übergang bis in die frühe Hochkultur zurückreicht. Im Mittelalter bildete das „Kopfzurechtsetzen“ einen Teil des heilerischen Repertoires [Hülse (2005)].

Es war selbstverständlich, dass Haarschneider und Bader die Kunst beherrschten, mit gezielten Handgriffen an der oberen HWS Beschwerden wie Kopfschmerzen, „Tümmeligkeiten“, Sehstörungen oder Tinnitus schlagartig zu beseitigen [Sollmann (1974)]. Die englische Königin Elisabeth I. hatte neben ihrem Leibarzt eine sogenannte „*Knochensetzerin*“ („*Bonesetterin*“) für ihre Kopf- und Nackenschmerzen. Damals verfügte man nur über physikalische Möglichkeiten, dem Patienten durch Nadeln, Brennen und Baunscheidtismus im Nacken, Bienenstiche an betroffenen Stellen und Brennesselaufgaben den Schmerz zu nehmen [Sollmann (1974)]. In den 20er und 30er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelte B. J. Palmer jun. eine für die obere HWS abgestimmte Therapiemöglichkeit. Er erkannte die Bedeutung der HWS, insbesondere nach Traumatisierungen und widmete seine Handgrifftechniken v. a. dem Übergang von Atlas/Axis und benannte sie die „*HIO-Techniken*“ (*Hole In One* = mit einem Schlag ins Loch treffen, ein aus dem Golfsport geprägter Begriff).

Seit einem halben Jahrhundert stehen sich allerdings weiterhin zwei nicht zu vereinende theoretische Konzepte gegenüber, wenn über das Thema „zervikaler Schwindel“ und/oder „zervikogene“, „zervikoenzepale“ Symptomatik gesprochen wird. Die Begriffsungenauigkeit der „zervikalen Missempfindung“ wird in Tab. 2 verdeutlicht. Viele verschiedene Hintergründe erklären diese regelrecht schon emotional aufgeladenen Meinungsverschiedenheiten, die sich offensichtlich nicht konsensfähig vereinen lassen.

Betrachtet man alle theoretischen Ansätze, die in den vergangenen Jahrzehnten ernsthaft diskutiert wurden, bilden sich vier Hauptinterpretationsansätze heraus.

Die erste Theorie stützt sich auf die vaskuläre Versorgung der A. vertebralis, da sie mit den knöchernen Anteilen der Zervikalregion verbunden ist. Nylen wies erstmals 1926 auf diesen zentralen Zusammenhang hin [Nylen (1926)].

Die zweite sog. Sympathikus-Theorie nach Frank, die sich mit der Behandlung des Sympathicus-Geflechtes beschäftigt, das die A. vertebralis umwickelt, wurde von Barré und Lieou 1927 begründet [Barré (1927)].

Die dritte Theorie stützt sich auf die bereits vorangegangenen Theorien, indem sie von einer funktionellen Einheit der A. vertebralis und des N. vertebralis ausgeht.

**Tab. 2** zeigt den in der Literatur auffallenden nicht homogenen Beschreibungskonflikt der „zervikalen Missempfindung“.

<b><u>Kontroverse Bezeichnungen der „zervikalen Missempfindung“</u></b>	
<b><i>Zervikoenzephalas Syndrom, zervikogener Schwindel</i></b>	„zervikogener Schwindel“: fast immer eine Verlegenheitsdiagnose [Ringelstein (2008)]
<b><i>Zervikaler Schwindel</i></b>	Ein (Kopf-) Problem mit vielen Gesichtern, Symptomatik der Kopfgelenke und ihrer neuronalen Verknüpfung [Steinhaus (2005)]
<b><i>Vertebragener Schwindel</i></b>	Die obere Halswirbelsäule [Hülse (2005)]
<b><i>Zervikal-Syndrom</i></b>	Manuelle Diagnostik und Therapie der Halswirbelsäule [Graf (2010)]
<b><i>Zervikale Strukturstörung</i></b>	Funktionelle Störungen und funktionelle Erkrankungen im Bereich der oberen Halswirbelsäule unter besonderer Berücksichtigung der Kopfgelenke. Der Orthopäde – Manuelle Medizin [Kayser (2006)]
<b><i>Vertebragene Gleichgewichtsstörung</i></b>	Diagnostik und Therapie des vertebragenen Schwindels [Biesinger (1987)]

Die vierte und letzte Theorie ist neurophysiologischen Ursprungs und eröffnete neue Horizonte in der Diskussion über das zervikoenzephalas Syndrom. Nachdem die Argumente, die für eine Bedeutung der A. vertebralis sprachen, weniger wurden, konnte der kraniozervikale Übergang als ein autonomes Systemteil des Bewegungssystems betrachtet werden [Hülse (2005)].

