

Aus der Klinik für Orthopädie  
der Heinrich-Heine-Universität

Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Rüdiger Krauspe

Analyse der Bewegungen der Halswirbelsäule – insbesondere der Rotation – und  
deren Einfluss auf das Rückenmark mittels funktioneller  
Magnetresonanztomographieaufnahmen bei gesunden Sportstudenten

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Ludwig Klasen

2017

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der  
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr. med. Klaus-Peter Schulitz

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. Sebastian Gehrman

gewidmet meiner Familie

## Zusammenfassung

Die Einflüsse der Anteflexions-, Retroflexions- und Rotationsstellung der Halswirbelsäule (HWS) auf Lage und Durchmesser des Rückenmarks werden an neun gesunden Sportstudenten mittels Magnetresonanztomographie (MRT) untersucht. Ziel dabei ist, die Änderung der funktionellen topographischen Anatomie des Rückenmarks vor allem in Rotation genauer und umfassender darzustellen. In der Literatur sind bereits Einflüsse der Anteflexions- und Retroflexionsbewegung der HWS auf das Rückenmark beschrieben (vgl. Chiavassa und Mitarbeiter (2000), Kuwazawa und Mitarbeiter (2006b), Muhle und Mitarbeiter (1998), Zhang und Mitarbeiter (2011)), den Einflüssen einer HWS-Rotation auf das Rückenmark wird aber zum aktuellen Zeitpunkt noch wenig Beachtung geschenkt.

Die Vermessung der Halswirbel (HW) und ihrer Übergänge zum Kopf und zur Brustwirbelsäule in Anteflexions-, Retroflexions-, Neutral- und Rotationsstellung bilden in der vorliegenden Arbeit die Grundlage und Referenzwerte, um die Auswirkungen einer Bewegung der HWS auf das Rückenmark zu analysieren. Bei Anteflexions- und Retroflexionsstellung wurden die Flexionswinkel, der *Subarachnoidalraum*, der *anterior-posteriore* Rückenmarksdurchmesser und die Verlagerung des Rückenmarks im Spinalkanal vermessen. Bei Rotationsstellung wurden die Rotationswinkel der Wirbel sowie der Torsionswinkel, die Lage und der Durchmesser des Rückenmarks im Spinalkanal vermessen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass sich die Verlagerung des Rückenmarks durch die Rotation der HWS in drei Bereiche einteilen lässt: In die Bereiche des *Atlas*, des *Axis* und der Segmente HW4, HW5 und HW6. Das Rückenmark verlagert sich nach dem Muster *ipsilateral-kontralateral-ipsilateral*. Die Verschiebungen, die im *Atlanto-axial*-Gelenk durch die exzentrische Rotation entstehen, werden in den Segmenten HW4, HW5 und HW6 mit einer signifikanten Ausgleichsbewegung kompensiert.

Die Verteilung der Rückenmarkstorsion und der Halswirbelrotation unterscheidet sich in den einzelnen Bewegungssegmenten der HWS signifikant von einander. Im Bereich HW1-HW2 findet 64 % der gesamten Halswirbelrotation statt, während der Anteil der Rückenmarkstorsion hier nur 25 % beträgt. Indes verteilt sich die Rückenmarkstorsion gleichmäßiger auf die Segmente HW1-HW2, HW2-HW3, HW3-HW4 und HW4-HW5. Zudem vermehrt sich die Rückenmarkquerschnittsfläche signifikant um 11 % auf Höhe des *Dens axis*.

Bei der Anteflexionsbewegung verlagert sich das Rückenmark nach *ventral* mit einem *punctum maximum* auf Höhe der Bandscheibe HW5-HW6. Zudem verringert sich der *anterior-posteriore* Rückenmarksdurchmesser um 4,8 % auf Höhe des *Dens axis*. Bei der Retroflexionsbewegung verlagert sich das Rückenmark nach *dorsal* mit einem *punctum maximum* auf Höhe der Bandscheibe HW5-HW6. Zudem vergrößert sich der *anterior-posteriore* Rückenmarksdurchmesser um 4,8 % auf Höhe des HW7-BW1.

Die Messungen der Anteflexions- und Retroflexionsbewegungseinflüsse auf das Rückenmark bestätigen frühere Arbeiten, die eine Lage- und Durchmesseränderung des Rückenmarks feststellen. Die erfolgten Messungen zur Rotation der HWS zeigen sehr detailliert das bisher nicht in diesem Umfang beschriebene Bewegungs- und Anpassungsverhalten des Rückenmarks und ergänzen das Gesamtbild seiner funktionellen topographischen Anatomie.



## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abb.</b>	Abbildung	<b>mm<sup>2</sup></b>	Quadratmillimeter
<b>BWS</b>	Brustwirbelsäule	<b>MRT</b>	Magnetresonanztomographie
<b>BW</b>	Brustwirbel	<b>ms</b>	Millisekunde
<b>bzw.</b>	beziehungsweise	<b>Oc</b>	<i>Occiput</i>
<b>ca.</b>	circa	<b>RM</b>	Rückenmark
<b>cm</b>	Zentimeter	<b>STIR</b>	Short-Tau-Inversion-Recovery
<b>CT</b>	Computertomographie	<b>TE</b>	<i>echo time</i>
<b>d.h.</b>	das heißt	<b>TI</b>	<i>inversion time</i>
<b>HW</b>	Halswirbel	<b>TR</b>	<i>repetition time</i>
<b>HWS</b>	Halswirbelsäule	<b>vgl.</b>	vergleiche
<b>MeSH</b>	<i>Medical Subject Headings</i>	<b>z.B.</b>	zum Beispiel
<b>mm</b>	Millimeter		

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Anatomie der Halswirbelsäule und des Rückenmarks	2
1.2 Literaturrecherche	6
1.2.1 Methoden der Literaturrecherche	6
1.2.2 Ergebnisse der Literaturrecherche für verwendete Vermessungsmethoden	8
1.2.3 Ergebnisse der Literaturrecherche für Veränderungen des Rückenmarks und seiner umgebenden Strukturen in verschiedenen Positionen	17
1.3 Ziele der Arbeit	21
2 Material und Methoden	22
2.1 Magnetresonanztomograph und Einstellungen	22
2.2 Probanden	22
2.3 Lagerung im Magnetresonanztomographen	22
2.4 Verwendete Vermessungsprogramme	23
2.5 Statistik	23
2.6 Auswahl und Entwicklung der Vermessungsmethoden	24
2.6.1 Anforderungen an die Vermessungsmethoden	24
2.6.2 Definition der Methoden zur Vermessung von Rückenmark und HWS in der Sagittalebene	24
2.6.3 Definition der Methoden zur Vermessung von Rückenmark und HWS in der Transversalebene	32
3 Ergebnisse	40
3.1 Bewegungsumfang der Halswirbelsäule	40
3.1.1 Bewegungsumfang der Anteflexions-Retroflexionsbewegung der gesamten HWS	40
3.1.2 Bewegungsumfang der Anteflexions-Retroflexionsbewegung der einzelnen HWS-Segmente	40
3.1.3 Bewegungsumfang der Rotation	41
3.2 Verlagerung des Rückenmarks im Spinalkanal	42
	IV

3.2.1	Verlagerung des Rückenmarks im <i>Subarachnoidalraum</i> bei Anteflexions-Retroflexionsbewegung der HWS	42
3.2.2	Verlagerung des Rückenmarks bei Rotationsbewegung der HWS	43
3.3	Änderungen der Rückenmarksform durch Bewegungen	45
3.3.1	Änderung des Rückenmarksdurchmessers bei Anteflexions-Retroflexionsbewegungen	45
3.3.2	Änderung von Rückenmarksdurchmesser und -Fläche in Rotation	47
3.4	Vergleich von knöchernem Rotationswinkel der Halswirbel und Torsionswinkel des Rückenmarks in Rotationsstellung	48
4	Diskussion	51
4.1	Zusammenfassung der Fragestellung und Ergebnisse dieser Arbeit	51
4.2	Einflüsse der Ante- und Retroflexionsbewegung	53
4.2.1	Lageveränderungen des Rückenmarks im Spinalkanal in Anteflexions-Retroflexionsbewegung	53
4.2.2	Veränderung des Rückenmarksdurchmessers in Anteflexions-Retroflexionsbewegung	54
4.3	Diskussion der Einflüsse der Rotationsbewegung	55
4.3.1	Verlagerung des Rückenmarks in Rotation	56
4.3.2	Veränderung von Rückenmarksdurchmesser und –Querschnittsfläche in Rotation	58
4.4	Fazit zur Diskussion der Ergebnisse	59
4.5	Diskussion der Limitationen und Einschränkungen der Methode	59
4.5.1	Auswahl der Probanden	59
4.5.2	MRT-Aufnahmen	60
4.5.3	Lagerung der Probanden	61
4.5.4	Aufnahmen von Bewegungskombinationen	61
4.5.5	Eichung des Bildrandes in Transversalaufnahmen	62
4.5.6	Torsionswinkel des Rückenmarks	62
4.5.7	Messungen	62
4.6	Ausblick	62
5	Abbildungsverzeichnis	65
6	Quellenverzeichnis	67

# 1 Einleitung

Das Rückenmark als Verbindung zwischen zentralem und peripherem Nervensystem wird durch die Wirbelsäule geschützt. Die Halswirbelsäule hat einen großen Bewegungsfreiraum, um die visuelle und akustische Erfassung der Umgebung zu erleichtern (Bogduk und Mercer, 2000). Das Rückenmark muss sich diesen Bewegungen anpassen. Gegenstand dieser Arbeit soll sein, das Verhalten des Rückenmarks in Neutralstellung gegenüber der experimentell erzeugten maximalen Endphase der Bewegung um die X- und Y-Achse der HWS zu untersuchen.

Unter der Neutralstellung verstehen wir die Mittelstellung des Kopfes und der HWS entsprechend der Neutral-Null-Methode (Schiebler, 2004a). Die Funktionsstellungen umfassen die Ante- und Retroflexion sowie die Rechts- und Linksrotation des Kopfes. Die Seitneigung ist nicht Thema der hier vorliegenden Arbeit.

Um sich der oben genannten Thematik anzunähern, werden zunächst in einer Literaturrecherche bisherige Erkenntnisse zum Verhalten des Rückenmarks – d.h. in diesem Fall seiner Verlagerung – in Funktionsstellungen an gesunden Probanden zusammengetragen. Daraufhin werden die konkreten Ziele der vorliegenden Forschungsarbeit formuliert.

Im Anschluss werden in einer empirischen Studie die Auswirkungen der Rotation der Halswirbelsäule auf die Beweglichkeit des Rückenmarks untersucht. Dies geschieht anhand einer Analyse von MRT-Aufnahmen der HWS von gesunden Sportstudenten. Mit den gesammelten Daten zum Verhalten des Rückenmarks in Abhängigkeit von einer Bewegung der HWS werden umfassende Vergleichswerte für zukünftige Arbeiten bereitgestellt.

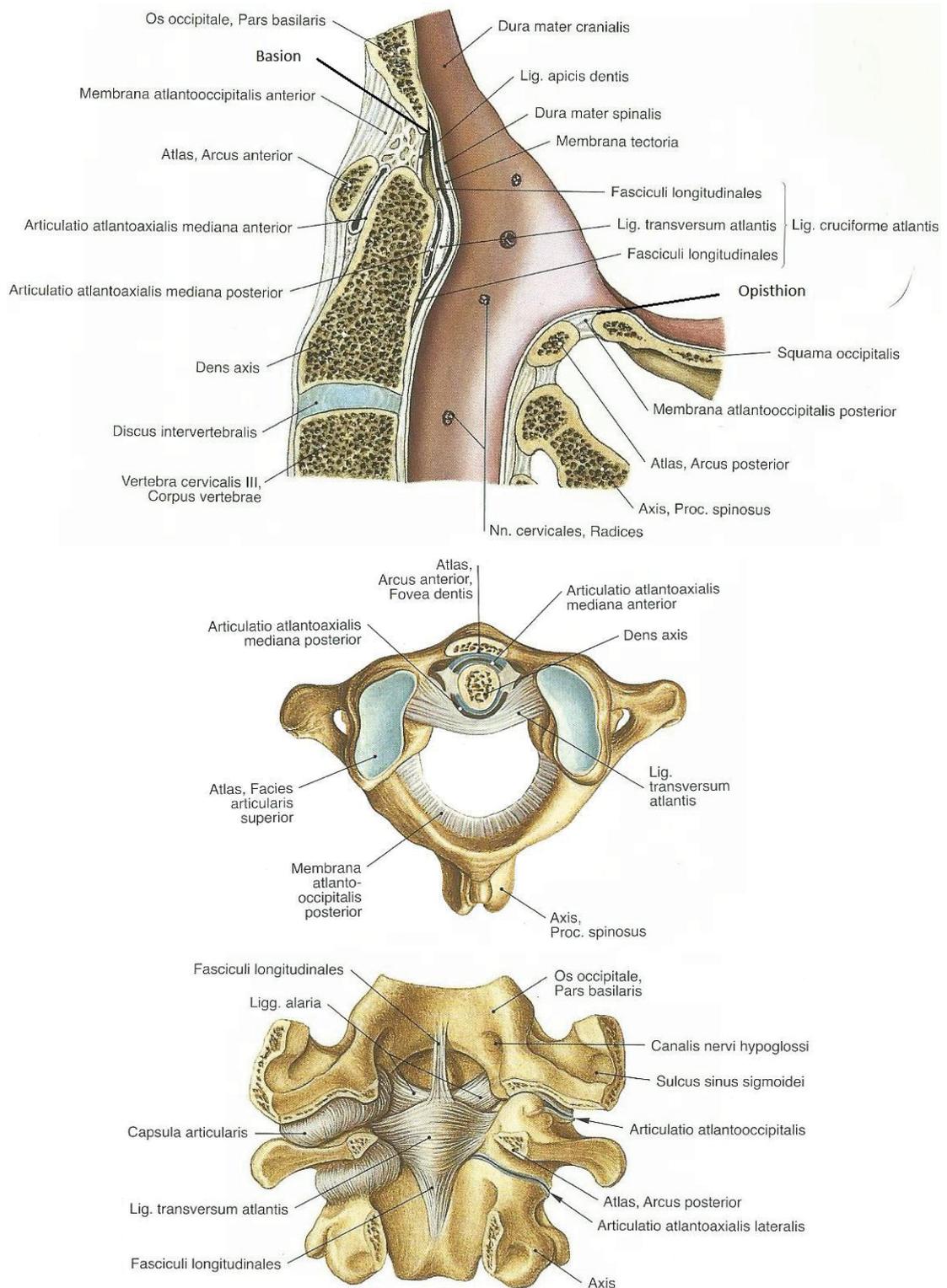
## 1.1 Anatomie der Halswirbelsäule und des Rückenmarks

Um die Einflüsse von Bewegungen der HWS auf das Rückenmark analysieren und interpretieren zu können, sind genaue Kenntnisse von den regionalen anatomischen Gegebenheiten von höchster Bedeutung. Vor allem die Aufhängung und die Fixierung des Rückenmarks im *Canalis vertebralis* sind für die Interpretation der Ergebnisse dieser Doktorarbeit grundlegend.

Die HWS besteht aus sieben Wirbeln: dem *Atlas*, dem *Axis* und fünf weiteren Halswirbeln.

Der *Axis* bildet mit dem *Occiput* das *Atlanto-okzipital*-Gelenk und damit den Übergang der HWS zum Schädel. *Atlas* und *Axis* mit dem *Dens axis* unterscheiden sich weitgehend von den restlichen Wirbeln und bilden die Gelenke *Atlanto-axialis mediana* und *Atlanto-axialis lateralis* (siehe Abb. 1, Schiebler, 2004b). Im *Atlanto-axial*-Gelenk finden 20° - 30° der Drehbewegung aus der Neutralstellung zu jeder Seite statt (Schiebler, 2004b). Unterhalb des *Axis* bilden immer zwei Wirbel ein Bewegungssegment, verbunden durch die Bandscheibe und zwei *Zygapophysial*-Gelenke (Schiebler, 2004b). Gemeinsam ermöglichen die Gelenke der HWS die Bewegungen des Kopfes in Form von Ante-, Retro- und Lateralflexion sowie Rotation (Schiebler, 2004b).

Im *Canalis vertebralis*, gebildet durch die Wirbel, ist das Rückenmark geschützt. Die HWS ist jedoch durch die Wirbelgelenke der flexibelste Teil der Wirbelsäule (Schiebler, 2004b). Das Rückenmark als Fortsetzung der *Medula oblongata* mit seinen acht paarigen Nervenabgängen hat abhängig von der Messstelle unterschiedliche Durchmesser (Schiebler, 2004c). Die Unterschiede ergeben sich aus der Größe der Hautflächen und Muskeln des Gebietes, welche das Rückenmarksgebiet innerviert (Schiebler, 2004c). Die Durchtrittspunkte der *Nervi spinales* sind die *Foramina intervertebralia*, die von *cranial* nach *caudal* schmaler werden und durch die *Unci corporis* in der Mitte sanduhrförmig eingedellt sind (Schiebler, 2004b). Auch muss der Verlauf der *A. vertebralis* erwähnt werden. Die *A. vertebralis* verläuft in einem *osteofibrösen* Kanal gebildet durch die *Foramina transversalia* und liegt damit in enger topographischer Beziehung zu den *Nervi spinales* und dem Halssympatikus.

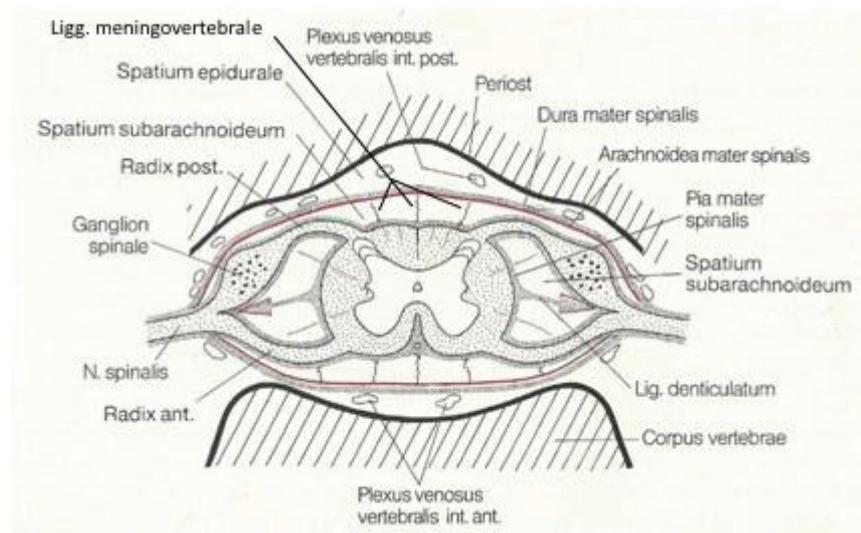


**Abb. 1: Anatomie des craniocervicalen Übergangs, Atlanto-okzipital-Gelenk und Atlanto-axial-Gelenk (Putz und Pabst, 2006)**

N. = Nervus, Nn. = Nervi, Lig. = Ligamentum, Ligg. = Ligamenta

Das Rückenmark mit der innenliegenden *Substantia grisea* und äußeren *Substantia alba* wird von drei Schichten umgeben: der *Dura mater spinalis*, der *Arachnoidea mater spinalis* und der *Pia mater spinalis* (siehe Abb. 2, Schiebler, 2004c). Die Dura

bildet dabei die sehr widerstandsfähige äußere Schicht, welche das gesamte Rückenmark umgibt. Im *Canalis vertebralis*, beginnend am *Foramen magnum*, bildet die *Dura* mit einem äußeren Blatt das *Periost* der Wirbel (Schiebler, 2004c). Zwischen dem äußeren und inneren Blatt der *Dura*, dem Epiduralraum, befindet sich in Fettgewebe eingebettet der *Plexus venosus vertebralis* (Schiebler, 2004c). Die *Dura* bildet das *Epineurium* der *Nervi spinales* (Schiebler, 2004c). Die *Arachnoidea mater spinalis* ist dem inneren Blatt der *Dura* aufgelagert, welche das *Perineurium* der *Nervi spinales* bildet (Schiebler, 2004c).



**Abb. 2: Anatomie des Rückenmarks und der Rückenmarkshäute (Schiebler, 2004d)**

N. = Nervus, Nn. = Nervi, Lig. = Ligamentum, Ligg = Ligamenta.

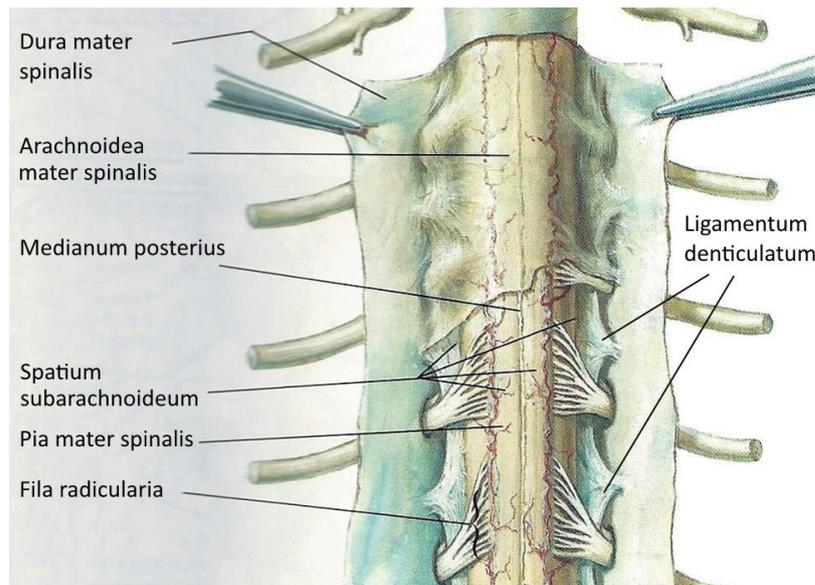
Das Rückenmark und die *Radices anteriores* und *posteriores* umgibt die aufgelagerte *Pia mater spinalis* (Schiebler, 2004c). Zwischen der *Pia* und der *Arachnoidea* befindet sich das *Spatium subarachnoideum*, das mit *Liquor cerebrospinalis* ausgefüllt ist (Schiebler, 2004c).