Diese Theorie betont die Wichtigkeit des „Rezeptorenfeldes“ des Nackens. Die Schlüsselfunktion, die der Nacken mit seiner fast schon sinnesorganartigen, neurophysiologischen Ausstattung spielt, wird in dieser Theorie deutlich. Durch die komplexe Verschaltung im Nackenbereich und die Einbindung der Efferenzen und Afferenzen in zentrale Regel- und Steuerungskreise (siehe Kap. 1.1) wird bereits auf einer rein anatomischen Ebene der Zusammenhang zum zervikalen Syndrom deutlich.

Das „Whiplash-Injury“ erzeugte in den 40er Jahren großes Aufsehen in Amerika und erreichte auch wenige Zeit später unter dem Namen „*Schleudertrauma*“ Deutschland. Seit diesem Zeitpunkt herrscht um das „Problemthema“ herum relative Unklarheit.

Hassenstein et al. konnten 1970 einen wichtigen Beitrag aus dem Themengebiet der Biokybernetik liefern. Sie postulierten, dass sich aus steuerungstheoretischen Gründen eine Art

„Messsystem“ im Kopf-Hals-Übergang befinden müsste, welches dem Vestibulariskernkomplex dann die Messdaten über die Kopf-Rumpf-Position liefern könnte, um maßgeblich an Bewegungsregistrierungen und -steuerungen beteiligt zu sein [Hassenstein (1970), (1987)]. Diese „Messinformationen“ können theoretisch nur aus dem Rezeptorenfeld des Nackens stammen. Somit wird klar, dass jeder für dieses rückkoppelnde System störende Faktor das Gleichgewichtssystem beeinträchtigen kann. Einige Forschungsergebnisse können diese Meinung bestätigen [Hülse (1983)]; [Seifert (1993)]. Systemische neuroanatomische Studien wurden vielerorts durchgeführt und liefern die Grundlage für alle darauf folgenden Arbeiten der kraniozervikalen Übergangsregion [Hülse (1998)].

Die Meinung der Befürworter, dass die HWS spezifische Pathologien auslösen kann, traf auf heftigen Widerstand. Neben dem Beharrungsvermögen der Kritiker auf ihren eigenen Thesen standen auch ökonomische Interessen versicherungsrechtlicher Natur hinter allem.

Die Kritiker berufen sich im Wesentlichen darauf, dass die HWS eine Gelenkkette sei, wie viele andere Gelenke des Körpers auch, und dass sich die Muskeln, die Sehnen und alle knöchernen gelenknahen Strukturen vom Heilungsprozess nicht unterscheiden würden. Die Kritiker erwarten ebenfalls einen noch ausstehenden objektiven Beweis der „zervikalen Missempfindung“. Es ist häufig nicht möglich, durch bildgebende Verfahren wie Röntgenbilder eine Diagnose zu fällen. Gutachten werden aufgrund dessen erschwert und es führt in nicht wenigen Fällen zu einer gänzlichen Ablehnung der Symptomatik. Die Diagnose „zervikozephalisches Syndrom“ sei laut Kritikern, wie Prof. Ringelstein beschreibt, eine Verlegenheitsdiagnose, nichts weiter als eine „Worthülse“ [Hülse (2005)].

Die zervikalen Symptome werden als schon vorhandene „funktionale“ oder „degenerative“ Veränderungen oder als „psychisches Fehlverhalten“, „psychosomatische Pathologien“ oder als „Neurotisierungen“ abgetan. Die Gutachten allerdings klammern hierbei häufig eine psychiatrische oder neurologische Kompetenz aus.

Brandt beurteilt aus neurologischer Sicht, dass die grundsätzlichen theoretischen Überlegungen gegen eine „zervikogene Missempfindung“ sprächen und es keinen Drehschwindel bei einem Zervikalsyndrom gäbe [Brandt (2004)]. Diese Argumentation des Drehschwindels ist direkt von Seiten der Befürworter zu widerlegen, da lediglich von einer Gleichgewichtsstörung mit Übelkeit und Benommenheit gesprochen worden sei [Hülse (2005)]. Poeck, ein weiterer Gegner, argumentiert dahingehend, dass die Symptomatik gegenüber anderen Pathologien nicht klar abgrenzbar seien [Poeck (2002)].

Die Kritiker der „zervikalen Missempfindung“ berufen sich im Wesentlichen auf die klinische Relevanz und bezweifeln den Krankheitswert der neurootologischen und anatomischen

Zusammenhänge. Brandt und seine Mitarbeiter meinen sogar, die Ursache von Schwindel sei nie zervikal zu finden. Zudem ist weiterhin die Einschätzung der sensorischen Prozessierungen in den Vestibulariskernen des Menschen strittig [Brandt (2004)]. Auch bei Kritikern ist heute also nicht mehr die Existenz der zerviko-okulären Bahnen strittig, sondern vielmehr die Frage, ob die Prozessierung der zervikalsomatosensorischen Rezeptordysfunktion genauso wie eine peripher vestibuläre Rezeptorstörung zu einer Bewegungsillusion und Schwindel führen kann.

Gegen das Konzept der „zervikalen Missempfindung“ spricht laut Hamann außerdem, dass es kein objektives Verfahren gibt, mit welchem man einen von der HWS her verursachten Schwindel nachweisen kann [Hamann (2001)]. Es sind v. a. subjektiv erhobene Tastbefunde, die je nach Untersucher zu unterschiedlichen Befunden und Diagnosen führen. Kritiker berufen sich ebenfalls darauf, dass auch Gesunde im Halsdrehtest (HDT) Nystagmen aufweisen. Auf den HDT soll im Verlauf genauer eingegangen werden.

Den Kritikern gegenüberstehend argumentieren Forschungsgruppen v. a. neurophysiologisch, dass sich der kraniozervikale Übergang im Wesentlichen von anderen Gelenken unterscheidet. Diese Unterschiede beginnen bei der Morphologie der knöchernen Elemente, deren Gelenk- und Bändermechanik, der muskulären Ausstattung und Dynamik und enden bei der sehr ungewöhnlich dichten und qualitativ reichhaltigen neuronalen Besiedelung der Nackenmuskulatur. Hierbei ist im Besonderen die tiefe autochthone Nackenmuskulatur zu nennen, die über ein sog. Rezeptorenfeld verfügt [Hülse (2005)].

Der Ausgangspunkt, dass der Halswirbelsäule ein wichtiger Platz unter den Ursachen für Schwindelbeschwerden einzuräumen wäre, war die Beobachtung, dass viele Patienten bei Kopfbewegungen, bei denen die HWS aktiv eingesetzt wird, über Schwindel klagen.

Befürworter der „zervikalen Missempfindung“ verweisen auf die Provozierbarkeit von Nystagmen bei Versuchen mit fixiertem Kopf [Hülse (1998)]; [Scherer (1997)].

Bereits seit Jahren existieren psychophysische Studien, die Aufschluss zur halspropriozeptiv ausgelösten Bewegungswahrnehmung beim Menschen geben sollen [Mergner (1997)].

Von Hülse werden die Gründe einer gestörten Kopf-Körper-Koordination in zwei unterschiedliche Pathomechanismen untergliedert, nämlich in die *Beeinträchtigung der rezeptoriellen Leistungsfähigkeit* und der *Seitenasymmetrie des Rezeptorstromes* [Hülse (2005)].

Als Ursache einer solchen veränderten Rezeptorfunktion wird ein funktionell eingeschränkter kraniozervikaler Übergang angenommen. Als eine Schlussfolgerung aus eigenen klinischen Untersuchungen und dieser Theorie formulieren Hülse und Scherer, dass es als Folge von funktionellen Störungen im kraniozervikalen Übergang zu schmerzhaften Fehlhaltungen mit einer Dysbalance und dadurch seitenbetonten muskulären Spannungszuständen kommen kann.

Dadurch würde die zervikale Afferenz gesteigert und die damit verbundene Rezeptorfunktion beeinflusst werden [Seifert (1993)].

Die Gründe für die mangelnde Methodenentwicklung in diesem Bereich und die damit verbundene schwierige Diagnosenfindung liegen in den vergleichsweise schlechten Zugriffsmöglichkeiten zum Einen auf das Vestibularorgan selbst und zum Anderen auf seiner komplexen zentralvestibulären Verschaltung im Hirnstamm und in höher geordneten Zentren.

In Studien wurden nach Durchtrennung der oberen zervikalen Gelenk- und Sehnenafferenzen bei dezerebrierten und labyrinthektomierten Katzen Ausfälle der tonischen Stützmotorik festgestellt [Mc Couch (1951)]. Eine Dissektion der tiefen Nackenmuskulatur der eben beschriebenen Katzen führte zu keiner Veränderung der tonischen Haltungsreflexe.

Andere Forschungsgruppen wie Zelenka und Wilson verweisen auf die wichtige Rolle der Nackenmuskelspindel, indem sie das Lokalanästhetikum Succinylcholin neben die drei ersten Intervertebralgelenke spritzten und dadurch weniger afferente Impulse aus dem Hals zum Vestibulariskernkomplex feststellen konnten [Chan (1987)]; [Mergner (1982)].

Die Beschwerden nach Beschleunigungsverletzungen (SHT= Schleuderhirntrauma) sind vielfältig, eine chronische Schmerzempfindung in den Facettengelenken der zervikalen Wirbelbögen stellt ein häufig beschriebenes Problem dar. Die Behandlung dieser Schmerzen ist schwierig. In der Literatur lässt sich eine interessante Vorgehensweise durch eine zervikale Radiofrequenz-Neurotomie (engl.: cervical radiofrequency neurotomy= CRFN) finden. Dabei wird der schmerzverursachende Nerv durch abladierte Radiofrequenz denaturiert.