Die Position des in *Liquor* eingebetteten Rückenmarks der HWS wird durch verschiedene Strukturen gehalten. Seitlich bildet die *Pia* ca. 20 paarige kollagenfaserhaltige *Septen* aus, die die *Ligamenta denticulata* bilden und im *cervicalen* und *thorakalen* Abschnitt der Wirbelsäule auftreten (Schiebler, 2004c). Die dreieckigen Ausläufer sind kleiner und zahlreicher in den *cervicalen* Ebenen (3 – 5 mm) und größer und weniger zahlreich in den *thorakalen* Ebenen (21 – 26 mm) (Polakund Mitarbeiter, 2014). Jedes dieser *Speten* besteht aus einem einzigen

schmalen Faserband das auf Höhe des zwölften Brustwirbels entspringt und aus longitudinalen Kollagenfasern besteht (Polak und Mitarbeiter, 2014).

Die paarigen Zacken des *Ligamentum denticulatum* bestehen aus horizontalen Kollagenfasern und dringen zum einen in die *Substantia grisea* ein, ziehen dann zwischen den *Radices* durch und heften zum anderen der *Dura* an (siehe Abb. 3, Gürer und Mitarbeiter, 2014). Die oberste Zacke verläuft durch das *Foramen magnum* und ist auf Höhe der Eintrittsstelle der *Arteria vertebralis* an der *Dura mater cranialis* angehaftet (Schiebler, 2004c). Die *caudalste* Zacke befindet sich in der Regel oberhalb der Wurzel der ersten Lumbalnerven (Polak und Mitarbeiter, 2014). Das *Ligamentum denticulatum* ist ausgesprochen dehnbar, eine Dehnung um das 1,5-fache ist möglich (Polak und Mitarbeiter, 2014). Ebenfalls ist seine Reißfestigkeit gering bei ca. 1 N ( $N = \text{Masse} / \text{Sekunde}^2$ ) (Polak et al., 2014). Diese Festigkeit nimmt im Bereich der HWS nach *caudal* ab (Polak et al., 2014).

Ebenfalls sind die *Radices* an der seitlichen Befestigung des Rückenmarks beteiligt, auch wenn sie durch ihren mikroskopischen wellenförmigen Aufbau Zugwirkungen gut nachgeben können (Lang und Emminger (1963), Gürer und Mitarbeiter (2014)). Den Ansatzpunkt nach *cranial* bildet die *Medulla oblongata*, aus der sich das Rückenmark fortsetzt. Zur weiteren Fixierung des Rückenmarks im *Canalis vertebralis* dienen nach *dorsal* die in ihrer Ausprägung sehr variablen *Ligamenta meningovertebral*, welche zwischen dem *Dura*-Schlauch und dem *Ligamentum flavum* sich *craniocaudal* spannen (Shi und Mitarbeiter, 2014). Im *cervicalen* Abschnitt gibt es gegenüber der restlichen Wirbelsäule im *anterioren Canalis vertebralis* keine *Ligamente*, die wie die *Hofmann-Ligamente* zur Fixierung beitragen (Loughenbury und Mitarbeiter (2006), Wadhvani und Mitarbeiter (2004)).



**Abb. 3: Anatomie der Rückenmarkshäute mit Spinalnerven (Netter, 2000)**

## 1.2 Literaturrecherche

Die Grundlage für das empirische Vorgehen in dieser Arbeit bildet eine umfassende und systematische Literaturrecherche. Auf diese Weise werden gezielt die folgenden Fragestellungen behandelt:

- Welche Methoden zur Vermessung der Bewegung der HWS werden verwendet?
- Was wird bisher zur funktionellen topographischen Anatomie des Rückenmarks im Bereich der HWS beschrieben?

### 1.2.1 Methoden der Literaturrecherche

Zur Beantwortung der Fragen wird eine systematische Übersichtsarbeit geleistet. Zur Studienrecherche wird die Meta-Datenbank *PubMed* herangezogen.

*PubMed* bezieht seine über 20 Millionen Veröffentlichungen aus dem *MEDLINE* der *U.S. National Library of Medicine* (National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine 8600 Rockville Pike, Bethesda MD, 20894 USA). Die Recherche findet im Zeitraum vom 20.01.2013 bis zum 23.04.2013 statt und schließt Arbeiten aus den Jahren 1911 bis 2013 ein.

Die verwendeten Suchwörter sind „*Cervical Spine*“, „*Rotation*“, „*Flexion*“, „*Extension*“, „*Magnetic Resonance Imaging*“, „*Tomography, X-Ray Computed*“ und „*Subarachnoid Space*“.

Die Suchbegriffe „*Rotation*“, „*Magnetic Resonance Imaging*“, „*Tomography, X-Ray Computed*“ und „*Subarachnoid Space*“ werden in der Suchfunktion von *Pubmed* als *MeSH-terms (Medical Subject Headings)* klassifiziert. Es handelt sich um Sammelbegriffe, unter denen synonym verwendete Wörter zusammengefasst werden. Auf diese Weise können bei der Suche gleichbedeutende Begriffe mitberücksichtigt werden. Die *MeSH-terms* müssen im Titel und/oder im *Abstract* des Artikels auftauchen, damit dieser als Suchergebnis ausgegeben wird.

Bei der im Rahmen dieser Arbeit erfolgten systematischen Suche werden die genannten Begriffe kombiniert, wie Tabelle 1 zeigt. Für die vorgefundenen Arbeiten werden Ein- und Ausschlusskriterien formuliert, nach denen die Arbeiten ausgewählt werden.

Als Einschlusskriterien für die Arbeiten wird Folgendes festgelegt: Der Schwerpunkt muss auf der HWS liegen, das heißt im Bereich des *atlanto-okzipitalen* Übergangs bis zum Übergang zur BWS. Als bildgebende Verfahren werden MRT, CT und Röntgen eingeschlossen soweit Aufnahmen in Neutral- und Anteflexion- und/oder Retroflexion-, Lateralflexion- und Rotationsstellung vorhanden sind ebenso wie Kombinationen und Aufnahmen von aktiven oder passiven Stellungen vorliegen.

Ausgeschlossen werden hingegen Arbeiten, die keine Bildgebung verwenden, ebenso wie Arbeiten, die nicht in Deutsch oder Englisch verfasst sind.

Die eingeschlossenen Publikationen werden anschließend hinsichtlich ihrer verwendeten Vermessungsmethoden aufgeschlüsselt (vgl. Tabelle 2). Unter den Abschnitten 1.2.2 bis 1.2.3 werden die Ergebnisse der Literaturrecherche, die für diese Arbeit relevant sind (vgl. 1.2), beschrieben.

## **1.2.2 Ergebnisse der Literaturrecherche für verwendete Vermessungsmethoden**

Nach strategischer Kombination der Suchbegriffe und Elimination doppelt ausgegebener Artikel (vgl. Tabelle 1) kommen aufgrund des groben Rasters der Suchbegriffe für die Auswertung der Ergebnisse 1401 Publikationen infrage.

In einem ersten Schritt werden die *Abstracts* der 1401 Publikationen hinsichtlich der Ein- und Ausschlusskriterien (vgl. Abschnitt 1.2.1) selektiert. Unter den 1401 Arbeiten werden 122 eingeschlossen. Bei der Durchsicht der Quellenangaben dieser 122 Artikel werden 102 weitere erhoben, die die Einschlusskriterien erfüllen.

In einem zweiten Schritt werden nun die Volltexte der insgesamt 224 Publikationen gesichtet und hinsichtlich der Ein- und Ausschlusskriterien (vgl. Abschnitt 1.2.1) untersucht. Auf dieser Basis müssen 161 Arbeiten ausgeschlossen werden.

Die verbleibenden 63 Artikel werden nun zum einen im Hinblick auf ihre Methoden (Anteflexion, Retroflexion, Rotation, Vermessung des Rückenmarks und Subarachnoidalraums) und zum anderen auf ihre Ergebnisse analysiert. Daraus ergibt sich, dass neun weitere Arbeiten aufgrund unzureichender Beschreibung der Vermessungsmethoden ausgeschlossen werden müssen.

In Tabelle 2 werden die Arbeiten nach Verteilung ihrer Untersuchungsschwerpunkte und ihrer Verwertbarkeit aufgeschlüsselt. In den Abschnitten 1.2.2.1, 1.2.2.2 und 1.2.2.3 werden neun der verbleibenden 54 Arbeiten exemplarisch beschrieben.

### Tabelle 1: Vorgehen bei der Literaturrecherche

Daten aus der Analyse vom 20.01.2013 bis 23.04.2013, gewonnen aus der Metadatenbank *PubMed* unter Verwendung der aufgelisteten Begriffe. Die Suchbegriffe wurden teilweise als „*MeSh*“ (*Medical Subject Headings*)-Begriffe verwendet, um Synonyme mitzuberechnen. Aufgelistet ist die Anzahl der Treffer. Durch die Kombination der Suchbegriffe konnte die Anzahl der Ergebnisse eingegrenzt werden. Zum Beispiel bildet Suchdurchlauf Nr. 10 die Kombination der Suchbegriffe *Cervical spine + Magnetic Resonance Imaging + Flexion + Extension* und liefert 424 Arbeiten.

Suchdurchlauf Nr.	Suchbegriff	Arbeiten
1	<i>Cervical spine</i>	16288
2	1+"Rotation"[MeSh]	863
3	1+"Magnetic Resonance Imaging"[MeSh]	1227
4	1+"Tomography, X-Ray Computed"[MeSh]	1045
5	1+Flexion	1582
6	1+Extension	1576
7	1+"Subarachnoid Space"[MeSh]	189
8	1+2+3	178
9	1+2+4	252
10	1+3+5+6	424
11	1+4+5+6	634
7-11	zusammengefügt	1401

Nr. = Nummer

#### 1.2.2.1 Vermessungsmethoden der Anteflexions-Retroflexionsbewegung des knöchernen Skeletts

Im Folgenden wird dargestellt, welche Methoden zur Vermessung der knöchernen Wirbelstellung im Bereich der HWS in der erhobenen Literatur verwendet werden.

Unter den 63 eingeschlossenen Arbeiten hat die Literaturrecherche 29 Publikationen geliefert, die sich mit der Ante- und Retroflexionsbewegung der HWS auseinandersetzen (siehe Tabelle 2). Bei sieben dieser Arbeiten werden die Methoden nicht nähergehend beschrieben. In den übrigen 22 Artikeln finden sich sehr unterschiedliche methodische Herangehensweisen. Zusammenfassend gelangt man von diesen Arbeiten auf die Schlussfolgerung, dass in der Literatur keine einheitliche Methode zur Vermessung der Ante- und Retroflexionsbewegung der HWS beschrieben ist.

**Tabelle 2: Aufschlüsselung der ausgegebenen Arbeiten hinsichtlich ihrer Methode**

Insgesamt wurden 63 Arbeiten in die weiterführende Analyse eingeschlossen, da sie eine ausreichend detaillierte Beschreibung ihrer Methode im Hinblick auf die hier relevante Fragestellung aufwiesen.

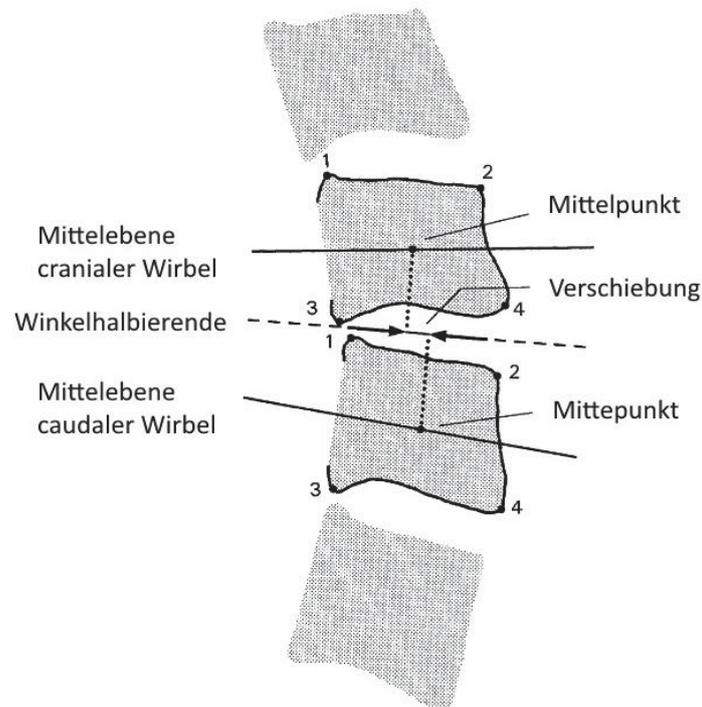
Methode	beschrieben	nicht ausreichend beschrieben
Anteflexion-Retroflexion	22	7
Rotation	18	2
Vermessung des Rückenmarks	9	
Vermessung des Subarachnoidalraums	5	

Die uneinheitliche Methodik in der Literatur ist höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass über die Jahre viele verschiedene röntgenologische Vermessungsmethoden entwickelt und eingesetzt wurden. Ebenso haben sich speziell die Technologien des MRT und CT (Computertomographie), die zur Vermessung der HWS besonders geeignet sind, innerhalb der letzten Jahre stark weiterentwickelt, so dass heute eine detailliertere Darstellung feiner Strukturen möglich ist. Abhängig von der klinischen bzw. wissenschaftlichen Fragestellung, steht zur Messung der Stellung der HWS heute deswegen eine breite Auswahl an Methoden zur Verfügung. Dazu soll im Folgenden ein kurzer Überblick gegeben werden.

Zur Vermessung der Ante- und Retroflexion werden in der Literatur beispielsweise *laterale* radiologische Funktionsaufnahmen für die Bestimmung der segmentalen Winkel verwendet (vgl. z.B. Leivseth und Mitarbeiter (2006), Puglisi und Mitarbeiter (2007), Reitman und Mitarbeiter (2004)). Dabei werden die Bilder der Neutralstellung mit der entsprechenden experimentell erzeugten Endphase der Funktionsstellung verglichen. Bei MRT- oder rekonstruierten CT-Aufnahmen werden als Grundlage für die Winkelbestimmung Bilder in Mittsagittalebene von funktionellen Aufnahmen herangezogen. Die Literaturrecherche zeigt darüber hinaus, dass in einem Teil der Arbeiten die Bewegungswinkel der HWS nur mit Hilfe von äußeren verstellbaren Halteapparaturen abgelesen werden (vgl. z.B. Muhle und Mitarbeiter (1995), Yuan und Mitarbeiter (1998) und Mönckeberg und Mitarbeiter (2009)).

Alle vorgefundenen Vermessungsmethoden für die Ante- und Retroflexionsbewegung der HWS detailliert zu beschreiben, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb werden exemplarisch die Arbeiten von Frobin und Mitarbeiter (2002), Harrison und Mitarbeiter (2000) und Karhu und Mitarbeiter (1999) als Referenzen für ein methodisches Vorgehen ausgewählt, welches sich auf MRT-Aufnahmen anwenden lässt, und im Folgenden nähergehend beschrieben.

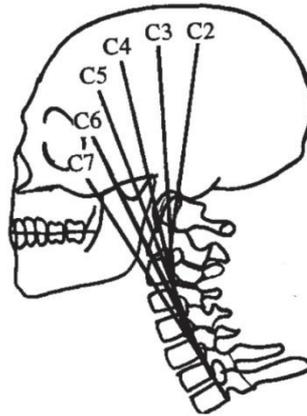
Frobin und Mitarbeiter (2002) haben eine Methode zur Vermessung der Anteflexions-Retroflexionsstellung der HWS entwickelt (siehe Abb. 4). Als Grundlage werden Seitbild-Röntgenaufnahmen verwendet. In der oberen HWS wird der Winkel zwischen *Occiput* (OC) und *Atlas* mit Hilfe zweier Linien bestimmt. Die erste Linie liegt zwischen dem *Palatum durum* und dem untersten Punkt des *Occiputs*. Die zweite Linie wird mittig durch den *Atlas* gelegt. Der Winkel zwischen HW1-HW2 wird mit einer Linie gebildet, die mittig durch den *Atlas* verläuft und mit einer Linie, die zwischen den beiden Eckpunkten der unteren Endplatte von HW2 gezogen wird. Bei der unteren HWS (HW2-HW7) wird wie folgt vorgegangen: Die vier Ecken des Wirbelkörpers, die auf den Röntgenschirm projiziert werden, werden bestimmt. Die zwei Mittelpunkte, die jeweils zwischen beiden *anterioren* und *posterioren* Ecken liegen, werden mit einer Linie verbunden. Diese Mittelebene des *cranialen* Wirbels wird dann mit der Mittelebene des *caudalen* Wirbels verglichen und der Winkel gemessen. Bei dieser Methode kann es bei Deformationen der Wirbelkörper, wie z.B. Osteophyten, zu Fehlergebnissen kommen (Frobin und Mitarbeiter (2002)).



**Abb. 4: Definition der Winkelbestimmung und axialen Verschiebung in den Bewegungssegmenten HW2-HW3 bis HW6-HW7 nach Frobin und Mitarbeiter (2002)**

Die vier Ecken des Wirbelkörpers, die auf den Röntgenschirm projiziert werden, werden bestimmt. Die zwei Mittelpunkte, die jeweils zwischen beiden *anterioren* und *posterioren* Ecken liegen, werden mit einer Linie verbunden. Diese Mittelebene des *cranialen* Wirbels wird dann mit der Mittelebene des *caudalen* Wirbels der Winkel bestimmt. (Diese Abbildung wurde aus der Arbeit von Frobin und Mitarbeiter (2002) übernommen.)

Die *Posterior-Tangenten*-Methode wurde von Harrison und Mitarbeiter (2000) erarbeitet. Hierbei werden an die *posteriore* Wirbelkörperwand Tangenten angelegt und diese mit der jeweils höheren oder tieferen *posterioren* Segmenttangente verglichen und der Winkel bestimmt (siehe Abb. 5). Aufgrund der Notwendigkeit von Wirbelkörpern ist die Methode auf die untere HWS beschränkt (Harrison und Mitarbeiter (2000)).



**Abb. 5: Posterior-Tangenten-Methode zur Vermessung der Halswirbelsäule Halswirbel 2 bis 7 (C2 bis C7) nach Harrison und Mitarbeiter (2000)**

An die *posteriore* Wirbelkörperwand werden Tangenten angelegt und diese mit der jeweils höheren oder tieferen *posterioren* Segmenttangente der Winkel bestimmt. (Diese Abbildung wurde aus der Arbeit von Harrison und Mitarbeiter (2000) übernommen.)

In der Arbeit von Karhu und Mitarbeiter (1999) wird die HWS mittels MRT vermessen. Die Lagerung des Kopfes erfolgt dabei durch eine verstellbare Kopfstütze. Anteflexions- und Retroflexionsbewegung werden im Bereich OC, HW1 und HW2 vermessen. Der Winkel zur Bestimmung der Anteflexionsstellung wird für den Kopf mittels einer Linie vom *Opisthion* und hartem Gaumen zum unteren Bildrand bestimmt. Auf der HW1-Ebene wird eine Linie an die Unterseite des *anterioren* und *posterioren* Bogens des *Atlas* gelegt und der Winkel mit dem unteren Bildrand vermessen. Der Winkel des *Axis* wird mit Hilfe einer parallelen Linie zur Rückseite des *Dens axis* und dem unteren Bildrand ermittelt (Karhu und Mitarbeiter (1999)). Der harte Gaumen hat jedoch keinen Bezug zum Rückenmark, weswegen er als anatomische Bezugsgröße für die vorliegende Untersuchung ungeeignet ist.

Zusammengefasst führt die Literaturrecherche zu dem Ergebnis, dass es keine Vermessungsmethode für die Ante- und Retroflexionsbewegung der HWS in dem Ausgangsmaterial gibt, die die gesamte HWS und ihre Übergänge einschließt und entsprechend der hiesigen Fragestellung den Bezug zum Rückenmark herstellt. Das bedeutet, dass für die vorliegende Dissertation eine eigene Methode zur Vermessung der Ante- und Retroflexionsbewegung der HWS auf Basis der vorhandenen Methoden entwickelt werden muss. Diese ist im Abschnitt 2.6.2.1 beschrieben.

### 1.2.2.2 Vermessungsmethoden der Rotationsbewegung am knöchernen Skelett

Bei der Vermessung der Rotationsbewegung der HWS kommen in der Literatur zwei wesentliche Methoden zur Anwendung, welche hier exemplarisch durch die Arbeiten von Penning und Wilmink (1987) und Ishii und Mitarbeiter (2004b) vorgestellt werden.

#### Winkelmessung zwischen Wirbelkörper und Bildrand

In der experimentellen Arbeit von Penning und Wilmink (1987) werden 26 gesunde Probanden im CT hinsichtlich der Rotation der gesamten HWS in der Mittelstellung untersucht.

Der Untersuchungsbereich schließt OC bis BW1 ein. Bei den transversalen Schnittbildern werden Linien durch anatomische Strukturen gelegt und deren Winkel zum Bildrand verglichen. Auf Höhe des Kopfes wird eine Linie durch das Nasenseptum und die Mitte des *Foramen magnum* gelegt. Auf Höhe des *Atlas* wird eine Linie durch die *Processi transversii* gelegt. Die Linie am *Axis* wird an die Wirbelkörpervorderwand angelegt. Für die Segmente HW3 bis BW1 wird ebenfalls jeweils eine Linie an die vordere Seite des Wirbelkörpers angelegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Messwerte zum segmentalen Rotationswinkel der Halswirbelsäule nach Penning und Wilmink (1987)**

Mittelwert gemessen in Grad (°) in maximaler Rotation nach rechts oder links mittels transversaler Computertomographieaufnahmen an gesunden Probanden mit einem Durchschnittsalter von 22,6 Jahren.

	OC-HW1	HW1-HW2	HW2-HW3	HW3-HW4	HW4-HW5	HW5-HW6	HW6-HW7	HW7-BW1
Rotation	1°	40,5°	3°	6,5°	6,8°	6,9°	5,4°	2,1°

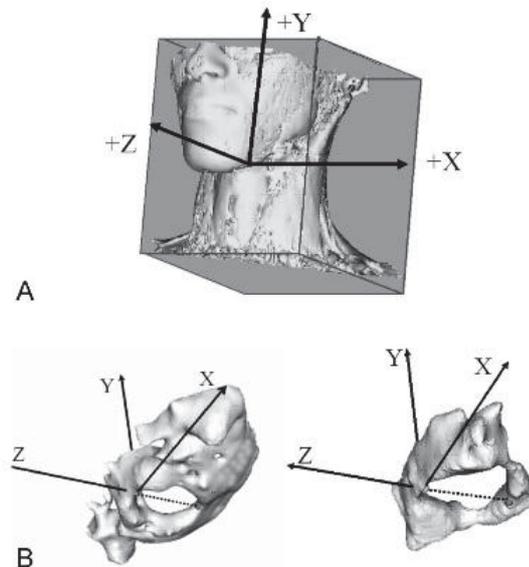
Anzahl = 26 Probanden; OC = *Occiput*, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

#### 3D-Analyse

In der Arbeit von Ishii und Mitarbeiter (2004b) werden zur Rotationswinkelvermessung aus MRT-Aufnahmen dreidimensionale Darstellungen errechnet und ausgewertet. In der Arbeit wird an 15 gesunden Probanden die obere HWS von OC bis HW2 vermessen. In einer weiteren Arbeit wird mit dem selben Verfahren auch die untere HWS von HW2-BW1 vermessen (Ishii und Mitarbeiter, 2004a).

Die 3D-Aufnahmen zweier verschiedener Positionen werden mittels der *Voxel-based-Registrations-Methode* von Ashburner und Friston (2000) übereinander gelegt und durch an die Wirbel angepasste Wirbelkörperachsen verglichen und somit ein Winkel errechnet. Als Ausgangsebene für die Koordinaten des Kopfes wird die Linie mittig zwischen dem *anterioren* und *posterioren* Rand des *Foramen magnum* als z-Achse, dazu die vertikale Achse als y-Achse und die orthogonale Achse als x-Achse gewählt (siehe Abb. 6).

Zur Vermessung des *Atlas* wird die Ausgangslinie zwischen den *anterioren* und *posterioren* Rändern des *Foramen vertebrale* gelegt. Zur Vermessung der Wirbel der restlichen HWS wird eine Linie parallel zur *inferioren* Wirbelkörperplatte gelegt. Die Ergebnisse befinden sich in Tabelle 4.



**Abb. 6: Koordinatensystem zur dreidimensionalen Darstellung des Rotationswinkels der Halswirbel nach Ishii und Mitarbeiter (2004b)**

A: Absolutes räumliches Koordinatensystem. Die positive x-Achse ist nach links gerichtet, senkrecht zu der Sagittalebene. Die positive y-Achse wird nach *kranial* gerichtet und die positive z-Achse nach *anterior*.

B: Anatomisches Koordinatensystem für *Occiput* und *Atlas*. Die z-Achse des *Occiput* verläuft parallel zur mittleren Verbindungslinie zwischen dem vorderen und hinteren Rand des *Foramen magnum*. Zur Vermessung des *Atlas* wird die Ausgangslinie zwischen den *anterioren* und *posterioren* Rändern des *Foramen vertebrale* gelegt. (Diese Abbildung wurde aus der Arbeit von Ishii und Mitarbeiter (2004b) übernommen.)

**Tabelle 4: Messwerte zum segmentalen Rotationswinkel der Halswirbelsäule nach Ishii und Mitarbeiter (2004b)**

Gemessen in Grad (°) in maximaler Rotationsstellung aus Neutralstellung zu einer Seite mittels dreidimensionaler Magnetresonanzaufnahmen an gesunden Probanden.

	OC-HW1	HW1-HW2	HW2-HW3	HW3-HW4	HW4-HW5	HW5-HW6	HW6-HW7
Rotation	1,7°	36,3°	2,2°	4,5°	4,6°	4°	1,6°

Anzahl = 15 Probanden; OC = *Occiput*, HW = Halswirbel

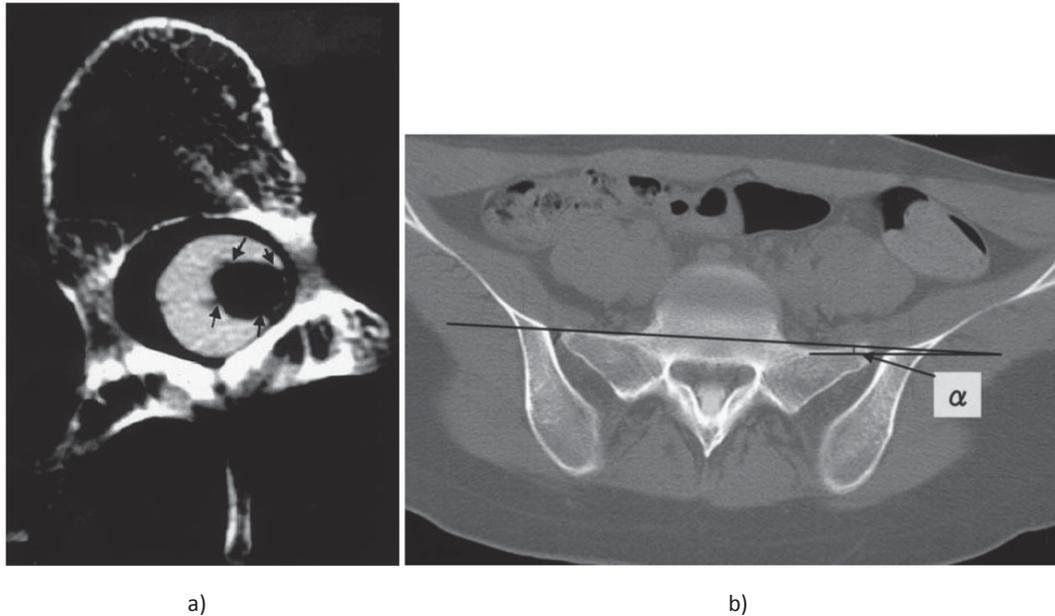
#### Methode zur Vermessung der Rückenmarkstorsion

In der Arbeit von Maruta und Mitarbeiter (2004) wird die Torsion des Rückenmarks bei Patienten mit *idiopathischer Scoliose* vermessen. Dazu werden die Aufnahmen von computertomographischen Myelographien von 78 Patienten, mit einer *thorakalen idiopathischen Scoliose* nach rechts verwendet.

Zur Bestimmung der Rückenmarkstorsion werden vier Punkte an dem Ursprung jeder Nervenwurzel auf der Oberfläche des Rückenmarks bestimmt (siehe Abb. 7a). Eine Linie verbindet die beiden vorderen Punkte und gilt als *ventrale* Linie. Eine weitere Linie verbindet die beiden hinteren Punkte und wird als *dorsale* Linie betrachtet. Die Mittelpunkte dieser beiden Linien werden verbunden und bilden die Querachse des Rückenmarks.

Die Achse des Wirbelkörpers wird durch eine Linie mittig durch den Wirbelkörper und den *Processus dorsalis* gekennzeichnet.

Die beiden Achsen werden miteinander verglichen, um die Lage des Rückenmarks im Spinalkanal zu bestimmen. Zusätzlich erfolgt eine Positionsanpassung des *lateralen* Bildrandes, durch Bestimmung der Lage des ersten *sakralen* Wirbels. Hierzu wird der Rotationswinkel des ersten *sakralen* Wirbelkörpers mittels einer Linie durch die *Processi transversii* zum *lateralen* Bildrand bestimmt (siehe Abb. 7).



**Abb. 7: a), b) Methode zur Bestimmung der Rückenmarkstorsion mittels computertomographischer Myelographien nach Maruta und Mitarbeiter (2004)**

a) Schnittbild zur Darstellung der Vermessung des Torsionswinkels des Rückenmarks. Die Pfeile zeigen die vier Ursprünge der Nervenwurzeln auf der Oberfläche des Rückenmarks an.

b) Hilfslinie zur Bestimmung der Lage des *Os sacrum* zum Bildrand (Winkel  $\alpha$ ).

### **1.2.3 Ergebnisse der Literaturrecherche für Veränderungen des Rückenmarks und seiner umgebenden Strukturen in verschiedenen Positionen**

Im Folgenden werden die Ergebnisse jener Arbeiten aus der Literaturrecherche vorgestellt, welche sich mit der funktionellen topographischen Anatomie des Rückenmarks im Bereich der HWS von gesunden Probanden beschäftigen.

Es folgt eine Beschreibung der Methoden und Messergebnisse zur Veränderung des Rückenmarks/der HWS entlang der x-Achse (z.B. Längenänderung) aus der einschlägigen Literatur. Es liegen zum Zeitpunkt der Literaturrecherche keine Veröffentlichungen vor, die sich mit den Einflüssen der Rotation der HWS (Veränderungen entlang der y-Achse) auf das Rückenmark an gesunden Probanden auseinandersetzen.

#### **1.2.3.1 Längenänderung des Rückenmarks im Bereich der HWS**

In der Arbeit von Kuwazawa und Mitarbeiter (2006b) wird an 20 gesunden Probanden mit Hilfe von MRT-Aufnahmen die Länge des Rückenmarks im Bereich HW2 bis HW7 in Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung der HWS gemessen.

In der Mittsagittalebene wird die Länge anhand einer *anterioren* und *posterioren* Linie entlang des Rückenmarks sowie einer Linie in der Mitte des Rückenmarks bestimmt. Die Position der HWS wird mit dem Winkel zwischen der unteren Endplatte des HW2 und der unteren Endplatte des HW7-Wirbelkörpers errechnet. Im anschließenden Vergleich dieser beiden Werte zeigen Kuwazawa und Mitarbeiter (2006b) einen signifikanten Unterschied in der Länge des Rückenmarks in Anteflexions- und Retroflexionsstellung der HWS. In Anteflexionsstellung nimmt die Länge des Rückenmarks zu, während sie in Retroflexionsstellung abnimmt (Kuwazawa und Mitarbeiter (2006b)). Die Werte sind in der Tabelle 5 dargestellt. Diese Methode kann nur näherungsweise zur Bestimmung der Rückenmarkslänge herangezogen werden, da ein genauer Punkt auf dem Rückenmark nicht markiert werden kann.

**Tabelle 5: Länge des Rückenmarks gemessen von Kuwazawa und Mitarbeiter (2006b)**

Länge des Rückenmarks in Anteflexions-, Retroflexions-, und Neutralstellung der HWS. Längenangaben in Millimeter, Winkel in Grad (°), gemessen zwischen dem 2. und 7. Halswirbel in funktionellen Magnetresonanztomographieaufnahmen an der *anterioren*, mittleren und *posterioren* Linie parallel zum Rückenmark in der Mittsagittalaufnahme.

Stellung	Winkel	ant. Linie	mit. Linie	post. Linie
Anteflexion	- 14,1°	120,1	119	118,2
Neutral	5,8°	115	112,9	111,1
Retroflexion	25°	110,8	107,3	103,8

Anzahl = 20 Probanden; ant. = *anteriore*, mit. = *mittlere*, post.= *posteriore*

### **1.2.3.2 Flächenbestimmung des Rückenmarks und des Duralschlauchs im Bereich der HWS**

In einer anderen Arbeit von Kuwazawa und Mitarbeiter (2006a) werden an 20 gesunden Probanden anhand von MRT-Aufnahmen die Änderungen des Rückenmarkdurchmessers im Bereich HW1 bis HW7 in Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung der HWS bestimmt.

Mit Hilfe von Transversalschnitten wird die Querschnittsfläche des Rückenmarks und Duralschlauch auf Höhe der *cervicalen* Bandscheibe errechnet. Die entsprechende Position der HWS wird durch eine Vermessung des Winkels zwischen der unteren Endplatte des HW2- und HW7-Wirbelkörpers ermittelt. Durch den Vergleich der Werte konstatieren Kuwazawa und Mitarbeiter (2006a) einen signifikanten Unterschied in der Querschnittsfläche des Rückenmarks und

Duralschlauchs in Anteflexion- und Retroflexionsstellung der HWS. In Retroflexionsstellung nimmt die Querschnittsfläche zu, während sie in Anteflexionsstellung abnimmt. Die Werte sind in Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: Querschnittsfläche des Rückenmarks gemessen von Kuwazawa und Mitarbeiter (2006a)**  
 Querschnittsfläche des Rückenmarks in Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung der HWS. Flächenangaben in Quadratmillimeter, Winkel in Grad (°), gemessen auf Höhe der Bandscheibe der Wirbelsäulensegmente HW2/HW3 bis HW6/7 in funktionellen transversalen Magnetresonanztomographieaufnahmen.

Stellung	Winkel	HW2/3	HW3/4	HW4/5	HW5/6	HW6/7
Anteflexion	- 14,1°	82,5	87,2	91,3	87,7	80,1
Neutral	5,8°	86,4	90,7	94,7	90,9	92,9
Retroflexion	25°	91	94,9	98,2	93,8	84,8

Anzahl = 20 Probanden; HW = Halswirbel

**Tabelle 7: Querschnittsfläche des Duralschlauchs gemessen von Kuwazawa und Mitarbeiter (2006a)**

Querschnittsfläche des Duralschlauchs in Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung der HWS. Flächenangaben in Quadratmillimeter, Winkel angegeben in Grad (°), gemessen auf Höhe der Bandscheibe der Wirbelsäulensegmente HW2/HW3 bis HW6/7 in funktionellen transversalen Magnetresonanztomographieaufnahmen.

Stellung	Winkel	HW2/3	HW3/4	HW4/5	HW5/6	HW6/7
Anteflexion	- 14,1°	202,2	177,1	174,1	178,9	175,6
Neutral	5,8°	216,5	185,8	181,9	185,3	183,5
Retroflexion	25°	242,6	196,4	191,8	191,3	189,8

Anzahl = 20 Probanden; HW= Halswirbel

### 1.2.3.3 Änderungen des Subarachnoidalraums im Bereich der HWS

In einer Arbeit von Chiavassa und Mitarbeiter (2000) wird anhand der MRT-Aufnahmen von 11 gesunden Probanden der *ventrale* und *dorsale Subarachnoidalraum* sowie der *anterior-posteriore* Durchmesser des Rückenmarks in Anteflexions-, Neutral- und Retroflexionsstellung der HWS vermessen. Die jeweils präzise Winkelstellung der HWS wird nicht bestimmt. Die Werte sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

**Tabelle 8: Vermessung des *Subarachnoidalraums* (SAR) und des Rückenmarks (RM) nach Chiavassa und Mitarbeiter (2000)**

Breite des *ventralen* und *dorsalen* SAR sowie *anterior-posterioren* Durchmessers des Rückenmarks in Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung der Halswirbelsäule. Angaben in Millimeter, gemessen im Bereich des 2. bis 7. Halswirbels in funktionellen Magnetresonanztomographie-Mittsagittalaufnahmen.

Stellung		HW2	HW3	HW4	HW5	HW6	HW7
Anteflexion	ventral SAR	4,27	4,18	3,36	2,82	3,09	3
	RM Durchmesser	7,18	6,7	6,7	7	6,27	6,27
	dorsal SAR	4,18	2,09	2,64	3,27	3,46	0
Neutral	ventral SAR	4,27	3,91	3,55	3,36	3,82	4,46
	RM Durchmesser	6,18	6,46	6,64	6,73	6,64	5,91
	dorsal SAR	4,4	2,46	2,64	3	2,55	2,82
Retroflexion	ventral SAR	2,64	3,09	3,27	3,09	3,64	4
	RM Durchmesser	6,64	6,64	6,82	6,91	6,82	6,18
	dorsal SAR	4,55	2,73	2,64	3	2,55	3,09

Anzahl = 11 Probanden; HW = Halswirbel, SAR = *Subarachnoidalraum*, RM = Rückenmark

#### **1.2.3.4 Venenplexus im *Atlanto-axial*-Gelenk**

In einer Arbeit von Reesink und Mitarbeiter (2001) werden der *Epiduralraum*, der *Subarachnoidalraum* und das Rückenmark im *Atlanto-axial*-Gelenk in Rotation untersucht.

Mit Hilfe von MRT-Kontrastmittel-Aufnahmen und Fett-Unterdrückung kann der *Venenplexus* im *Epiduralraum* von *Occiput* (OC)-HW1 und HW1-HW2 in Rotation dargestellt werden. Es zeigt sich, dass im Verhältnis zu anderen Segmenten in diesem Bereich wenig Fettgewebe vorhanden ist.

Der *Epiduralraum* wird von einem ausgeprägten *Venenplexus* ausgefüllt. Dieser kann sich an Verengungen des *Epiduralraums* infolge einer Rotationsbewegung anpassen. Eine seitengleiche Verteilung des *Plexus* von 50 % : 50 % (*ipsilateral* : *contralateral*) in Neutralstellung verschiebt sich in Rotation über den *lateralen Atlanto-axial*-Gelenken zu 20 % : 80 % (*ipsilateral* : *contralateral*) und unter den *lateralen Atlanto-axial*-Gelenken zu 80 % : 20 % (*ipsilateral* : *contralateral*).

### 1.3 Ziele der Arbeit

Aus der Literaturrecherche ergibt sich, dass die Einflüsse einer Anteflexions- und Retroflexionsbewegung der HWS auf das Rückenmark schon von einigen Arbeitsgruppen untersucht wurden (vgl. 1.2.3).

Fragen zum Einfluss einer Rotationsbewegung der HWS auf das Rückenmark bleiben in der einschlägigen Literatur bis zum jetzigen Zeitpunkt jedoch weitestgehend unbeantwortet. In der vorliegenden Dissertation sollen deswegen anhand von funktionellen MRT-Aufnahmen von gesunden Probanden speziell die Auswirkungen einer Rotationsbewegung der HWS auf das Rückenmark untersucht sowie die bisherigen Ergebnisse aus der Literatur zur Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen überprüft werden.

Folgende Fragen sollen im Rahmen einer empirischen Studie erstmalig beantwortet werden:

- Wie verhält sich das Rückenmark im Vergleich zur Wirbelsäule bei Rotation im Bereich der HWS?
- Kommt es zu Veränderungen des Rückenmarkdurchmessers oder der Querschnittsfläche bei einer Rotation im Bereich der HWS?
- Welche Vermessungsmethoden für die Rotations-, Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen der HWS, der okzipitalen und thorakalen Übergänge und des Rückenmarks sind hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für Standarduntersuchungen zu bevorzugen?

Folgende bereits beschriebene Aspekte zur Veränderung der Lage und des Durchmessers des Rückenmarks sollen im Rahmen dieser Arbeit überprüft werden:

- Veränderungen der Lage des Rückenmarks im Spinalkanal bei einer Anteflexions-Retroflexionsbewegung im Bereich der HWS
- Veränderungen des Rückenmarksdurchmessers bei einer Anteflexions-Retroflexionsbewegung im Bereich der HWS

Das Ziel ist, eine allgemeine Übersicht der Einflüsse durch Rotation, Anteflexion und Retroflexion der HWS auf das Rückenmark bei gesunden Probanden zu erstellen. Die Seitneigung der HWS sowie Bewegungskombinationen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

## **2 Material und Methoden**

Im Folgenden wird ein Überblick über die methodische Herangehensweise der vorliegenden Arbeit zu oben genannten Fragestellungen gegeben. Die unter 2.1, 2.2 und 2.3 geschilderten Schritte wurden von Dr. med. J. Assheuer, Facharzt für Nuklearmedizin, durchgeführt.

### **2.1 Magnetresonanztomograph und Einstellungen**

Die Vermessung der Probanden erfolgte durch Dr. med. J. Assheuer, Facharzt für Nuklearmedizin, mittels Magnetresonanztomographie (MRT) unter Verwendung des 1.5 Tesla MRT-Systems (*Symphony Vision*, Siemens, Erlangen). Die Aufnahmen wurden im Zeitraum vom 17.11.2004 bis 13.04.2005 durchgeführt.

Das MRT-Protokoll beinhaltete ein Gradienten-Echo BW1-gewichtet als *opposed Phase* (TE: 11 ms, TR: 390 ms, Matrix 256 x 256, *Field of view* 300 mm<sup>2</sup>) mit einer Schichtdicke von 3 mm sowie eine STIR-Sequenz zur Fettsupprimierung (TE: 60 ms, TR: 6200 ms, TI: 150 ms, Matrix 256 x 256, *Field of view* 300 mm<sup>2</sup>) mit einer Schichtdicke von 3 mm. In den Aufnahmen wurden die persönlichen Daten anonymisiert.