Die israelische Forschungsgruppe von Prushansky et al. konnte zeigen, dass die CRFN eine hilfreiche Methode bei Patienten mit Symptomen nach SHT darstellt. In einer randomisierten doppelverblindeten Studie konnte ein signifikanter Unterschied zur Placebobehandlung nach sechs Monaten beobachtet werden. Außerdem konnte neben einer kompletten Beschwerdelinderung eine ebenfalls auffällige psychische Entlastung beobachtet werden, was laut Prushansky zeigt, dass die häufig zusätzlich bemerkten psychischen Probleme aufgrund der körperlichen Probleme entstehen könnten [Prushansky (2006)].

Auch Lord et al. konnten in ihren placebokontrollierten Arbeiten mit Neurotomien im Bereich des dritten Zervikalnervs und tiefer gelegenen posterioren Spinalnerven des Zervikalbereichs in 30 – 70 % der Fälle eine Schmerzfreiheit nach sechs Monaten zeigen [Lord (1995)].

Feststehend für Befürworter und Gegner sind jedenfalls die Folgen des Schädelhirntraumas (SHT). Diese zeigen mit ihrer sensorisch geprägten Symptomatik die zentrale Rolle des Halses bei der Perzeption der Kopf-zu-Körper-Stellung [Hassenstein (1998)]; [Neuhuber (1992)], bei

der auch die Muskelspindelafferenzen eine zentrale Rolle spielen [Dutia (1991)]; [Gandevia (1992)].

Nach Neuhuber liegt es nahe, die nervalen Besonderheiten im Zervikalbereich als Erklärungsversuche heranzuziehen, um die Problematik zu beleuchten, wie es zu so komplexen Symptommustern bei Erkrankungen kommen kann, die ihren Ursprung in der zervikalen Region haben. Das SHT beispielsweise stellt häufig mit Symptomen wie Schwindel-, Schmerz- und Hörstörungen ein Rätsel über die Pathogenese dar [Hülse (1998)]. Der vestibuläre Kernkomplex (VKK) hat gesicherte Verbindungen zum Kleinhirn, zum Rückenmark und zum okulomotorischen System, was den Einfluss der Halspropriozeptoren auf Blickbewegungen [Thoden (1979)] und den Zervikalnystagmus [Hülse (1998)] sowie Blickbewegungsstörungen nach Schleudertrauma erklären könnte [Neuhuber (1992)]. Nach Neuhuber kann angenommen werden, dass auch Kopfschmerzen bei funktionellen Kopfgelenksstörungen entstehen können, da im zervikalen Hinterhorn sowohl Afferenzen aus dem Hals-/Hinterkopfbereich als auch trigeminale Afferenzen verarbeitet werden.

Die direkte Verbindung zervikaler propriozeptiver Afferenzen zum ventralen Cochleariskern [Pfaller (1998)], aber auch Projektionen zum Cuneatuskern und zu verschiedenen Hörbahnstationen [Colemann (1987)]; [Itoh (1987)]; [Weinberg (1987)] könnten mit der Entstehung zervikaler Hörstörungen [Hülse (1998)] zusammenhängen.

Durch all diese neurophysiologischen Zusammenhänge ist die Vorstellung laut Neuhuber nicht unplausibel, dass eine gestörte propriozeptive Wahrnehmung zu einer gestörten Gleichgewichtsempfindung führt [Neuhuber (1998)].

#### ***1.4.1 Bisherige diagnostische Ansätze***

Die neuronalen Verbindungen der Halsrezeptoren mit dem zentralen vestibulären System- der Zervikookuläre Reflex (COR) und die Halsreflexe- sind experimentell untersucht, jedoch klinisch bislang ohne entscheidende Relevanz. Bei Menschen konnte gezeigt werden, dass eine einseitige Anästhesie des tiefen posterolateralen Nackenbereichs (z.B. C2 Blockaden bei zervikogenen Kopfschmerzen) eine vorübergehende Ataxie mit ipsilateraler Gangabweichung und Vorbeizeigen ohne Spontanystagmus hervorrufen konnte [Dietrich (1999)]. Diese Befunde auf einen Patienten mit Nacken-/ Hinterkopfschmerzen, Schwindel und/oder Gangunsicherheit anzuwenden, ist schwierig, da die entsprechende Diagnose noch nicht gesichert werden kann.

Der COR und die vestibulospinale Verschaltung wurde bislang im sog. Halsdrehtest (HDT) mit Hilfe des *Zervikalnystagmus* untersucht [Norre (1987)].

Holtmann ließ anlässlich der Untersuchung des COR einen motorisierten Stuhl bauen, welcher den Rumpf (Punctum mobile: Rumpf) des Probanden unter kontinuierlicher Registrierung der Augenbewegung und dabei fixiertem Kopf (Punctum fixum: Kopf) durchrotieren ließ. Während dieser phasischen Bewegung wurde der COR versucht in einem objektiven Versuchsetting abzuleiten. Dabei stellte sich heraus, dass sich die besten Bedingungen in der Messung des COR's zwischen 4°/s und 9°/s ergeben. [Holtmann (1989)]

Dieser *phasische* Untersuchungsansatz des COR's hat sich als Messparameter nicht durchgesetzt, da er einer zu starken Beeinflussungsmöglichkeit von außen unterliegt. Muskulärer Trainingszustand, Alter, Vorerkrankungen, Medikamente, Rauchen oder Alkohol und Aufmerksamkeit und Mitarbeit des Patienten tragen zu veränderten Werten bei [Skoglund (1956)]; [Tracey (1979)]; [Hölzl (2009)]. Durch den von Holtmann entwickelten *phasisch* untersuchenden Stuhl, entsteht das Problem durch die Messung eines Reflexes. Der zervikookuläre Reflex (COR) ist sehr aufwendig zu erheben und nur eingeschränkt zur Diagnosefindung zu nutzen, da er sowohl bei Gesunden als auch bei Patienten mit zervikaler Missempfindung zu finden ist und sein Fehlen ebenfalls keine zervikale Störung ausschließt, ist die klinische Bedeutung somit bislang ungeklärt. Durch die Erhebung eines Reflexes entstehen kaum reproduzierbare Messdaten.

Unter *tonischen* Untersuchungsbedingungen, also keinen Reflexbedingungen, wurde der HDT weiterentwickelt indem der Körper, des auf einem Drehstuhl sitzenden Patienten, um ca. 60° gegen den nach geradeaus gehaltenem Kopf, gedreht wurde. Dabei wurde nach einem Horizontalnystagmus gesucht, während einer mindestens 20 s gehaltenen Endstellung [Scherer (1997)]. Eine gewisse Latenz zwischen Körperdrehung und Nystagmusauswertung wird abgewartet, um einen physiologischen Endstellnystagmus davon zu trennen. Als pathologischer *Zervikalnystagmus* gilt dann ein andauernder (mindestens 15 s) Nystagmus.

Laut Brandstätter wird ein *Zervikalnystagmus* dann mit einer Schlagrichtung zur Kopfgelenksstörung beobachtet [Brandstätter (2004)].

Unter Berücksichtigung der Mehrdimensionalität des vestibulären Systems, ließ es sich nicht rechtfertigen, dass die Exploration dieses komplexen Systems nur auf die horizontale Nystagmuskomponente beschränkt bleiben sollte. Aufgrund von heranwachsenden technischen Möglichkeiten zur Erfassung aller drei Komponenten der Augenbewegungen entwickelte sich aus dem 1D-HDT (klassischer HDT) der 3D-HDT, welcher die Nystagmusaufzeichnung um zwei Dimensionen erweiterte. Es wurde nicht nur der horizontale Anteil eines Nystagmus

bestimmt, sondern ebenfalls die vertikalen und torsionalen Anteile. Um die okulären Wechselwirkungen mit allen Kopf-im-Raum-Bewegungen untersuchen zu können wurden von Hölzl alle Freiheitsgrade (Kopfseitneigung, Kopfante- und retroflexion, Kopffrotation nach rechts und nach links) der Kopfgelenke standardisiert geprüft [Hölzl (2008)]. In diesem neuen Versuchsaufbau stellte der Kopf das Punctum mobile und der Rumpf das Punctum fixum dar. Problematisch in diesem Versuchsaufbau ist dass eine getrennte Beurteilung von Otolithen- und Halswirbelsäulenbeteiligung nicht möglich ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen dass, in der Vergangenheit versucht wurde, durch verschiedene Untersuchungsstühle die Diagnostik der Gleichgewichtsstörungen zu erleichtern. Von Holtmann ist 1989 eine Methodik entwickelt worden, mit dem unter großem Sicherungsaufwand eine maschinelle Durchführung des HDT möglich ist. Der hier ausgewertete Nystagmus fand bei Personen mit zervikookulärer Reizantwort während eines *phasischen* Versuchsaufbaus, d.h. während der Bewegung, statt und wurde als ein *Zervikalnystagmus* gewertet [Holtmann (1989)]. Kritisch hierbei ist wie bereits beschrieben, dass es sich um eine Untersuchung eines Reflexes handelt, welcher einer großen Variabilität unterliegt.

Der weiterentwickelte 3D-HDT ist vom Ansatz der Dreidimensionalität her interessant, jedoch in seiner Zielsetzung der isolierten Untersuchung der zervikalen vestibulären Afferenzen noch nicht konsequent, da durch das Einnehmen verschiedener tonisch gehaltener Kopfpositionen nicht nur die zervikalen Afferenzen angesprochen werden, sondern die Schwerkraft auch eine Auswirkung auf die Otolithen und Bogengänge hat. Dies hat einen nicht bekannten und bisher nicht messbaren Einfluss auf die Untersuchungsparameter und –ergebnisse.