### **2.2 Probanden**

Die Probanden wurden von Dr. med. J. Assheuer, Facharzt für Nuklearmedizin, in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. P. Brüggemann von der Deutschen Sporthochschule Köln im Jahre 2004 rekrutiert. Die Probanden waren männlich und zwischen 22 und 37 Jahren alt. Das Durchschnittsalter lag bei 24,6 Jahren.

### **2.3 Lagerung im Magnetresonanztomographen**

Es wurden MRT-Aufnahmen zur Untersuchung des Verhaltens des Rückenmarks in maximalen Funktionsstellungen gegenüber der Neutralstellung der HWS von Dr. med. J. Assheuer, Facharzt für Nuklearmedizin, angefertigt. Die Funktionsstellungen umfassten die Anteflexion, Retroflexion, Rechts- und Linksrotation des Kopfes. Die gewonnenen Aufnahmen wurden anonymisiert.

Die Mittelstellung bzw. die Neutralstellung entspricht der Lage des Kopfes und der HWS in Ruheposition nach der Neutral-Null-Methode. Die Neutral-Null-Stellung

entspricht einem Menschen mit parallelem Fußstand und hängenden Armen mit nach vorne gerichteten Daumen (Schiebler, 2004a).

Die Anteflexionsstellung ist die aktiv vom Probanden eingenommene Position, in der der Kopf aus der Neutralstellung maximal nach ventral in der Sagittalebene anteflektiert wird.

Die Retroflexionsstellung ist die aktiv vom Probanden eingenommene Haltung, in der der Kopf aus der Neutralstellung maximal nach dorsal in der Sagittalebene retroflektiert wird.

Die Rechts- bzw. Linksrotationsstellung ist die aktiv vom Probanden eingenommene Position, in der der Kopf aus der Neutralstellung maximal nach rechts bzw. links in der Transversalebene rotiert wird.

Unterstützend wurden Lagerungskissen und Keile verwendet, um den jeweiligen Probanden in der von ihm aktiv eingenommenen maximalen Funktionsstellung zu unterstützen. Es wurden bewusst keine Halteapparaturen verwendet, da diese das Ergebnis verfälschen könnten, weil sie den Probanden in einer vom Halteapparat vorgegebenen Stellung fixieren.

Die gewonnen anonymisierten MRT-Aufnahmen wurden mir, Ludwig Klasen, im Jahre 2010 von Dr. med. J. Assheuer, Facharzt für Nuklearmedizin, zur Vermessung für diese Arbeit übergeben.

## **2.4 Verwendete Vermessungsprogramme**

Die Bilddaten wurden mit dem Vermessungsprogramm *RadiAnt DICOM Viewer* vermessen (*RadiAnt DICOM Viewer Version 1.8.6. Medixant, Polen, Jahr 2011*).

## **2.5 Statistik**

Zur Prüfung der Signifikanz der Ergebnisse werden die Daten in das *IBM SPSS Statistics 22 Programm* übertragen. Die Verteilung der Daten wird mittels *Kolmogorov-Smirnov-Tests* ermittelt. Im Anschluss wird die Signifikanz der normalverteilten Datensätze mit dem *Student t-Test* für zwei verbundene Stichproben und die der nicht-normalverteilten Datensätze mit dem *Wilcoxon-Test* geprüft.

## **2.6 Auswahl und Entwicklung der Vermessungsmethoden**

Für die Vermessung der Rotations-, Ante- und Retroflexionsbewegungen der HWS und ihrer *Okzipital-/Thorakalübergänge* sowie des Rückenmarks ist eine Methode zu finden, die für den täglichen Einsatz in der Klinik geeignet ist.

Im Hinblick auf die vorliegenden Fragestellungen kann auf bereits beschriebene Methoden nur bedingt zurückgegriffen werden, da diese u.a. nicht die gesamte HWS abdecken (vgl. Abschnitt 1.2.2). Daher müssen neue Vermessungsmethoden entwickelt beziehungsweise an die Anforderungen der vorliegenden Arbeit angepasst werden.

Darüberhinaus liegen in der Literatur zum jetzigen Zeitpunkt keine methodischen Angaben zur Vermessung einer Verlagerung des Rückenmarks bei Rotation vor, so dass speziell für diesen Aspekt eine neue Methode entwickelt werden muss.

Die Auswahl und Weiterentwicklung entsprechend zuträglicher Methoden werden im Folgenden beschrieben.

### **2.6.1 Anforderungen an die Vermessungsmethoden**

Nach meinen Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche, hat eine Methode zur Vermessung von HWS und Rückenmark folgende Anforderungen zu erfüllen:

- (1) Die Vermessungsverfahren müssen für jeden Abschnitt der HWS und ihrer Übergänge anwendbar sein.
- (2) Die Methode sollte im klinischen Alltag einfach und schnell anwendbar sein.
- (3) Die Methode sollte für MRT-Aufnahmen geeignet sein.
- (4) Das Ergebnis sollte reproduzierbar sein.
- (5) Die Messung sollte eine hohe Reliabilität aufweisen.

### **2.6.2 Definition der Methoden zur Vermessung von Rückenmark und HWS in der Sagittalebene**

Die Vermessung des Rückenmarks und der HWS in der Mittsagittalebene setzt sich aus folgenden Einzelmessungen zusammen:

- Vermessung der segmentalen Beweglichkeit der HWS bei Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen

- Vermessung von Rückenmarksdurchmesser und *Subarachnoidalraum* der HWS

Zur Vermessung der segmentalen Beweglichkeit der HWS (Punkt 1) werden die einzelnen Bewegungssegmente in der Mittsagittalebene betrachtet:

- *Atlanto-okzipital-Gelenk*
- *Atlanto-axial-Gelenk*
- HW2-HW3 bis HW7-BW1
- Sowie die Gesamtbeweglichkeit der HWS OC-BW1

#### **2.6.2.1 Vermessung der segmentalen Beweglichkeit der HWS bei Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen**

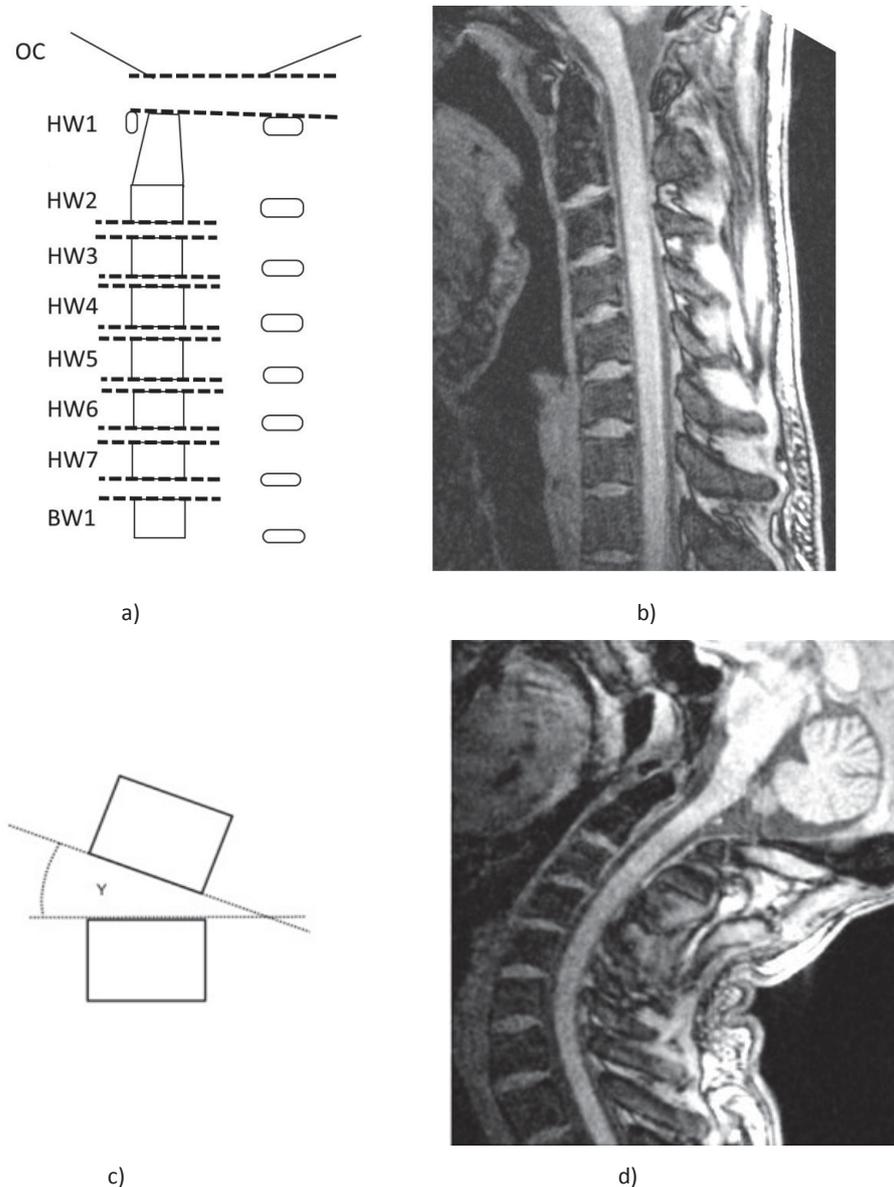
In der Literatur ist bislang keine Vermessungsmethode für die segmentale Beweglichkeit der HWS bei Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen beschrieben, die den unter 2.6.1 aufgeführten Anforderungen gerecht wird (vgl. Abschnitt 1.2.2.1).

In dieser Arbeit kommt ein Messverfahren zum Einsatz, das die gesamte HWS und ihre Übergänge einschließt und sich am Rückenmark orientiert. Dafür wird der Keilwinkel zwischen Deck- und Grundplatte der Wirbel, wie ihn Xu-hui und Mitarbeiter (2009) beschreiben (siehe Abb. 11), als Basis für die Messung verwendet.

Aufbauend auf diesem Grundgerüst wird die Methode der Winkelmessung bei einer Anteflexions-Retroflexionsbewegung unter Berücksichtigung des folgenden Gedankens weiterentwickelt:

Betrachtet man die HWS in Steilstellung (vgl. Abb. 8a) und Abb. 8b)), liegen alle Wirbelkörper wie Bausteine fast senkrecht aufeinander gestapelt. Die gestrichelten Linien verlaufen parallel oder bilden nur einen verschwindend geringen Winkel. Bewegt sich nun der Kopf in der Sagittalebene in Retroflexionsstellung (Abb. 8d), kommt es zu einem Aufklappen der Wirbel und es entsteht ein Winkel zwischen den beiden an die reinen Wirbelstrukturen angelegten Linien. Dieser wird als Grundeinheit der Messmethode verwendet.

Im Gegensatz zu früheren Arbeiten wird im Weiteren keine Linie durch den harten Gaumen und den hinteren Rand des *Foramen magnum* (*Opisthion*, vgl. Abb. 1, Abschnitt 1.1) gelegt (vgl. Frobin und Mitarbeiter, 2002), sondern durch das *Foramen magnum*, da dieses in direktem Bezug zum Rückenmark steht und der harte Gaumen nicht zwingend mit abgebildet wird.



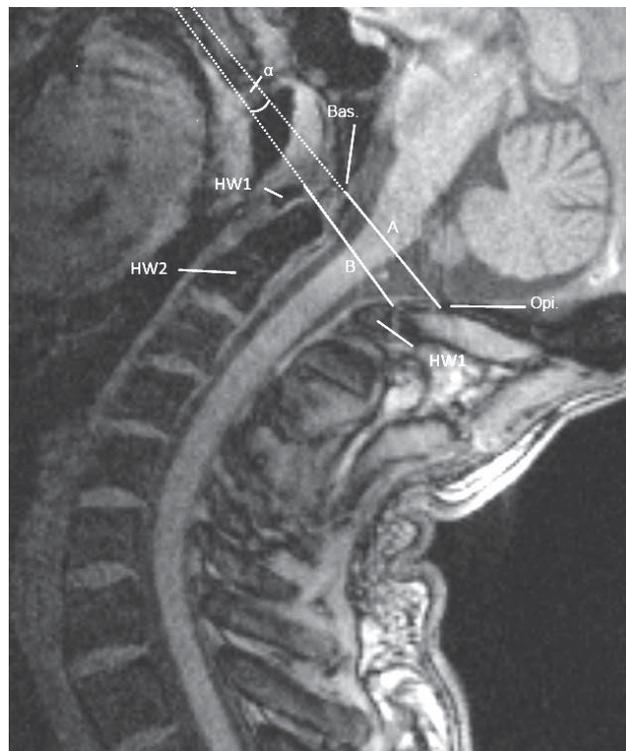
**Abb. 8: a), b), c), d) Darstellung der Grundidee einer Winkelbestimmung von Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen in der Mittsagittalebene**

a), c) schematische Darstellungen; b), d) Magnetresonanztomographie-Aufnahmen. a) und b) zeigen die Wirbelsäule in Steilstellung, bei der alle Wirbelkörper senkrecht aufeinander gestapelt liegen. Der Winkel zwischen den gestrichelten Linien, angelegt an die Wirbelkörper, ist schwindend gering. Bei einer Bewegung des Kopfes in der *Anterior-posterior*-Ebene in Retroflexionsstellung (d), kommt es zu einem Aufklappen der Wirbel, wodurch sich ein Winkel zwischen den beiden Wirbelkörpern auftut (c). Dieser einfache Keilwinkel (Y) ist der Kern der Methode zur Winkelbestimmung von Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen. OC = *Occiput*, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel. (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

Die Winkel werden in Grad gemessen. Winkel, die sich nach *anterior* öffnen, werden als positiv (+), Winkel, die sich nach *posterior* öffnen als negativ (-) beschrieben (Hsu und Mitarbeiter, 2008). Auf die einzelnen Bewegungsabschnitte wird nachfolgend eingegangen.

#### Vermessung des *Atlanto-okzipital*-Gelenks

Die Vermessung des *Atlanto-okzipital*-Gelenks erfolgt, wie in Abb. 9 dargestellt, anhand des Winkels ( $\alpha$ ) zwischen der *McRae*-Linie (A) vom vorderen (*Basion*) zum hinteren Rand des *Foramen magnum* (*Opisthion*, vgl. Abb. 1, Abschnitt 1.1) und der Linie B, die an die Oberseite des *Arcus anterior* und *posterior* des *Atlas* gelegt wird. Die beiden Linien werden aus den Arbeiten von Takeshima und Mitarbeiter (2002) und Karhu und Mitarbeiter (1999) übernommen. Das *Foramen magnum* bildet den Eingang des Spinalkanals. Das macht es im Gegensatz zur Linie gebildet durch das *palatum durum* und *Opisthion* (vgl. Takeshima und Mitarbeiter (2002) und Karhu und Mitarbeiter (1999)) zu einem am Rückenmark orientiertem Referenzpunkt bei der Anteflexions- und Retroflexionsbewegung.



**Abb. 9: Winkelmessung im *Atlanto-okzipital*-Gelenk in Mittsagittalebene**

Winkel ( $\alpha$ ) zwischen der Linie A (*McRae*-Linie) vom vorderen (*Basion*) zum hinteren Rand des *Foramen magnum* (*Opisthion*) und der Linie B an der Oberseite des *Arcus anterior* und *posterior* des *Atlas* (HW1), 2. Halswirbel (HW2), Bas. = *Basion*, Opi. = *Opisthion*. (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

### Vermessung des Atlanto-axial-Gelenks

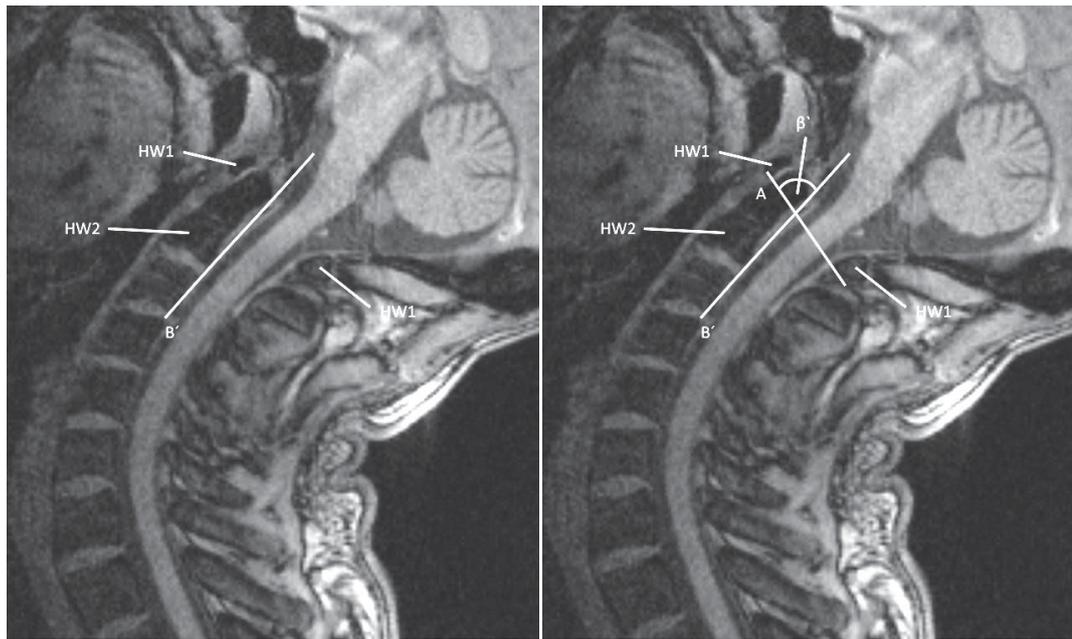
Die Vermessung des *Atlanto-axial*-Gelenks erfolgt zunächst mit einer Hilfslinie (B'), die an die Rückseite des *Dens axis* gelegt wird (vgl. Abb. 10 a). Wie in Abb. 10 b) dargestellt, lässt sich ein Winkel  $\beta'$  zwischen der Linie B' und einer Linie A, die zwischen der Unterseite des *Atlas* am *Arcus anterior* und *Arcus posterior* verläuft, ermitteln. Die beiden Linien A und B' werden aus der Arbeit von Karhu und Mitarbeiter (1999) übernommen. Um schließlich den gewünschten segmentalen Winkel ( $\beta$ ) zwischen HW1-HW2 zu erhalten (vgl. Abb. 10 c), setzt man den gemessenen Winkel  $\beta'$  in die folgende Gleichung ein:

$$-(\beta') + 90 = \beta$$

Auf diese Weise bestimmt man den Winkel  $\beta$ , der, wie in Abb. 10 dargestellt, durch die Linie A und eine Linie B gebildet wird, die orthogonal zur Ausgangslinie B' steht.

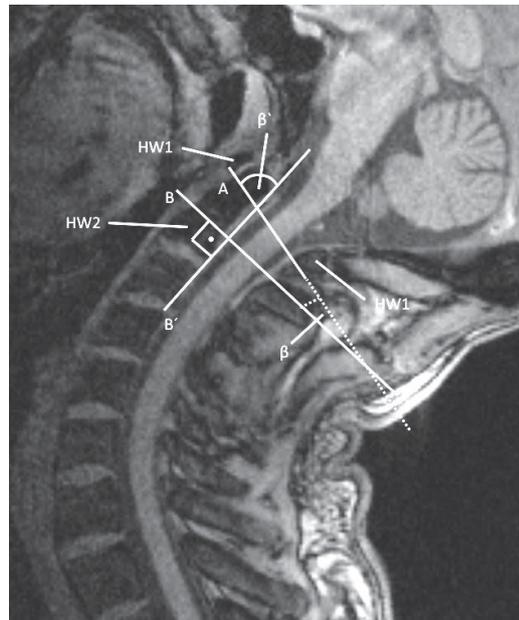
### Vermessung der Bewegungssegmente HW2-HW3 bis HW7-BW1

Die Vermessung der Bewegungssegmente HW2-HW3 bis HW7-BW1 erfolgt, wie in Abb. 11 dargestellt, durch Berechnung des Winkels  $\gamma$ , der von einer Linie parallel zur oberen Wirbelkörperplatte des unteren Wirbelkörpers (B) und einer Linie parallel zur unteren Wirbelkörperplatte des oberen Wirbelkörpers (A) gebildet wird. Dieses Messverfahren entspricht dem von Xu-hui und Mitarbeiter (2009) beschriebenen Vorgehen.



a)

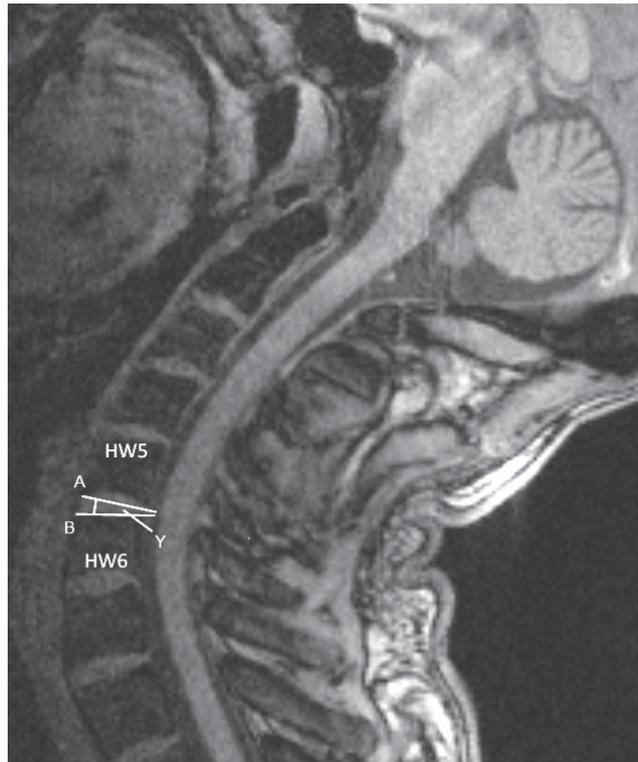
b)



c)

**Abb. 10: Winkelmessung im Atlanto-axial-Gelenk in Mittsagittalebene**

Um den Winkel ( $\beta$ ) zu erhalten, wird wie folgt vorgegangen: a) zeigt die Linie B', die an der *posterioren* Seite des *Dens axis* (HW2) anliegt. b) zeigt die Linie A an der Unterseite des *Atlas* (HW1) und den von Linie A und Linie B' eingeschlossenen Winkel  $\beta'$ . c) zeigt den Winkel  $\beta$ , der sich graphisch aus der Linie A und der Linie B ergibt, welche orthogonal zur Linie B' steht. Berechnen lässt sich dieser Winkel, indem der zuvor gemessene Winkel  $\beta'$  in die Formel  $-(\beta') + 90 = \beta$  eingesetzt wird. (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)



**Abb. 11: Winkelmessung zwischen dem 5. Halswirbel (HW5) und dem 6. Halswirbel (HW6) in Mittsagittalebene**

Um den Keilwinkel des Wirbelsegments HW5-HW6 zu bestimmen, werden eine parallel zur unteren Wirbelkörperplatte des oberen Wirbelkörpers (HW5) verlaufene Linie A und eine parallel zur oberen Wirbelkörperplatte des unteren Wirbelkörpers (HW6) verlaufene Linie B gelegt. Dieses Vorgehen entspricht dem von Xu-hui und Mitarbeiter (2009). (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

#### Vermessung der Gesamtbeweglichkeit der HWS OC-BW1

Die Vermessung des gesamten Bewegungsumfangs der HWS erfolgt nach der Methode von Takeshima und Mitarbeiter (2002) zwischen der *McRae*-Linie vom *Basion* zum *Opisthion* und einer Linie, die an die Oberseite des ersten *thorakalen* Wirbelkörpers angelegt wird.