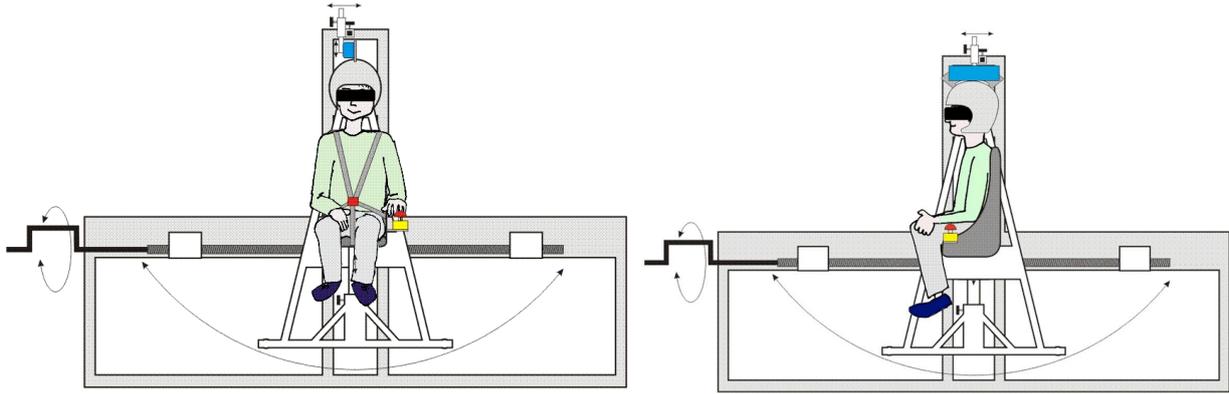
### **1.5 Neuer diagnostischer Ansatz und Herleitung der Arbeitshypothesen**

Die Bewegungskoordination zwischen Kopf und Rumpf des Menschen wird durch ein komplexes Zusammenspiel *intrakranieller* und *extrakranieller* vestibulärer Rezeptorsysteme ermöglicht. Wie in den neuroanatomischen Grundlagen beschrieben, bezieht das vestibuläre System bis zu 2/3 der somatosensiblen Projektion aus der Hals- und Nackenregion (C1-C3) [Neuhuber (1990)]. Diese Erkenntnisse gelten als neuroanatomisch und elektrophysiologisch gesichert. Aus der beschriebenen anatomischen Grundlage heraus, rechtfertigt sich die Annahme, dass die zervikale Afferenz eine relevante und entscheidende Information für das vestibuläre System darstellt. Neuhuber prägte in diesem Zusammenhang den Begriff der „*zerviko-vestibulo-zervikale Schleife*“. Aktuellere Forschungsarbeiten konnten bislang vor allem zum verbesserten Verständnis der drei vestibulär-*intrakraniellen* Rezeptorsysteme (Augen, Otolithen, Bogengänge) beitragen [Chan (2002)]; [Green (2005)]; [Green (2007)].

Ein ungelöstes Problem ist weiterhin, dass es kein objektives Untersuchungsverfahren mit entsprechenden Parametern mit klinisch ausreichender Sensivität und Spezifität für zervikales propriozeptives Fehlempfinden (*vestibulospinales* Rezeptorsystem) existiert. Der Gleichgewichtswahrnehmung liegt ein redundantes Rezeptorsystem zu Grunde, bei welchem es nur sinnvoll ist die zervik vestibulären Afferenzen zu untersuchen, wenn die anderen Rezeptoren der Gleichgewichtswahrnehmung keinen Reiz erhalten (Abb. 8). Die Frage ob es eine zervikal ausgelöste Missempfindung gibt, kann erst geklärt werden wenn es eine Untersuchungsmöglichkeit gibt, die „verlässliche“, valide und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Aufbauend auf den im Kapitel 1.4.1 geschilderten methodischen Schwierigkeiten, entwickelten wir einen neuen Untersuchungsansatz mit Hilfe des dreidimensionalen Rumpfkursionsstuhls, der als eine konsequente Weiterentwicklung des tonischen 3D-HDT und der von Holtmann geprägten motorisierten Stuhlkonstruktion mit fixiertem Kopf im Raum bei sich phasisch bewegendem Rumpf, verstanden werden kann. Hierfür haben wir einen Untersuchungsstuhl entwickelt, welcher zum einen ein *tonisch-statisches* und zum anderen ein *dynamisch-bewegliches* zerviko-okuläres Untersuchungsdesign in einem speziellen Versuchssetting klinisch prüfen soll. Dieser Aufbau erlaubt uns bei fixierter Kopf-im-Raum-Position (Kopf: *Punctum fixum*) sechs unterschiedliche *tonische Rumpfkursionshaltungen* (Rumpf: *Punctum mobile*) (Rumpfante- und Rumpfretroflexion, Rumpfkippung und Rumpftorsion nach rechts und links) einzustellen (Abb. 7).