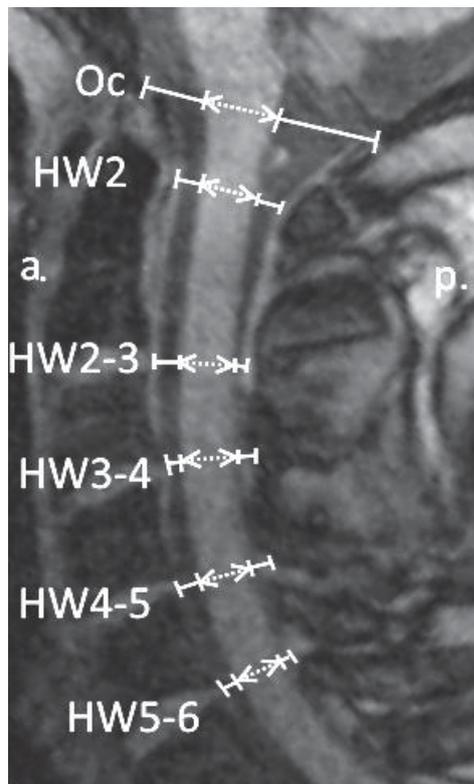
#### **2.6.2.2 Vermessung von Rückenmarksdurchmesser und *Subarachnoidalraum* der HWS**

Für die Vermessung des Durchmessers von Rückenmark und *Subarachnoidalraum* im Bereich der HWS hat die Literaturrecherche eine Methode geliefert, die allen oben aufgeführten Anforderungen (vgl. 2.6) gerecht wird.

Diese Methode, beschrieben in der Publikation von Chiavassa und Mitarbeiter (2000), wird deswegen für die Durchführung der oben genannten Messung im Rahmen dieser Arbeit verwendet (Abschnitt 1.2.3.3).

Wie in der Abb. 12 dargestellt, werden in der Mittsagittalebene der *Subarachnoidalraum anterior*, der Rückenmarksdurchmesser und der *Subarachnoidalraum posterior* auf 6 Ebenen in maximaler Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung gemessen:

- Am *Occiput (Oc)*, auf Höhe des *Foramen magnum*
- Auf Höhe der Stelle, wo der *Dens axis* am weitesten in den Wirbelkanal reicht (HW2)
- Auf Höhe der Bandscheiben HW2-HW3 bis BW1-BW2 (insgesamt sechs Stellen)



**Abb. 12: Vermessung des Rückenmarksdurchmessers (gepunktete Linie) und des *anterioren* und *posterioren Subarachnoidalraums* (durchgehende Linie) in Mittsagittalebene**

Der linke Bildrand ist *anterior* (a.) und der rechte Bildrand ist *posterior* (p.). Gemessen wird der Durchmesser des *anterioren Subarachnoidalraums*, des Rückenmarks und des *posterioren Subarachnoidalraums* in den Bereichen: *Occiput (Oc)*, in Höhe des *Foramen magnum*s), Halswirbel (HW) 2 an der Stelle, an der der *Dens axis* am weitesten in den Wirbelkanal reicht und auf Höhe der Bandscheibe zwischen dem HW2-3 bis HW5-6 in Mittsagittalebene. Die Abbildung wurde auf Grundlage der Methode von Chiavassa und Mitarbeiter (2000) erstellt. (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

### **2.6.3 Definition der Methoden zur Vermessung von Rückenmark und HWS in der Transversalebene**

Die Vermessung des Rückenmarks und der HWS in der Transversalebene setzt sich aus folgenden Einzelmessungen zusammen:

- Rotationswinkel der Bewegungssegmente (Kopf, *Atlas*, HW2-BW1)
- Durchmesser und Querschnittsfläche des Rückenmarks in Rotationsstellung im Bereich der HWS
- Verlagerung des Rückenmarks im Spinalkanal in Rotationsstellung im Bereich der HWS
- Torsion des Rückenmarks in Rotationsstellung im Verhältnis zum Wirbel im Bereich der HWS

#### **2.6.3.1 Bestimmung des Rotationswinkels der Bewegungssegmente der HWS**

Aus der Literaturrecherche geht keine Vermessungsmethode zur Bestimmung des Rotationswinkels der Bewegungssegmente der HWS hervor, die alle oben aufgeführten Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.6.1) erfüllt. Aus diesem Grund muss für diese Arbeit eine neue Methode entwickelt werden.

Zur Vermessung der HWS in Rotation mittels transversaler MRT-Aufnahmen wird in den meisten Veröffentlichungen der Winkel zwischen einer Linie durch den Wirbelkörper und dem *lateralen* Bildrand bestimmt (Karhu und Mitarbeiter (1999), Takasaki und Mitarbeiter (2011), Dvorak und Mitarbeiter (1987)). Was dabei nicht beachtet wird, ist, ob die Lageposition des Probanden dem Bildrand angepasst wurde.

In dieser Doktorarbeit soll das methodische Vorgehen in oben genannten Publikationen deswegen um eine Kalibrierung des Bildrandes nach Vorlage der Arbeit von Maruta und Mitarbeiter (2004) ergänzt werden.

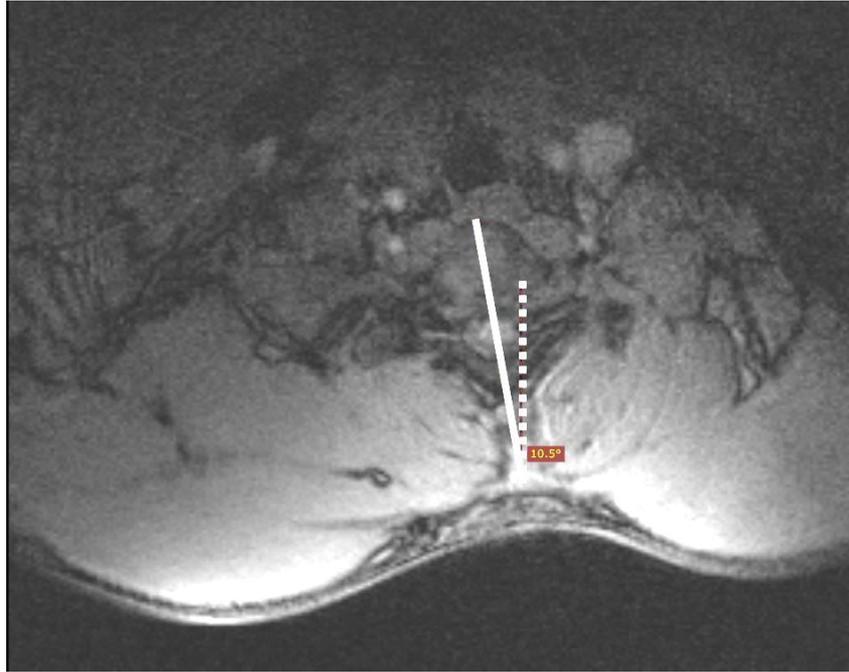
Die Planung dieser Arbeit setzt voraus, dass bei transversalen Rotationsaufnahmen des ersten *thorakalen* Wirbels ein Winkel zwischen Wirbel und Bildrand zu messen ist. Dieser Abweichungswinkel (dargestellt in Abb. 13) muss bei der Auswertung der Messergebnisse berücksichtigt werden, andernfalls würden diese verfälscht. Bei ähnlichen vorangegangenen Arbeiten (vgl. Karhu und Mitarbeiter (1999), Takasaki und Mitarbeiter (2011) und Dvorak und Mitarbeiter (1987)) wird eine mögliche Fehllagerung des Probanden bei der Erhebung der Messwerte nicht berücksichtigt.

Da bei Rotationswinkelmessungen mittels Transversalschnitten der Bezug zum Bildrand erforderlich ist, muss dieser auch mit der Lagerung des Probanden in Verbindung gebracht werden.

In der Arbeit von Maruta und Mitarbeiter (2004) wird der erste *sakrale* Wirbel zur Bestimmung des Abweichungswinkels verwendet. Diese Methode wird in der vorliegenden Arbeit auf den ersten *thorakalen* Wirbel übertragen.

Der erste *thorakale* Wirbel ist durch den Rippenbogen nicht in der Lage zu rotieren und eignet sich damit für eine Kalibrierung des Bildrandes. Zur Anpassung des Bildrandes wird, wie in Abb. 13 beschrieben, der Winkel zwischen dem ersten *thorakalen* Wirbel und dem Bildrand in der Transversalaufnahme bestimmt.

Beträgt dieser  $0^\circ$ , ist der Proband optimal im MRT gelagert und Messungen von Rotationswinkeln zum Bildrand liefern unverfälschte, reproduzierbare und vergleichbare Werte. Wird ein positiver Winkel zwischen erstem *thorakalen* Wirbel und Bildrand gemessen, muss dieser Wert anschließend von den ermittelten Rotationswinkeln abgezogen werden. Bei einem negativen Winkel muss der entsprechende Wert zu den Messwerten hinzu addiert werden.



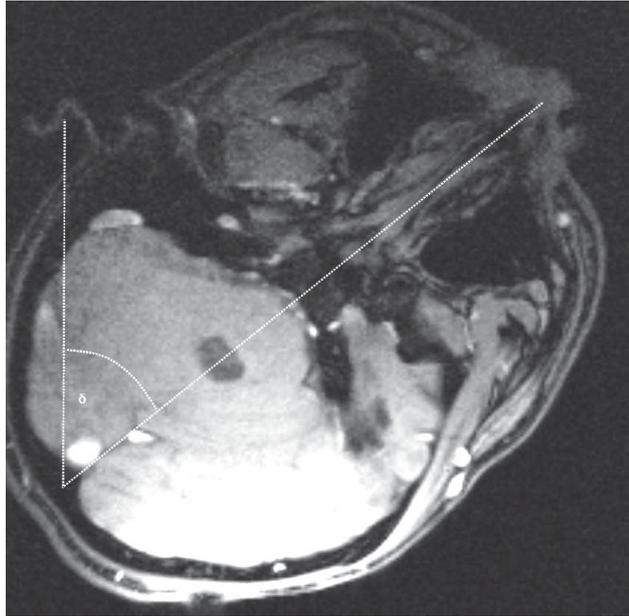
**Abb. 13: Kalibrierung der Lageposition des Probanden**

Zur Lagebestimmung des Probanden im MRT wird die Position des ersten *thorakalen* Wirbels wie folgt bestimmt: In einer Transversalaufnahme wird der Winkel zwischen dem ersten *thorakalen* Wirbel (durchgehende Linie) und dem *lateralen* Bildrand (gepunktete Linie) bestimmt. Dieser Winkel dient der Lagebeurteilung des Probanden. Beträgt der Winkel  $0^\circ$ , ist der Proband optimal gelagert. Der Bildrand ist kalibriert und kann somit zur Rotationswinkelbestimmung als Referenz verwendet werden. Diese Methode orientiert sich an der Arbeit von Maruta und Mitarbeiter (2004). (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

Zur Beurteilung des Rotationsverhaltens der HWS wird der Rotationswinkel des Kopfes und jedes Wirbels vermessen. Die Vorgehensweise ist bei allen Winkeln gleich. Eine Linie durch markante anatomische Strukturen wird definiert, um sie in Rotation zum kalibrierten *lateralen* Bildrand in Bezug zu setzen und den jeweiligen Rotationswinkel zu messen. Die Linien von Kopf und *Atlas* müssen aufgrund ihrer anatomischen Unterschiede gesondert definiert werden. Die Halswirbel HW2 bis BW1 können einheitlich vermessen werden.

Vermessungsmethode des Kopfes in Rotationsstellung

Wie in Abb. 14 dargestellt, wird der Rotationswinkel des Kopfes mittels einer Linie durch das Nasenseptum und das *Promotorium* zum *lateralen* Bildrand in Rechts- und Linksrotation bestimmt (Takasaki und Mitarbeiter 2011).

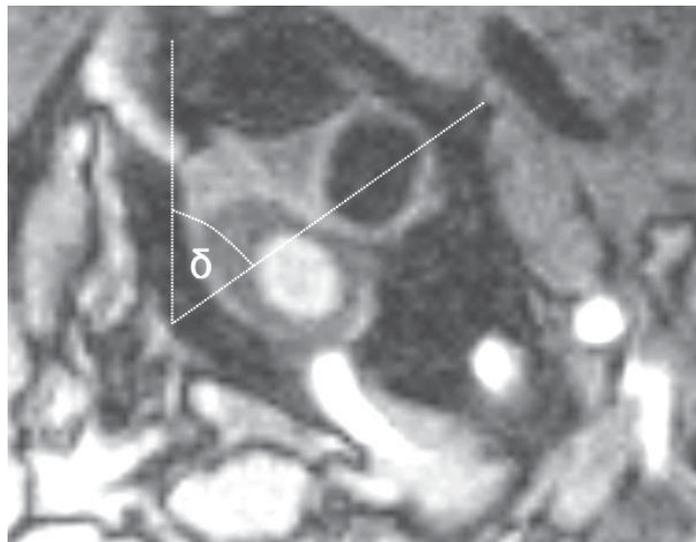


**Abb. 14: Rotationswinkel ( $\delta$ ) des Kopfes**

Die Messung erfolgt anhand der Methode von Takasaki und Mitarbeiter (2011) mittels einer Linie zwischen Nasenseptum und *Promotorium* zum *lateralen* Bildrand in Links-Rotation. (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

#### Vermessungsmethode des *Atlas* in Rotationsstellung

Wie in Abb. 15 dargestellt, wird die Winkelmessung des *Atlas* mit Hilfe einer Linie durch das *Tuberkulum anterior* und *Tuberkulum posterior* zum *lateralen* Bildrand in Rechts- und Linksrotation durchgeführt (Takasaki und Mitarbeiter 2011).

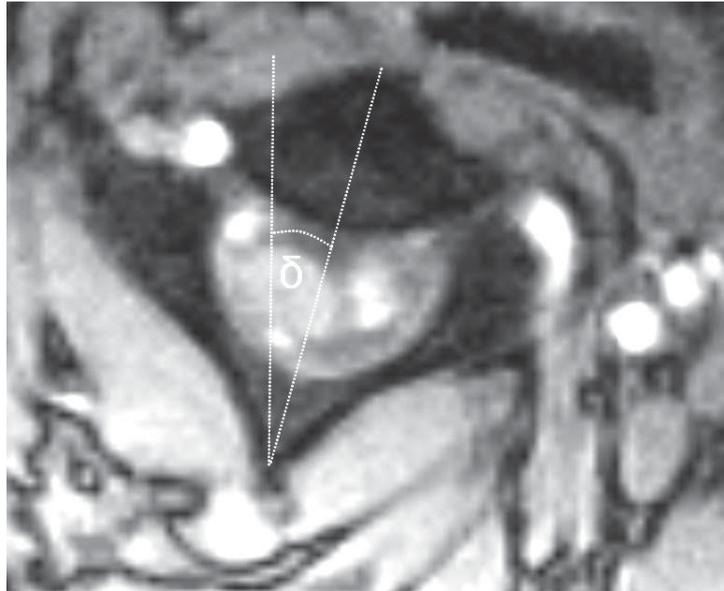


**Abb. 15: Rotationswinkel ( $\delta$ ) des *Atlas* in Links-Rotation**

Die Messung erfolgt nach der Methode von Takasaki und Mitarbeiter (2011) mittels einer Linie durch das *Tuberkulum anterior* und *Tuberkulum posterior* zum *lateralen* Bildrand. (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

### Vermessungsmethode der HW2-BW1 in Rotationsstellung

Wie in der Abb. 16 dargestellt, wird der Winkel mit einer Linie durch den *Processus spinosus* und mittig durch den Wirbelkörper gemessen (Takasaki und Mitarbeiter 2011). Da der *Processus spinosus* nach *dorsocaudal* zeigt, ist der *caudal* gelegene Transversalschnitt eines Wirbels am besten zur Winkelbestimmung geeignet. Als Referenz dient der kalibrierte laterale Bildrand bei Rechts- und Linksrotation.



**Abb. 16: Rotationswinkel ( $\delta$ ) des 2. Halswirbels in Links-Rotation**

Die Messung erfolgt nach der Methode von Takasaki und Mitarbeiter (2011) mittels einer Linie durch den *Processus spinosus* und mittig durch den Wirbelkörper zum *lateralen* Bildrand. (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

### **2.6.3.2 Vermessung von Durchmesser und Querschnittsfläche des Rückenmarks in Rotationsbewegung**

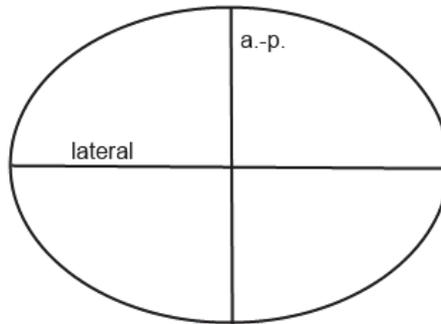
#### Durchmesser des Rückenmarks in Rotationsstellung im Bereich der HWS

In der transversalen Schnittebene werden auf Höhe des *Foramen magnum*, des *Apix dens axis* und der Bandscheiben HW2-HW3 bis BW1-BW2 jeweils der maximale *laterale* Durchmesser und der maximale *anterior-posteriore* Durchmesser des Rückenmarks in Neutralstellung sowie in Rechts- und Linksrotation gemessen.

#### Querschnittsfläche des Rückenmarks im Bereich der HWS

Um die nach obiger Beschreibung ermittelten Messwerte für den Durchmesser des Rückenmarks anschaulich miteinander vergleichen zu können, werden die in den unterschiedlichen Ebenen und Positionen erhobenen Werte durch die Berechnung der Querschnittsfläche des Rückenmarks zu einem Wert zusammengefasst. Dazu wird mittels der Formel zur Flächenberechnung einer Ellipse aus dem *anterior-*

*posterioren* und dem *lateralen* Durchmesser näherungsweise die Fläche des Rückenmarks bestimmt (siehe Abb. 17; Papula, 2014). Die Querschnittsfläche des Rückenmarks wird in der vorliegenden Arbeit für alle oben genannten Bereiche der HWS in Neutralstellung sowie in Rechts- und Linksrotation berechnet.



$$Fläche = \pi \cdot \frac{a.-p.}{2} \cdot \frac{lateral}{2}$$

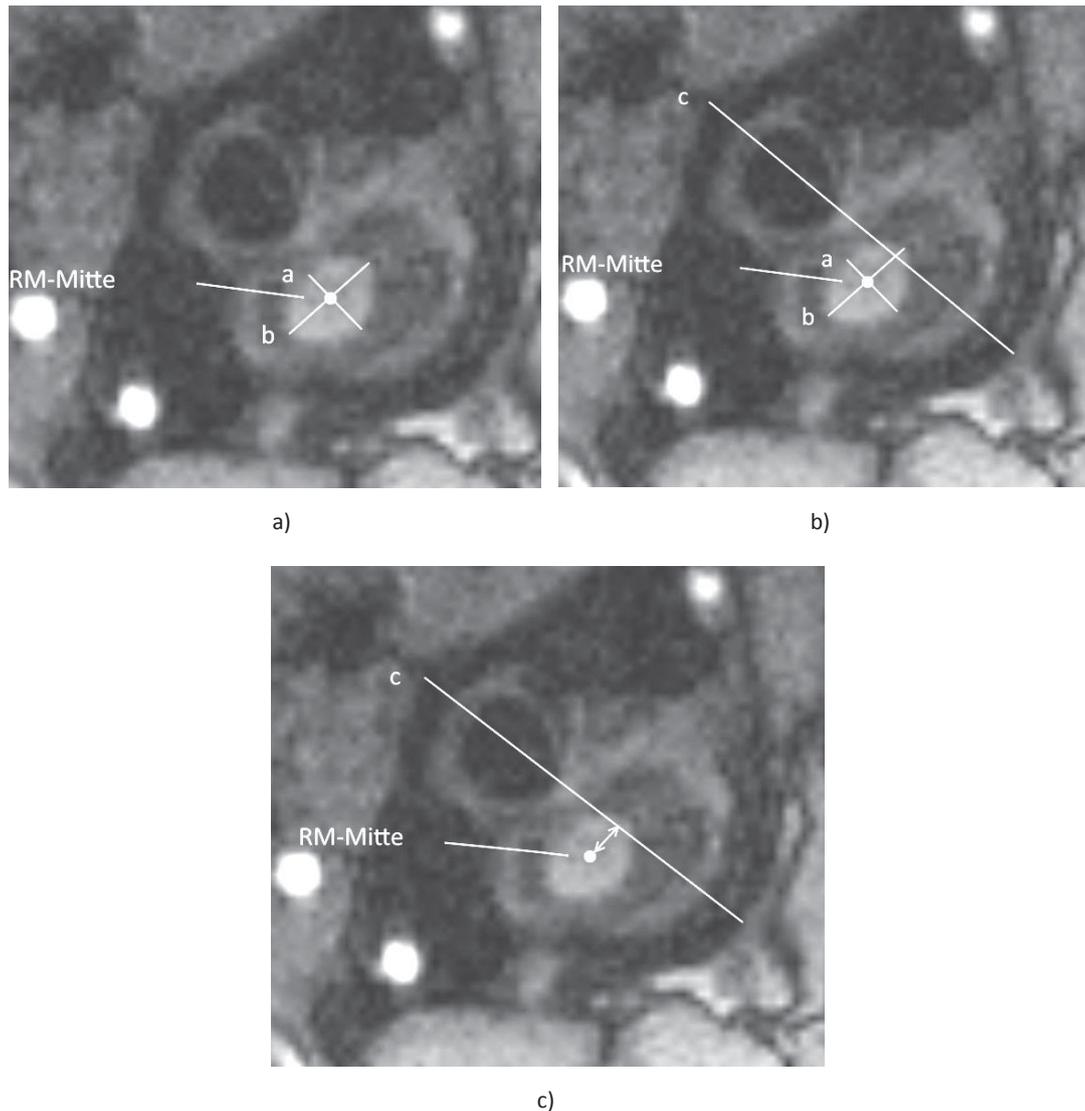
**Abb. 17: Berechnung der Rückenmarksquerschnittsfläche**

Um die Querschnittsfläche des Rückenmarks zu berechnen, werden der *anterior-posteriore* Durchmesser (*a.-p.*) und der *laterale* Durchmesser (*lateral*) des Rückenmarks in jeder der oben beschriebenen Ebenen und Positionen gemessen und anschließend in die Formel zur Berechnung der Ellipsenfläche eingesetzt (Papula, 2014).

**2.6.3.3 Vermessung der Verlagerung des Rückenmarks im Spinalkanal im Bereich der HWS**

Da aus der Literaturrecherche keine Vermessungsmethode für die Verlagerung des Rückenmarks in Rotationsbewegung hervorgegangen ist, die die unter 2.6.1 genannten Anforderungen erfüllt, wird im Rahmen dieser Arbeit eine neue Messmethode entwickelt. Diese Methode soll die Verlagerung des Rückenmarks auf der Höhe der einzelnen Wirbel der HWS erfassen. Dazu wird der Mittelpunkt des Rückenmarks in Neutralstellung mit der Lage des Mittelpunktes des Rückenmarks in Rotationsstellung verglichen.

Wie Abb. 18 zeigt, wird der Abstand zwischen der Mitte des Rückenmarks und einer Linie mittig durch den Wirbel gemessen. Die Mitte des Rückenmarks ermittelt sich aus dem Schnittpunkt seines *anterior-posterioren* Durchmessers und seines *lateralen* Durchmessers. Auf Höhe des *Foramen magnum* wird eine Linie vom *Basion* zum *Opisthion* als Bezug zur Mitte des Rückenmarks gewählt. Eine Verschiebung zur rechten Seite wird durch ein negatives Vorzeichen und zur linken Seite durch ein positives Vorzeichen gekennzeichnet.



**Abb. 18: Vermessung der Rückenmarksverlagerung auf Höhe des Atlas in Rechtsrotation**

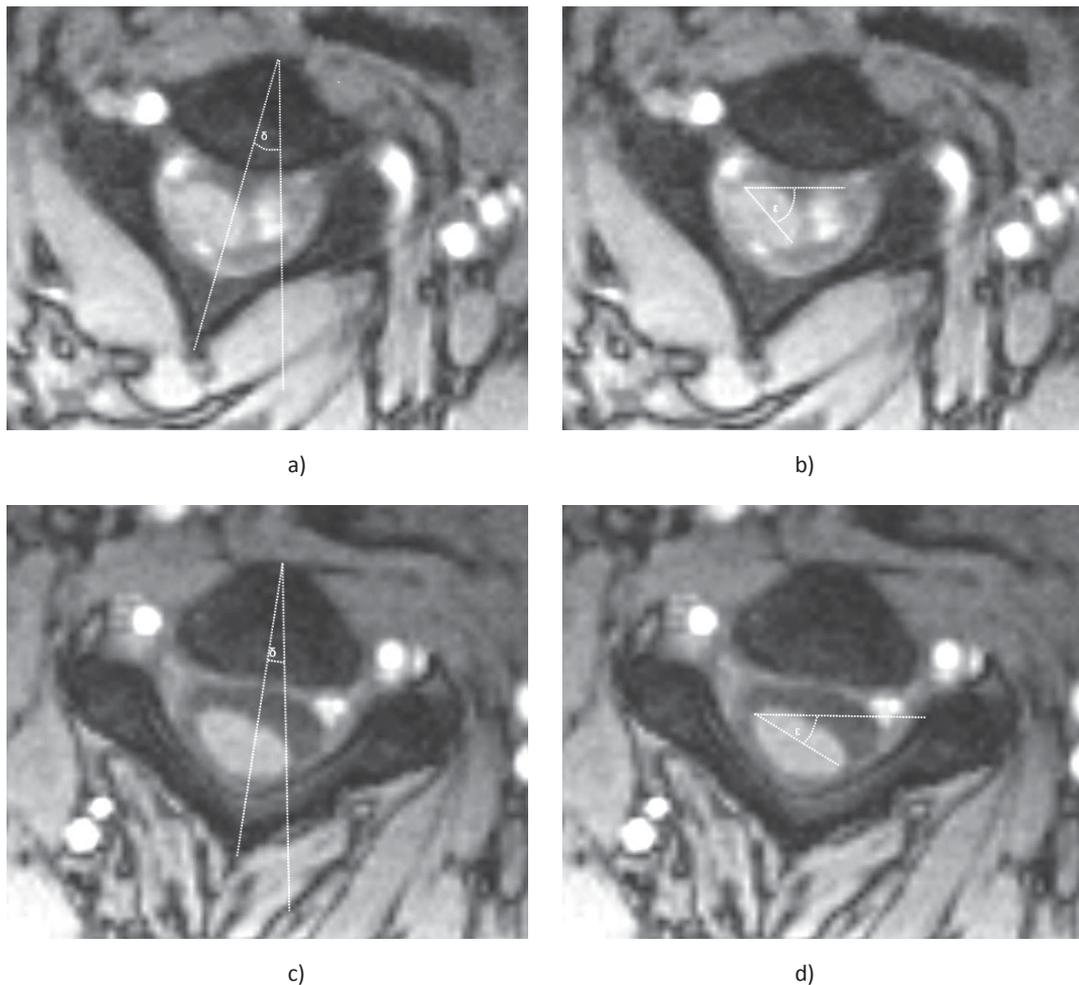
a) Der Schnittpunkt des *anterior-posterioren* (a) und *lateralen* (b) Rückenmarksdurchmessers legt die Mitte des Rückenmarks (RM) fest. b) Die durchgezogene Linie c wird durch das *Tuberkulum anterior* und das *Tuberkulum posterior* gebildet und dient als Referenz für die Abstandsermittlung. c) Der Abstand zwischen RM-Mitte und Referenzlinie (c) wird gemessen (weiße Pfeile). (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

#### 2.6.3.4 Vermessung der Torsion des Rückenmarks in Rotationsstellung im Verhältnis zum Wirbel im Bereich der HWS

Zur Bestimmung der Torsion des Rückenmarks in Rotationsstellung wird die Methode von Maruta und Mitarbeiter (2004) als Grundlage verwendet (Seite 17).

Die von Maruta und Mitarbeiter als Landmarken verwendeten Nervenwurzeln auf der Oberfläche des Rückenmarks sind bei den hier auszuwertenden MRT-Bildern jedoch nicht erkennbar. Folglich muss die Messmethode zur Vermessung der Torsion des Rückenmarks in Rotationsstellung im Verhältnis zum Wirbel an die Gegebenheiten der vorliegenden Arbeit angepasst werden.

Um die Einflüsse der Rotation auf das Rückenmark zu bestimmen, wird die Stellung des Rückenmarks zunächst mit Hilfe eines Winkels gemessen. Der Winkel wird mittels einer Linie, die an der breitesten Stelle des Rückenmarks von *lateral* nach *lateral* gezogen wird, und dem oberen Bildrand konstruiert (siehe Abb. 19). Der Winkel der beiden Linien wird auf denselben Schnittebenen gemessen, wie der Winkel der einzelnen Wirbel. Die gemessenen Winkel werden, wie in Abschnitt 2.6.3.1 beschrieben, an die Lage des ersten Brustwirbels angepasst.



**Abb. 19: Vermessung der Torsion des Rückenmarks in Rotationsstellung im Verhältnis zum Wirbel im Bereich der Halswirbelsäule**

a) und b) zeigen den 2. Halswirbel; c) und d) zeigen den 3. Halswirbel. In a) und c) wird der Winkel ( $\delta$ ) des Wirbels mittels einer Linie durch das *Tuberkulum anterior* und das *Tuberkulum posterior* zum *lateralen* Bildrand bestimmt. In b) und d) wird der Winkel ( $\epsilon$ ) des Rückenmarks durch einer Linie, die an der breitesten Stelle des Rückenmarks von *lateral* nach *lateral* gezogen wird, zum oberen Bildrand gemessen. (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Bewegungsumfang der Halswirbelsäule

##### 3.1.1 Bewegungsumfang der Anteflexions-Retroflexionsbewegung der gesamten HWS

Die Tabelle 9 zeigt die maximale Beweglichkeit der HWS der untersuchten Probandengruppe in Anteflexion und Retroflexion sowie zu Referenz in dazwischenliegender Neutralstellung (Seite 22). Der gesamte Bewegungsumfang beträgt im Durchschnitt 73,2°. Die Methode wird auf Seite 30 detailliert beschrieben.

**Tabelle 9: Gesamtbeweglichkeit der Halswirbelsäule**

Der Winkel wird in Grad (°) im Mittsagittalschnitt zwischen der Ebene des *Foramen magnum* und der Oberseite des 1. Brustwirbels bestimmt. Winkel, die sich nach *anterior* öffnen sind positiv (+), Winkel, die sich nach *posterior* öffnen sind negativ (-); nach Hsu und Mitarbeiter, 2008.

A	- 8,8° ± 6,2*
N	39,1° ± 9,7
R	64,4° ± 7,1*

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; N = Neutralstellung, A = Anteflexionsstellung, R = Retroflexionsstellung

\* = signifikanter Unterschied zu den Mittelwerten der Neutralstellung ( $p < 0,05$ )

##### 3.1.2 Bewegungsumfang der Anteflexions-Retroflexionsbewegung der einzelnen HWS-Segmente

In Tabelle 10 wird die Messung der einzelnen Bewegungssegmente der HWS in Anteflexions-, Reflexions- und Neutralstellung dargestellt. Das Segment HW5-HW6 weist in Anteflexions- und Retroflexionsbewegung mit 13,98° die größte und das Segment HW7-BW1 mit 5,67° die geringste Beweglichkeit auf. Die Methode wird auf den Seiten 26 - 30 detailliert beschrieben.

**Tabelle 10: Segmentale Beweglichkeit der Halswirbelsäule**

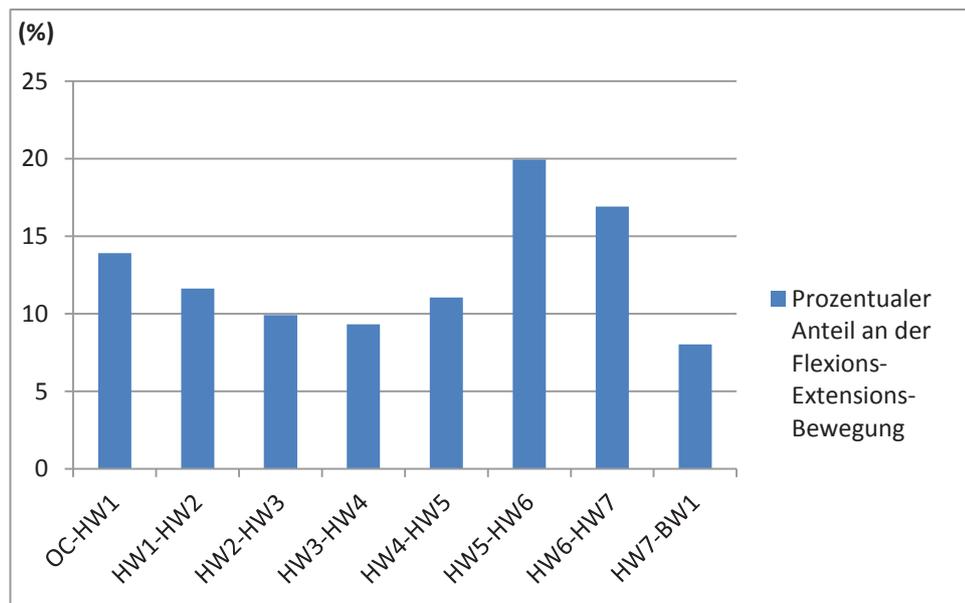
Segmentale Winkel in Grad (°) zwischen den benachbarten Wirbelkörperdeckplatten des jeweiligen Bewegungssegments. Winkel, die sich nach *anterior* öffnen sind positiv (+), Winkel, die sich nach *posterior* öffnen sind negativ (-); nach Hsu und Mitarbeiter (2008).

	OC-HW1	HW1-HW2	HW2-HW3	HW3-HW4	HW4-HW5	HW5-HW6	HW6-HW7	HW7-BW1
A	-10,6° ± 3,0*	5,7° ± 2,8	- 1,4° ± 4,4	- 0,1° ± 2,1	0,2° ± 1,5	- 3,1° ± 3,6	0,2° ± 2,2	1,0° ± 1,9
N	- 4,8° ± 2,9	7,7° ± 3,1	4,6° ± 3,1	3,0° ± 2,6	3,5° ± 2,4	6,2° ± 3,0	5,0° ± 2,6	5,2° ± 3,8
R	- 4,9° ± 2,9	10,0° ± 5,5	5,4° ± 2,8	7,4° ± 3,6	7,1° ± 2,5	11,1° ± 3,6	10,4° ± 2,8	5,1° ± 2,2

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; N = Neutralstellung, A = Anteflexionsstellung, R = Retroflexionsstellung, OC = *Occiput*, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

\* = signifikanter Unterschied zu den Mittelwerten der neutraler Stellung ( $p < 0,05$ )

In Abb. 20 wird die prozentuale Verteilung der einzelnen Bewegungssegmente an der Anteflexions- und Retroflexionsbewegung der HWS dargestellt. Die Werte ergeben sich aus dem Winkel zwischen maximaler Anteflexions- bzw. Retroflexionsstellung des jeweiligen Bewegungssegments im Vergleich zur gesamten Beweglichkeit der HWS. Mit 20 % übernimmt das HW5-HW6-Segment den größten Teil der Anteflexions-Retroflexionsbewegung.



**Abb. 20: Prozentuale Verteilung der Anteile der Bewegungssegmente an der gesamten Anteflexions-Retroflexions-Bewegung der Halswirbelsäule**

Angaben in Prozent (y-Achse) bezogen auf den jeweiligen Winkelanteil der einzelnen Segmente (x-Achse); Anzahl = 9 Probanden; OC = *Occiput*, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

### 3.1.3 Bewegungsumfang der Rotation

In Tabelle 11 werden die vermessenen Rotationswinkel des *Occiputs* und der einzelnen Halswirbel zu beiden Seiten aufgelistet. Bei der aktiven Rotation zeigt sich ein maximaler Bewegungsumfang von 95,7°; 45,2° zur linken Seite und 50,5° zur rechten Seite (Seite 22). Die Methode wird auf den Seiten 35 - 36 detailliert beschrieben.

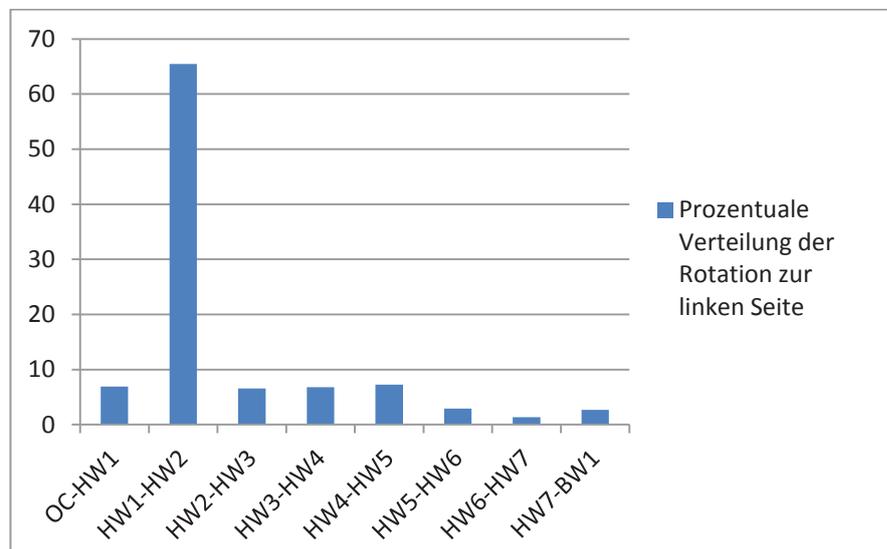
**Tabelle 11: Rotationswinkel des Occiputs und der Halswirbel**

Rotationswinkel in Grad (°) gemessen zur linken und rechten Seite mittels einer Linie durch das *Tuberkulum anterior* und *Tuberkulum posterior* zum *lateralen* Bildrand nach Takasaki und Mitarbeiter (2011).

Pos.	OC-HW1	HW1-HW2	HW2-HW3	HW3-HW4	HW4-HW5	HW5-HW6	HW6-HW7	HW7-BW1
L	3,1 ± 1,8	29,6 ± 6,4	3,0 ± 1,6	3,1 ± 4,2	3,3 ± 2,3	1,3 ± 2,2	0,6 ± 1,6	1,2 ± 1,5
R	1,5 ± 2,4	31,3 ± 5,1	3,1 ± 3,0	3,1 ± 3,5	5,5 ± 4,6	2,1 ± 2,8	2,5 ± 2,1	1,9 ± 2,1

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; Pos. = Position, L = links Rotation, R = rechts Rotation, OC = *Occiput*, HW = Halswirbel

In der Abb. 21 wird die prozentuale Verteilung der segmentalen Anteile der einzelnen Bewegungssegmente an der Rotationsbewegung zur linken Seite dargestellt. In der Rotation der HWS fallen bis zu 65 % der Bewegung auf das *Atlanto-axial*-Gelenk.



**Abb. 21: Prozentuale Verteilung der Anteile der Bewegungssegmente an der Rotation der Halswirbelsäule zur linken Seite**

Angaben in Prozent (y-Achse) bezogen auf den jeweiligen Winkelanteil der einzelnen Segmente (x-Achse); Anzahl = 9 Probanden; OC = *Occiput*, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

### 3.2 Verlagerung des Rückenmarks im Spinalkanal

#### 3.2.1 Verlagerung des Rückenmarks im *Subarachnoidalraum* bei Anteflexions-Retroflexionsbewegung der HWS

Die in Mittsagittalebene aufgenommenen MRT-Bilder zeigen, dass es von der Retroflexionsstellung zur Anteflexionsstellung der HWS zu einer kontinuierlichen Verlagerung des Rückenmarks an die Halswirbelkörperrückseite kommt.

Das Rückenmark folgt damit der Bewegung der HWS nach *anterior*. Dabei verringert sich die Breite des *Subarachnoidalraums anterior* signifikant, wie Tabelle 12 zeigt. Die Verringerung beträgt, auf Höhe der Bandscheibe HW7-BW1 51,1 % von 3,7 mm auf 1,8 mm. Die Methode wird auf Seite 38 detailliert beschrieben.

**Tabelle 12: Durchmesser des *Subarachnoidalraums anterior* in Mittsagittalebene in Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung der HWS**

Angaben in Millimetern gemessen auf Höhe des *Foramen magnum*, auf der Höhe, an der der *Dens axis* am weitesten in den Spinalkanal reicht und auf Höhe der *cervicalen* Bandscheiben.