In diesen sechs veränderten Kopf-zu-Rumpf-Positionen wurde die Modulation der Nystagmusfrequenz und –amplitude unter statisch-tonischen Bedingungen mittels 3D-Videookulographie über mindestens 50 s geprüft.

Aufgrund von Ergebnissen der Schwerelosigkeitsforschung kann angenommen werden, dass die physiologische vestibuläre Rezeptorhierarchie dynamischen Veränderungen unterliegt [Scherer (1985 b)]. Die Otolithen dominieren im Allgemeinen die Bogengangsinformation und zählen zu den einflussreichsten Rezeptorsystemen der Gleichgewichtswahrnehmung [Scherer (1985 b)].

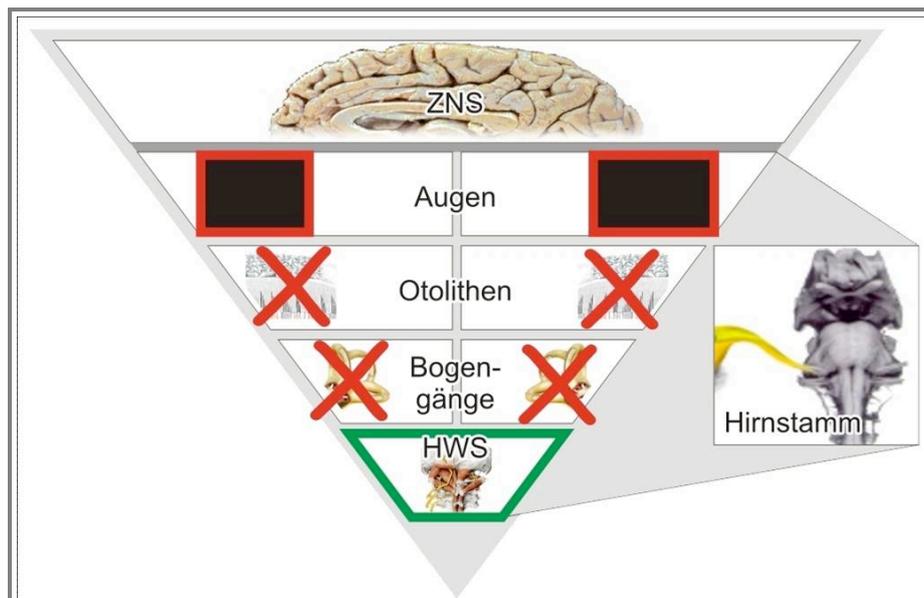


**Abb. 7** zeigt die neue Untersuchungsmethode: der 3D- Rumpfflexionsstuhl. Mit fixiertem Kopf (Punctum fixum) und dabei beweglichem Rumpf (Punctum mobile). Das okuläre System erhält keinen Reiz durch eine Abdunklung des 3D- VOG- Systems.

Wenn die genannten vestibulären Rezeptorsysteme (Otolithen/Bogengangssystem und Augen) bedingt durch ein experimentelles Setting bewusst ohne adäquaten Reiz bleiben, so kann mit Recht angenommen werden, dass die sonst untergeordneten somatosensiblen Rezeptoren der Halswirbelsäule an Wichtigkeit für die Körper-im-Raum-Wahrnehmung zunehmen (Abb. 8). [Scherer (1985 b)]; [Parker (2003)]

Erkrankungen der Otolithenorgane oder auch der Halswirbelsäule gehen häufig mit abnormen Empfindungen von der raumorientierenden Körperwahrnehmung einher. Es kann zu Schwindelempfindungen und damit verbundenen Fallneigungen kommen. Eine häufig verwendete Methode für die Wahrnehmung der Körperkipfung zur Schwerkraft ist die Überprüfung der so genannten Subjektiven Vertikale im Raum. In der klinisch orientierten Literatur wird die Subjektive Vertikale durch einen statischen Rumpf und einen gekippten Kopf, welcher in die subjektiv empfundene Vertikale zurückgeführt werden soll, überprüft [Clarke (1995)] . Durch die Anordnung des Utriculus und Sacculus im Vestibularorgan kann sowohl Beschleunigung in allen Richtungen als auch die statische Neigung des Kopfes zur Schwerkraft wahrgenommen und „errechnet“ werden. Neben der Wahrnehmung der Otolithen ist auch die somatosensorische und propriozeptive Leistung des zervikalen Überganges zum Rumpf an der Empfindung beteiligt. [Clarke (1995)]

In unserem Versuchssetting gilt es wie bereits beschrieben die Otolithenfunktion bewusst auszuschalten, um gezielt und isoliert die zervikale Leistung zu bestimmen. Auch bei der subjektiven Vertikalen oder „gefühlten Null“ im Raum zielen wir auf die Erhebung der zervikal somatosensorische Einzelleistung ab. Das Vestibularorgan erhält über die fixierte Kopfposition keine Information über die Raumorientierung (Abb. 8).