	Foramen magnum	Dens axis	HW2-HW3	HW3-HW4	HW4-HW5	HW5-HW6	HW6-HW7	HW7-BW1
A	5,1 ± 1,0*	2,4 ± 1,1	3,3 ± 1,6	2,3 ± 1,6	1,8 ± 1,0*	1,5 ± 1,0*	1,9 ± 0,8*	1,8 ± 1,3*
N	6,1 ± 1,4	3,5 ± 1,1	3,7 ± 1,0	2,9 ± 1,2	2,8 ± 1,1	3,3 ± 1,0	3,5 ± 1,2	3,7 ± 1,6
R	6,7 ± 1,3	3,0 ± 0,9	3,2 ± 1,5	2,3 ± 1,2*	2,5 ± 1,3	2,2 ± 1,0*	2,9 ± 0,6	3,7 ± 0,9

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; N = Neutralstellung, A = Anteflexionsstellung, R = Retroflexionsstellung, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

\* = signifikanter Unterschied zu den Mittelwerten der neutraler Stellung ( $p < 0,05$ )

Bei einer Retroflexionsstellung kommt es hingegen zu einer Verlagerung des Rückenmarks nach *posterior*, wie Tabelle 13 zeigt. Die stärksten Annäherungen an den hinteren Wirbelbogen gibt es im HW5-HW6-Segment. Hier beträgt der Durchmesser des *Subarachnoidalraums* nur noch 0,89 mm und verringert sich damit um 40 % im Vergleich zur Neutralstellung. Die Methode wird auf Seite 31 detailliert beschrieben.

**Tabelle 13: Durchmesser des *Subarachnoidalraums posterior* in Mittsagittalebene in Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung**

Angaben in Millimetern gemessen auf Höhe des *Foramen magnum*, auf der Höhe, an der der *Dens axis* am weitesten in den Spinalkanal reicht und auf Höhe der *cervicalen* Bandscheiben.

	Foramen magnum	Dens axis	HW2-HW3	HW3-HW4	HW4-HW5	HW5-HW6	HW6-HW7	HW7-BW1
A	16,2 ± 2,0	3,9 ± 1,5	1,4 ± 1,0	1,8 ± 1,4	2,4 ± 1,0	2,9 ± 1,2*	2,7 ± 1,1*	3,4 ± 1,4*
N	16,8 ± 2,4	3,7 ± 1,9	2,0 ± 1,2	1,7 ± 1,3	1,8 ± 1,6	1,5 ± 1,4	1,5 ± 1,2	2,1 ± 0,7
R	15,5 ± 2,7	3,5 ± 1,2	2,1 ± 0,8	2,1 ± 1,0	1,4 ± 1,0	0,9 ± 0,5	1,1 ± 0,5	1,7 ± 0,6

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; N = Neutralstellung, A = Anteflexionsstellung, R = Retroflexionsstellung, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

\* = signifikanter Unterschied zu den Mittelwerten der neutraler Stellung ( $p < 0,05$ )

### 3.2.2 Verlagerung des Rückenmarks bei Rotationsbewegung der HWS

Zur Beschreibung der Verlagerung des Rückenmarks bei einer Rotationsbewegung der HWS wird der Mittelpunkt des Rückenmarks in Neutralstellung mit der Lage des Mittelpunktes des Rückenmarks in Rotationsstellung verglichen. Dabei kommt es zu einer signifikanten Verlagerung des Rückenmarks auch in den unteren Segmenten.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 aufgeführt und in Abb. 22 und Abb. 23 graphisch veranschaulicht. Sie zeigen, dass es bei einer Rotationsbewegung der HWS speziell zu einer Verlagerung des Rückenmarks in den Segmenten HW5 und HW6 zur *ipsilateralen* Seite kommt. Die Methode wird auf Seite 38 detailliert beschrieben.

**Tabelle 14: Verlagerung des Mittelpunktes des Rückenmarks im Spinalkanal in Rechtsrotations- und Linksrotationsstellung gegenüber der Neutralstellung**

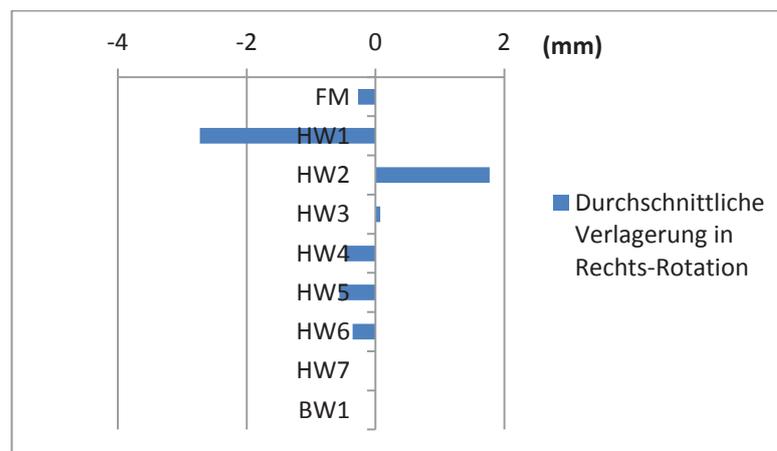
Angaben in Millimetern gemessen auf Höhe des *Foramen magnum*, der Halswirbel und dem 1. Brustwirbel. Werte mit negativem Vorzeichen (-) zeigen eine Verlagerung nach rechts an. Werte mit positivem Vorzeichen (+) zeigen eine Verlagerung nach links an.

	Foramen magnum	HW1	HW2	HW3	HW4	HW5	HW6	HW7	BW1
R	-0,3 ± 0,4*	-2,7 ± 1,3*	1,8 ± 1,1*	0,1 ± 0,7	-0,5 ± 0,7	-0,6 ± 0,4*	-0,4 ± 0,4*	0,0 ± 0,3	0,0 ± 0,2
L	0,2 ± 0,4	1,7 ± 0,9*	-2,9 ± 1,2*	-1,0 ± 0,8*	0,4 ± 0,6	0,5 ± 0,5*	0,1 ± 0,3	0,0 ± 0,2	0,0 ± 0,3

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; R = Rechtsrotationsstellung, L = Linksrotationsstellung, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

\* = signifikanter Unterschied zu den Mittelwerten der neutraler Stellung (p < 0,05)

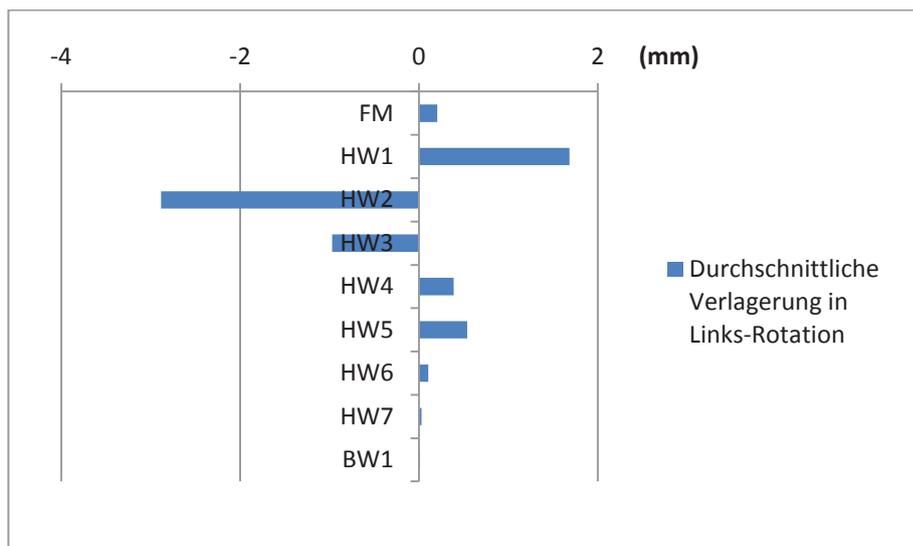
Die Abb. 22 zeigt die Verlagerung des Rückenmarks bei einer Rechtsrotationsbewegung der HWS gegenüber der Neutralstellung.



**Abb. 22: Verlagerung des Mittelpunktes des Rückenmarks im Spinalkanal bei Rechtsrotation gegenüber der Neutralstellung**

Durchschnittliche Verlagerung in Millimeter (mm, x-Achse), gemessen auf Höhe des *Foramen magnum* (FM), der Halswirbel (HW) und des ersten Brustwirbels (BW, y-Achse). Werte mit negativem Vorzeichen (-) zeigen eine Verlagerung nach rechts an. Werte mit positivem Vorzeichen (+) zeigen eine Verlagerung nach links an. Anzahl = 9 Probanden

Analog dazu zeigt Abb. 23 die Verlagerung des Rückenmarks bei einer Links-Rotationsbewegung der HWS gegenüber der Position in Neutralstellung.



**Abb. 23: Verlagerung des Mittelpunktes des Rückenmarks im Spinalkanal bei Linksrotation gegenüber der Neutralstellung**

Durchschnittliche Verlagerung in Millimeter (mm, x-Achse). Gemessen auf Höhe des *Foramen magnum* (FM), der Halswirbel (HW) und des ersten Brustwirbels (BW, y-Achse). Werte mit negativem Vorzeichen (-) zeigen eine Verlagerung nach rechts an. Werte mit positivem Vorzeichen (+) zeigen eine Verlagerung nach links an. Anzahl = 9 Probanden

In Links- und Rechts-Rotation sind signifikante Verlagerungen jeweils in den Segmenten HW5 und HW6 zur *ipsilateralen* Seite festzustellen.

### 3.3 Änderungen der Rückenmarksform durch Bewegungen

#### 3.3.1 Änderung des Rückenmarksdurchmessers bei Anteflexions-Retroflexionsbewegungen

Zur Beschreibung der Änderung des Rückenmarksdurchmessers werden die *anterior-posterioren* Durchmesser des RM auf Höhe des *Foramen magnum* des *Dens axis* und auf Höhe der *cervicalen* Bandscheiben in der Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung in der Mittsagittalebene gemessen und verglichen.

Dabei kommt es zu signifikanten Unterschieden zwischen den Rückenmarksdurchmessern in Ante- und Retroflexionsstellung auf der Höhe des *Dens axis* und der Bandscheibe der Segmente HW2-HW3, HW3-HW4 und HW7-BW1, wie Tabelle 15 zeigt.

Es zeigt sich eine Zunahme des Rückenmarksdurchmessers in der Retroflexionsstellung und eine Abnahme des Rückenmarksdurchmessers in der Anteflexionsstellung.

In Tabelle 15 sind die in der Mittsagittalebene erhobenen Rückenmarksdurchmesser in Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung zusammengefasst und in Abb. 24 veranschaulicht. Die Methode wird auf Seite 31 detailliert beschrieben.

**Tabelle 15: Rückenmarksdurchmesser in der Mittsagittalebene in Anteflexions-, Retroflexions- und Neutralstellung**

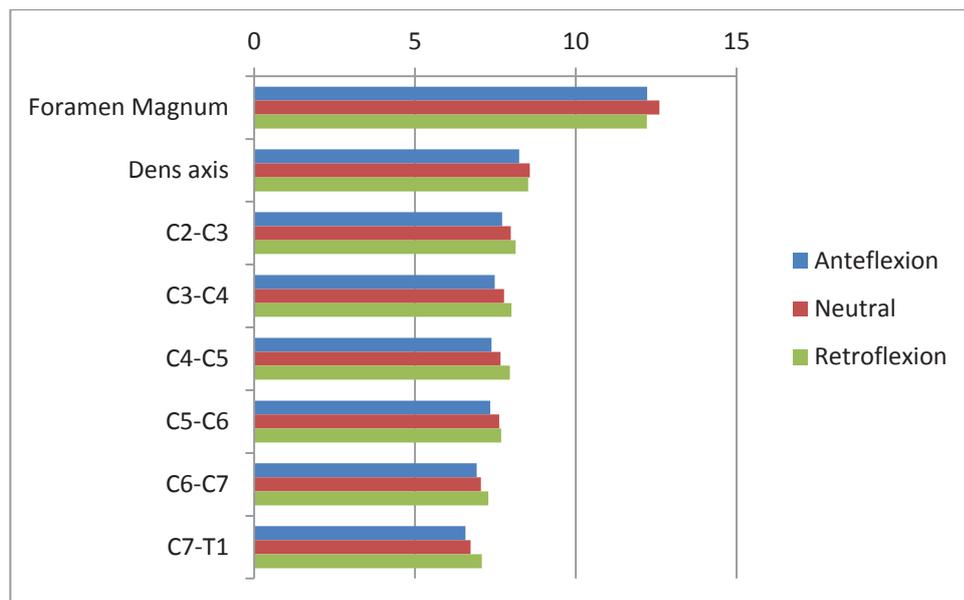
Durchmesser in Millimeter, gemessen auf der Höhe des *Foramen magnum*, auf der Höhe, an der der *Dens axis* am weitesten in den Spinalkanal reicht und auf Höhe der *cervicalen* Bandscheiben.

	Foramen magnum	Dens axis®	HW2-HW3®	HW3-HW4®	HW4-HW5	HW5-HW6	HW6-HW7	HW7-BW1®
A	12,2 ± 1,3	8,2 ± 0,3	7,7 ± 0,3*	7,5 ± 0,3	7,4 ± 0,4	7,3 ± 0,3	6,9 ± 0,3	6,6 ± 0,3
N	12,6 ± 0,5	8,6 ± 0,3	8,0 ± 0,3	7,8 ± 0,5	7,7 ± 0,4	7,6 ± 0,5	7,1 ± 0,4	6,7 ± 0,4
R	12,2 ± 1,0	8,5 ± 0,4	8,1 ± 0,3	8,0 ± 0,5	8,0 ± 0,5	7,7 ± 0,7	7,3 ± 0,6	7,1 ± 0,7

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel, A = Anteflexionsstellung, N = Neutralstellung, R = Retroflexionsstellung

® = signifikanter Unterschied der Rückenmarksdurchmesser zwischen Ante- und Retroflexionsstellung ( $p < 0,05$ )

\* = signifikanter Unterschied der Rückenmarksdurchmesser zu den Mittelwerten in Neutralstellung ( $p < 0,05$ )



**Abb. 24: Rückenmarksdurchmesser in der Mittsagittalebene in Anteflexions-, Neutral- und Retroflexionsstellung der HWS**

Rückenmarksdurchmesser in Millimeter (mm), dargestellt auf der x-Achse. Gemessen auf Höhe des *Foramen magnum*, auf der Höhe, an der der *Dens axis* am weitesten in den Spinalkanal reicht und auf Höhe der *cervicalen* Bandscheiben (y-Achse). Anzahl = 9 Probanden; HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

### 3.3.2 Änderung von Rückenmarksdurchmesser und -Fläche in Rotation

In Tabelle 16 sind die *lateralen* und *anterior-posterioren* Durchmesser des Rückenmarks in Neutralstellung und in Links- und Rechtsrotation, gemessen in der Transversalebene, aufgeführt. Die unterschiedlichen Ergebnisse aus Transversal- und Mittsagittalebene im Hinblick auf den *anterior-posterioren* Durchmesser in Neutralstellung werden im Abschnitt 4.5.7 diskutiert. Die Methode wird auf der Seite 37 detailliert beschrieben.

**Tabelle 16: Lateral und anterior-posteriorer Durchmesser des Rückenmarks in der Transversalebene in Neutralstellung und in Rotation zur linken und rechten Seite**  
Durchmesser in Millimetern, gemessen auf Höhe des *Foramen magnum*, auf Höhe des *Dens axis* und auf Höhe der *cervicalen* Bandscheiben.

Pos.	Messbereich	Foramen magnum	Dens axis	HW2/3	HW3/4	HW4/5	HW5/6	HW6/7	HW7-BW1
N	Lateral	13,9 ± 0,5	12,0 ± 0,9	12,6 ± 0,8	13,3 ± 0,9	13,5 ± 1,0	13,3 ± 1,3	13,0 ± 1,2	11,4 ± 1,2
	Anterior-posterior	12,4 ± 1,4	9,7 ± 0,7	8,5 ± 0,6	8,3 ± 0,5	7,7 ± 0,5	7,7 ± 0,7	7,3 ± 0,7	7,4 ± 0,6
L	Lateral	13,5 ± 0,8	11,7 ± 0,9*	12,3 ± 0,7	13,3 ± 1,0	14,1 ± 0,9*	13,3 ± 1,1	13,4 ± 1,0	10,9 ± 1,1
	Anterior-posterior	12,3 ± 1,4	10,4 ± 0,9	8,7 ± 0,5	8,3 ± 0,3	8,0 ± 0,5	7,9 ± 0,4	7,4 ± 0,5	7,3 ± 0,5
R	Lateral	13,8 ± 0,8	12,9 ± 0,8*	12,7 ± 0,7	13,6 ± 0,8*	14,1 ± 0,8*	13,9 ± 0,8	13,1 ± 0,9	11,0 ± 0,6
	Anterior-posterior	12,8 ± 1,3	9,9 ± 0,6	8,4 ± 0,5	8,5 ± 0,5	8,2 ± 0,2*	7,9 ± 0,7	7,0 ± 0,5	7,0 ± 0,5

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel, N = Neutralstellung, L = Rotation zur linken Seite, R = Rotation zur rechten Seite  
\* = signifikanter Unterschied zu den Mittelwerten in Neutralstellung ( $p < 0,05$ )

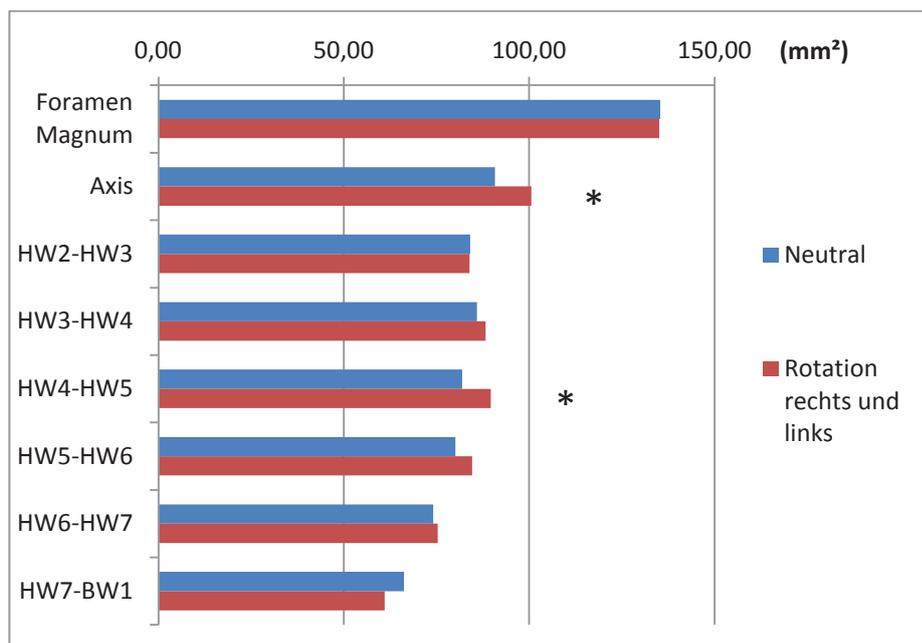
Um die Durchmesser des Rückenmarks anschaulicher vergleichen zu können, werden die Werte des *lateralen* und des *anterior-posterioren* Rückenmarksdurchmessers mittels Flächenbestimmung, wie auf Seite 37 beschrieben, zu einem Wert zusammengefasst.

Die so errechneten Werte für die Rückenmarksdurchschnittsfläche sind in Tabelle 17 dargestellt und zeigen signifikante Unterschiede in Rotation auf Höhe des *Dens axis* und HW4-HW5 gegenüber den Werten in Neutralstellung. Die Ergebnisse hierzu sind in Abb. 25 veranschaulicht. Es wird allgemein gezeigt, dass es unter Rotation der HWS zu einer signifikanten Zunahme der Querschnittsfläche des Rückenmarks kommt.

**Tabelle 17: Fläche des Rückenmarks in Neutralstellung und in Rotation zur linken und rechten Seite**  
 Rückenmarksquerschnittfläche in Quadratmillimetern, berechnet aus den Werten des *lateralen* und des *anterior-posterioren* Rückenmarkdurchmessers, welche auf Höhe des *Foramen magnum*, auf Höhe des *Dens axis* und auf Höhe der *cervicalen* Bandscheiben gemessen wurden.

Pos.	Foramen magnum	Dens axis	HW2-HW3	HW3-HW4	HW4-HW5	HW5-HW6	HW6-HW7	HW7-BW1
N	135,6 ± 17,6	90,9 ± 10,8	84,1 ± 8,2	85,9 ± 7,8	82,0 ± 8,9	80,8 ± 13,6	73,9 ± 8,1	66,5 ± 11,4
L	130,7 ± 12,5	95,0 ± 13,7*	84,2 ± 7,4	86,1 ± 7,3	88,9 ± 9,3*	82,7 ± 7,3	78,0 ± 7,4	61,7 ± 4,2
R	139,8 ± 20,1	100,3 ± 8,5*	83,7 ± 6,0	90,4 ± 7,8*	90,5 ± 5,7*	86,6 ± 10,2	72,5 ± 5,8	60,0 ± 6,0

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel, N = Neutralstellung, L = Rotation zur linken Seite, R = Rotation zur rechten Seite  
 \* = signifikanter Unterschied zu den Mittelwerten in Neutralstellung ( $p < 0,05$ )



**Abb. 25: Fläche des Rückenmarks in Neutralstellung und in Rotation**

Rückenmarksquerschnittsfläche in Quadratmillimetern ( $\text{mm}^2$ ), dargestellt auf der x-Achse. Berechnet aus den durchschnittlichen Werten des *lateralen* und des *anterior-posterioren* Rückenmarkdurchmessers, gemessen auf Höhe des *Foramen magnum*, auf Höhe des *Dens axis* und auf Höhe der *cervicalen* Bandscheiben (y-Achse). Die Werte der Links- und Rechtsrotation sind zu einem Durchschnittswert zusammengefasst. Anzahl = 9 Probanden; HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

\* = signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten der Fläche des Rückenmarks in Rotationsstellung und Fläche des Rückenmarks in Neutralstellung ( $p < 0,05$ )

### 3.4 Vergleich von knöchernem Rotationswinkel der Halswirbel und Torsionswinkel des Rückenmarks in Rotationsstellung

Die Ergebnisse der Messung der Winkel von Rückenmark und Halswirbeln bei Rotation der HWS sind in Tabelle 18 aufgeführt und in Abb. 26 graphisch ausgewertet.