**Abb. 8** stellt das optimale Untersuchungsdesign des 3D-Rumpfxursionsstuhl zur Messung der extrakraniellen vestibulären Rezeptorsysteme der Nackenmuskulatur und Halswirbelsäulenregion dar.

Im Wesentlichen werden folgende Parameter in unserem neuen Versuchsaufbau des 3D-Rumpfxursionsstuhl verändert:

1. Aufgrund eines *tonischen* Untersuchungsdesigns bestehen keine Reflexbedingungen (wie bei *phasischen* Untersuchungen des COR). Somit wurde ein maximal vereinfachtes Versuchsetting gewählt, welches auf eine Messfehlerreduzierung hinwirken soll. Hierdurch soll eine best mögliche Isolierung der zervikalen somatosensiblen Vestibularisafferenzen ermöglicht werden. Dem vestibulär-*intrakraniellen* Rezeptorsystem wird kein adäquater Reiz während der Untersuchung geboten. Dies geschieht durch die apparative Sicherstellung einer konstanten Nullposition des Kopfes. Zerviko-okuläre Messparameter, die durch diesen Versuchsaufbau ausgelöst werden, wären folglich als zervikale somatoefferente Ereignisse interpretierbar.
2. Die Rumpfxursionsmöglichkeiten wurden erweitert auf nicht nur torsionale Rumpfbewegungen, sondern ebenfalls auf Rumpfkippungen zur Seite und Rumpfflexion nach antegrad und retrograd bei stationärem Kopfverhältnis. Die Nystagmusauswertung erfolgt ebenfalls wie bei dem 3D-HDT dreidimensional, denn in Vorarbeiten wurde bereits die Bedeutung des zervikalen Vertikalnystagmus beschrieben. Somit wäre eine isolierte Betrachtung des Horizontalnystagmus nicht ausreichend und für den Zervikalnystagmus nicht pathognomonisch [Hölzl (2008)].

In der Entwicklung der Arbeitshypothesen interessierte nicht nur die Erhebung eines okulären Messparameters, sondern auch ein Modulationsversuch dieser Parameter, durch eine zervikale transkutane Elektronervenstimulation (C-TENS). Vorversuche mit Succinylcholin verdeutlichen,

dass durch das Lokalanästhetikum weniger afferente Impulse aus dem Hals zum Vestibulariskernkomplex geleitet werden [Chan (1987)]; [Mergner (1982)]. Vermutet wird bei einer C-TENS Anwendung, dass es zu einer Herabsetzung der Aktionspotenzialfrequenz des propriozeptiven Nervenleitsystems kommt und damit zu einer Abschwächung der zu messenden Nystagmen. Neben den tonischen Untersuchungsparametern wollen wir ebenfalls auf dem 3D-Rumpfxkursionsstuhl eine phasische Komponente im Rahmen der subjektiv empfundenen Vertikalen im Raum untersuchen. Anzunehmen wäre, dass die kinästhetische Sensibilität wie in Vorstudien bei zervikal-/vestibulär-defizitären Probanden auch bei Probanden nach C-TENS Anwendung vermindert ist [Weikert (2008)].

**Hieraus ergeben sich folgende Arbeitshypothesen:**

1. Ist es möglich, bei jungen, vestibulär gesunden Erwachsenen einen *zervikalen Provokationsnystagmus (C-PN)* lediglich durch Rumpfauslenkung, Komma? auf dem 3D-Rumpfxkursionsstuhl auszulösen?
2. Hat die zervikale Anwendung von TENS eine Auswirkung auf den Spontannystagmus (SPN), also auf eine Nystagmusaktivität auf dem 3D- Rumpfxkursionsstuhl *ohne* dass eine zervikale Kopf-zu-Rumpf-Auslenkung erfolgt?
3. Ist es möglich einen auf dem 3D- Rumpfxkursionsstuhl gemessenen zervikalen Provokationsnystagmus, also *mit zervikaler Auslenkung im craniozervikalen Übergang*, durch eine C-TENS Anwendung placebokontrolliert zu beeinflussen?
4. Ist es möglich, auf dem 3D-Rumpfxkursionsstuhl durch eine placebokontrollierte C-TENS Anwendung die kraniozervikale kinästhetische Sensibilität in einem phasischen Untersuchungssetting im Rahmen der subjektiv empfundenen Vertikalen im Raum zu beeinflussen?
5. Ist ein Unterschied der C-TENS Wirkung zwischen den okulären (VOG) und den vestibulospinalen (Posturographie- Messplatte, Unterberger- Tretversuch) Untersuchungsparametern zu erkennen?