In der Gegenüberstellung (Tabelle 18) zeigen sich ein signifikanter Unterschied von  $17,0^\circ$  in Rechtsrotation und ein signifikanter Unterschied von bis zu  $19,7^\circ$  in

Linksrotation auf Höhe des Segmentes HW1-HW2. Die Methode wird auf der Seite 39 detailliert beschrieben.

**Tabelle 18: Gegenüberstellung der Rotationswinkel von Occiput und Halswirbeln (knöcherne Rotationswinkel) mit dem Torsionswinkel des Rückenmarks entlang der HWS**

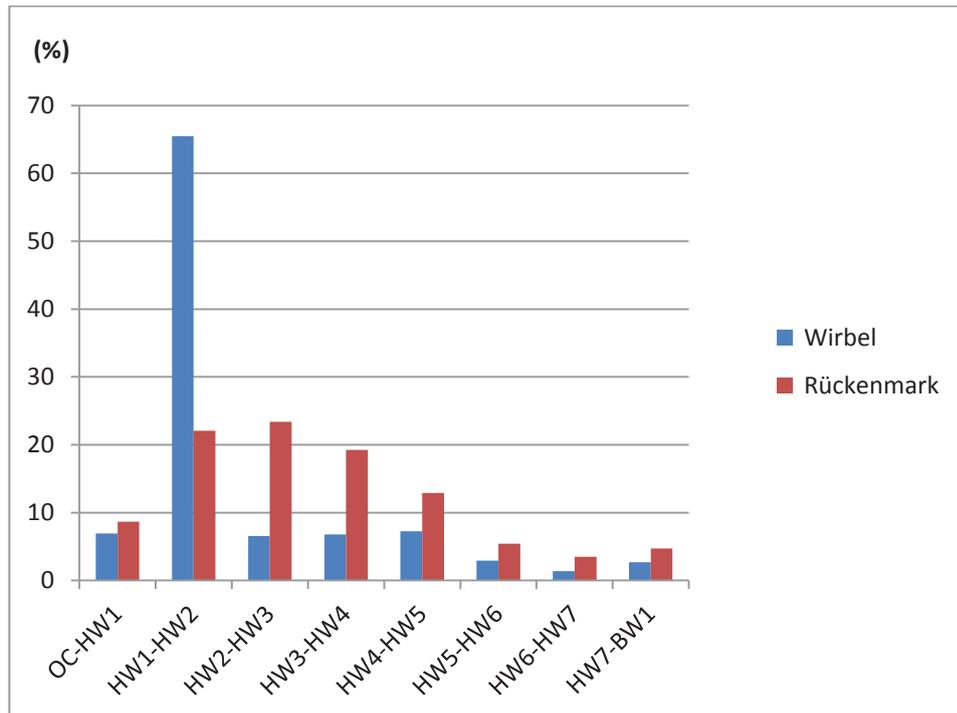
Winkelangaben in Grad (°), gemessen als Winkel zwischen einer Linie durch den *Processus spinosus* und mittig durch den Wirbelkörper und dem lateralen Bildrand (Halswirbel) bzw. zwischen einer Linie durch das Rückenmark an der breitesten Stelle von *lateral* nach *lateral* und dem oberen Bildrand (Rückenmark) entlang der Bewegungssegmente der HWS.

Position	Messbereich	OC-HW1	HW1-HW2	HW2-HW3	HW3-HW4	HW4-HW5	HW5-HW6	HW6-HW7	HW7-BW1
Rotation links	Winkel Halswirbel	3,1 ± 1,8	29,6 ± 6,4*	3,0 ± 1,6*	3,1 ± 4,2*	3,3 ± 2,3*	1,3 ± 2,2	0,6 ± 1,6	1,2 ± 1,5
	Winkel Rückenmark	3,9 ± 1,8	9,9 ± 3,0*	10,5 ± 3,9*	8,6 ± 3,5*	5,8 ± 3,4*	2,4 ± 3,5	1,6 ± 1,4	2,1 ± 2,3
Rotation rechts	Winkel Halswirbel	1,5 ± 2,4	31,3 ± 5,1*	3,1 ± 3,0*	3,1 ± 3,5*	5,5 ± 4,6	2,1 ± 2,8	2,5 ± 2,1	1,9 ± 2,1
	Winkel Rückenmark	2,9 ± 3,5	14,3 ± 5,9*	10,8 ± 5,0*	6,6 ± 3,6*	7,3 ± 4,5	3,5 ± 4,1	3,8 ± 2,4	1,2 ± 1,4

Angaben als Mittelwert ± Standardabweichung; Anzahl = 9 Probanden; OC = *Occiput*, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

\* = signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten des Winkels des Rückenmarks und des Winkels des Halswirbels für die jeweilige Position ( $p < 0,05$ )

Der prozentuale Anteil der Winkel am Gesamtwinkel für die Rotationsbewegung von Rückenmark und Halswirbeln divergiert in einigen Segmenten signifikant. Im Bereich HW1-HW2 findet 64 % (30,5°) der Rotation der HWS statt, während der Torsionswinkel des Rückenmarks hier nur zu 25 % (12,1°) beträgt (kombinierte Durchschnittswerte von der Rechts- und Linksrotationsstellung). Dahingegen findet der größte Teil der Rückenmarkstorsion zwischen HW2-HW3 mit 22 % (10,7°) und HW3-HW4 mit 16 % (7,6°) statt. Während die Rotation der HWS in ihrem überwiegenden Anteil im Segment HW1-HW2 stattfindet und die anderen Segmente kaum eine Rolle spielen, verteilt sich die Rotation des Rückenmarks viel mehr absteigend auf die Segmente HW1-HW2, HW2-HW3, HW3-HW4 und HW4-HW5, wie in Abb. 26 zu sehen ist.



**Abb. 26: Vergleich der prozentualen Verteilung der Rotationswinkel der Halswirbel und des Rückenmarks in den einzelnen Halswirbelsäulensegmenten in Linksrotation**

Darstellung der Winkelanteile in % (y-Achse) bezogen auf den Gesamtrotationwinkel der Halswirbel und des Rückenmarks für die einzelnen Bewegungssegmente der HWS (x-Achse). Anzahl = 9 Probanden; OC = *Occiput*, HW = Halswirbel, BW = Brustwirbel

## 4 Diskussion

### 4.1 Zusammenfassung der Fragestellung und Ergebnisse dieser Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit war, ein Gesamtbild der Einflüsse durch Rotation, Anteflexion und Retroflexion der HWS auf das Rückenmark bei gesunden Probanden zu erstellen.

Um sich vorab eine Übersicht über die bestehenden Erkenntnisse zu diesem Untersuchungsfeld zu verschaffen und die methodische Herangehensweise zu präzisieren, ist eine systematische Literaturrecherche durchgeführt worden.

Die Literaturrecherche war darauf ausgelegt, die bisherigen Ergebnisse zum Einfluss der Bewegungen der HWS auf das Rückenmark an gesunden Probanden zusammenzutragen. Nachdem die Kriterien für eine wissenschaftliche Vermessung der HWS und des Rückenmarks mittels bildgebender Verfahren zu Beginn dieser Arbeit festgelegt und die Publikationen der Literatur aus den Jahren 1911 bis 2013 nach wissenschaftlichen Standards gesichtet wurden, standen nach Anwendung von Ein- und Ausschlusskriterien 54 Arbeiten für die weitergehende Analyse zur Verfügung (Abschnitt 1.2). Es fanden sich vor allem Arbeiten zu Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen und deren Einfluss auf Lage, Länge, Durchmesser und Fläche des Rückenmarks im Bereich der HWS (vgl. z.B. Kuwazawa und Mitarbeiter, (2006a) und Zhang und Mitarbeiter (2011)). Arbeiten, die die Rotationsbewegung der HWS und deren Einfluss auf das Rückenmark untersuchen, wurden nicht gefunden. Dadurch wurde die Frage nach den Auswirkungen der Rotation auf das Rückenmark im Bereich der HWS zum Kern dieser Arbeit.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde auch systematisch nach Methoden zur Vermessung der HWS und des Rückenmarks geforscht. Die vorgefundenen Methoden wurden nach festen Kriterien im Hinblick auf ihre Eignung für die zentralen Fragestellungen dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 1.3) bewertet, mit dem Resultat, dass zu diesem Zweck neue Methoden zu entwickeln waren (vgl. Abschnitt 2.6.1).

Um Einsicht in die bislang noch wenig erforschte Fragestellung dieser Arbeit zu erhalten und die vorgefundenen Ergebnisse aus der Literatur zu verifizieren,

wurden die funktionellen MRT-Aufnahmen von neun gesunden, männlichen Probanden hinsichtlich des Gesamtumfanges der Bewegungen und einer damit verbundenen Verlagerung sowie Veränderung des Durchmessers und der Torsionswinkel des Rückenmarks vermessen.

Durch die MRT-Aufnahmen besteht die Möglichkeit, die Weichteilstrukturen des Spinalkanals *in vivo* detailliert darzustellen (Forsting und Jansen, 2014). Die im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Ergebnisse der Messungen bei Rotation, Anteflexion und Retroflexion der HWS zeigen sehr detailliert das bisher nicht in diesem Umfang beschriebene Bewegungs- und Anpassungsverhalten des Rückenmarks und ergänzen das Gesamtbild.

Eine neue Erkenntnis ist, dass bei der Rotation der HWS eine signifikante seitliche Verlagerung des Rückenmarks in dem Segment HW4-HW5 als Ausgleich zu der Beanspruchung und Verlagerung im HW1-HW2 Segment auftritt (vgl. Abschnitt 3.2.2).

Ebenfalls zeigt sich, dass das Rückenmark und die Halswirbel verschiedene Drehdynamiken haben (vgl. Abschnitt 3.4.3.4), was zum einen von den Nervenwurzeln kompensiert werden und zum anderen von den unter Abschnitt 1.1 beschriebenen, das Rückenmark fixierenden Strukturen zugelassen werden muss.

Desweiteren zeigt sich, dass sowohl die Rotations- als auch Anteflexions- und Retroflexionsbewegung der HWS einen signifikanten Einfluss auf den Durchmesser des Rückenmarks haben (vgl. Abschnitt 3.3). Wie die Vermessung der Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen bestätigten, lässt sich eine signifikante Verlagerung des Rückenmarks im Spinalkanal und eine Veränderung des Rückenmarkdurchmessers feststellen, welche bereits von Kuwazawa und Mitarbeiter, (2006a) und Zhang und Mitarbeiter (2011) beschrieben wurden (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Untersuchungen zur Seitneigung der HWS wurden in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

## **4.2 Einflüsse der Ante- und Retroflexionsbewegung**

Es soll zunächst die Frage nach den Einflüssen der Ante- und Retroflexion auf das Rückenmark behandelt werden. Hierzu wurde eine neue Vermessungsmethode entwickelt, aufbauend auf bereits bestehenden Methoden zur Winkelmessung der einzelnen Bewegungssegmente der HWS nach Xu–hui und Mitarbeiter (2009).

Die angewandte Methode basiert auf einem Keilwinkel zwischen Deck- und Grundplatte der Wirbel des jeweiligen Bewegungssegmentes, schließt die Übergänge der HWS mit ein und nutzt das *Foramen magnum* als die für das Rückenmark relevante Struktur des *Occiputs* (Seite 26). Das *Foramen magnum* bildet den Eingang des Spinalkanals. Das macht es im Gegensatz zur Linie gebildet durch das *Palatum durum* und *Opisthion* (vgl. Takeshima und Mitarbeiter (2002) und Karhu und Mitarbeiter (1999)) zu einem am Rückenmark orientiertem Referenzpunkt.

In der Ante- und Retroflexionsbewegung wurden in Mittsagittalebene die Winkel der einzelnen Bewegungssegmente, der Bewegungsumfang der gesamten HWS sowie die Rückenmarksdurchmesser und die Verlagerung des Rückenmarks im Spinalkanal vermessen. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 3.3.1 dargestellt und werden im Folgenden unter Berücksichtigung der einschlägigen Literatur nähergehend diskutiert.

### **4.2.1 Lageveränderungen des Rückenmarks im Spinalkanal in Anteflexions-Retroflexionsbewegung**

Es gilt zunächst die Lageveränderungen des Rückenmarks im Spinalkanal bei der Anteflexions-Retroflexionsbewegung zu betrachten, welche zuvor schon von Muhle und Mitarbeiter (1998) sowie von Chiavassa und Mitarbeiter (2000) untersucht worden ist. Dazu wurde in dieser Arbeit speziell auf Höhe der Bandscheibe der *anteriore* und *posteriore Subarachnoidalraum* vermessen. Als Grundlage diente die Methode von Chiavassa und Mitarbeiter (2000) (Seite 31).

Wie der Ergebnisteil darlegt (vgl. Abschnitt 3.2.1), kommt es bei den hier durchgeführten Untersuchungen vor allem in Anteflexion im Bereich des Segmentes HW5-HW6 mit der größten segmentalen Beweglichkeit zu einer Anlagerung des

Rückenmarks an die *anteriore* Spinalkanalwand mit einer signifikanten Reduzierung des *Subarachnoidalraums* auf  $1,5 \pm 1,0$  mm gegenüber  $3,3 \pm 1,0$  mm in Neutralstellung.

In Retroflexion kommt es ebenfalls im Segment HW5-HW6 zur stärksten Verlagerung des Rückenmarks nach *posterior* an die hintere Wand des Spinalkanals mit einer signifikanten Reduzierung des *Subarachnoidalraums* auf  $0,9 \pm 0,5$  mm gegenüber  $1,5 \pm 1,4$  mm in Neutralstellung (siehe auch Tabelle 12 und Tabelle 13, Abschnitt 3.2.1).

Diese Ergebnisse bestätigen die Arbeit von Muhle und Mitarbeiter (1998) und Chiavassa und Mitarbeiter (2000), welche zeigten, dass in Anteflexion auf der Höhe des HW5 der *anteriore Subarachnoidalraum* um 1,5 mm gegenüber der Neutralstellung verringert wird. In Retroflexion wird ebenfalls eine signifikante Reduzierung des *Subarachnoidalraums* gegenüber der Neutralstellung beschrieben (Muhle und Mitarbeiter, 1998; Chiavassa und Mitarbeiter, 2000).

Anhand der Messungen des *Subarachnoidalraums* in der Anteflexions- und Retroflexionsbewegung demonstriert sich, dass das Rückenmark im Spinalkanal nur bedingt straff fixiert ist und sich den Bewegungen der HWS anpassen kann. Dabei kann es sich ganz an die Wirbelkörperhinterwand anlagern und die Strukturen des *Subarachnoidalraums* verdrängen, wie es auch in den Arbeiten von Reesink und Mitarbeiter (2001), Muhle und Mitarbeiter (1998) und Chiavassa und Mitarbeiter (2000) konstatiert wird.

#### **4.2.2 Veränderung des Rückenmarksdurchmessers in Anteflexions-Retroflexionsbewegung**

Des Weiteren soll untersucht werden, ob es bei der Anteflexions-Retroflexionsbewegung zu einer Veränderung des Rückenmarksdurchmessers kommt. Zur Bestimmung des Rückenmarksdurchmessers wurde die Methode, wie sie in der Arbeit von Chiavassa und Mitarbeiter (2000) beschrieben ist, als Grundlage verwendet (Abschnitt 1.2.3.3).

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass es zu einem signifikanten Unterschied des Durchmessers um bis zu 0,5 mm in den Level *Dens axis*, HW2-HW3, HW3-HW4

und HW7-BW1 zwischen Anteflexion und Retroflexion kommt (siehe auch Tabelle 12 und Abb. 24, Abschnitt 3.3.1). In Anteflexion kommt es zu einer Abnahme des Rückenmarksdurchmessers gegenüber der Neutralstellung und in Retroflexion zu einer Zunahme des Rückenmarksdurchmessers. Dieser Zusammenhang wurde auch bereits in den Arbeiten von Kuwazawa und Mitarbeiter (2006a) sowie von Zhang und Mitarbeiter (2011) festgestellt.

Diese Ergebnisse lassen sich möglicherweise mit dem Einfluss der Anteflexions- und Retroflexionsbewegung auf die Längenänderung des Rückenmarks erklären (Kuwazawa und Mitarbeiter (2006b)). Durch die Anteflexionsbewegung richtet sich die Wirbelsäule auf. Das Rückenmark wird dadurch in die Länge gezogen, was sich im verringerten Durchmesser (z.B. HW2-HW3 von 8,0 mm auf 7,7 mm) widerspiegelt (Tabelle 15, Abschnitt 3.3.1). In Retroflexionsstellung stellt sich der gegenteilige Effekt (z.B. HW7-BW1 von 6,7 mm auf 7,1 mm) ein. Durch die Verkürzung des Spinalkanals kann sich das Rückenmark zusammenziehen und der Rückenmarksdurchmesser nimmt zu (Hüter-Becker und Mitarbeiter, 2011).

### **4.3 Diskussion der Einflüsse der Rotationsbewegung**

Da über die Einflüsse der Rotationsbewegung der HWS auf das Rückenmark noch keine aussagekräftigen Ergebnisse in der Literatur vorliegen, steht die Frage, ob speziell auch bei einer Rotation der HWS eine Änderung der Lage und Form des Rückenmarks zu verzeichnen ist, im Zentrum der vorliegenden Arbeit und ihrer Diskussion.

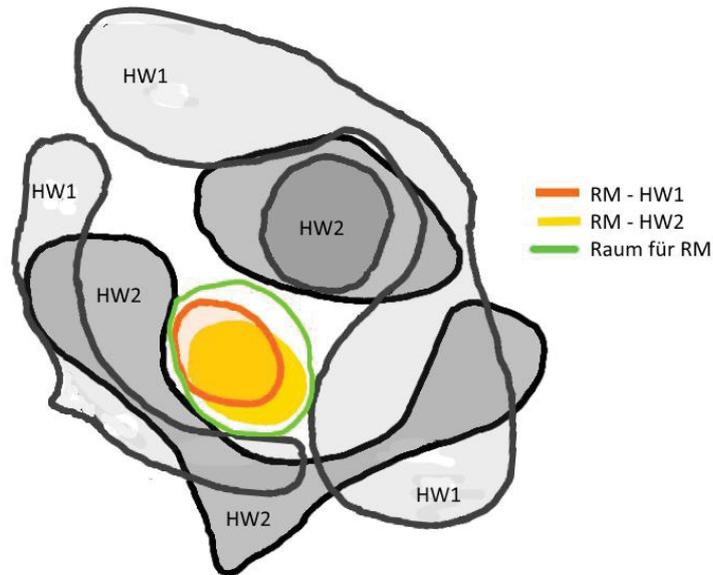
Zur Beschreibung der Lage des Rückenmarks im Vergleich zur Wirbelsäule bei Rotation im Bereich der HWS wurden Rückenmark und Wirbel vermessen. In einem ersten Schritt wurde der Rotationswinkel der Wirbel zum *lateralen* Bildrand bestimmt. Diese schon beschriebene Methode von Takasaki und Mitarbeiter (2011) wurde in dieser Doktorarbeit durch eine angepasste Kalibrierung des Bildrandes nach Maruta und Mitarbeiter (2004) anhand des ersten thorakalen Wirbels ergänzt, um Fehllagerungen auszuschließen. In einem zweiten Schritt erfolgte die Messung des Torsionswinkels des Rückenmarks zum *lateralen* Bildrand und dessen Abgleich mit dem Rotationwinkel der Wirbel.

Dabei manifestiert sich insbesondere im HW1-HW2-Segment, dass das Rückenmark und die Halswirbel unterschiedliche Drehdynamiken aufweisen: Während im HW1-HW2-Segment 64 % (30,5°) der Rotation der Wirbel stattfindet, torsiert das Rückenmark nur zu 25 % (12,1°) (siehe auch Tabelle 18 und Abb. 26, Abschnitt 3.4). Dies lässt darauf schließen, dass das *Ligamentum denticulatum*, das das Rückenmark mit der *Dura mater* verbindet, um es in Position zu halten, in Rotation nachgibt (Lang und Emminger, 1963).

#### **4.3.1 Verlagerung des Rückenmarks in Rotation**

Es bleibt nun zu klären, inwiefern eine Verlagerung des Rückenmarks in Rotation gegenüber den Wirbeln stattfindet. Dazu wurde in dieser Arbeit die Position des Mittelpunktes des Rückenmarks im Spinalkanal in Neutralstellung mit dessen Position in Rotation verglichen. Die Erarbeitung und Definition der neu erstellten Methode ist unter Abschnitt 2.6.3.4 beschrieben.

Es ist aus der Literatur bekannt, dass sich die Rotation der Halswirbel, die vorwiegend im *Atlanto-axial*-Gelenk stattfindet, um eine vertikale Achse durch den *Dens axis* vollzieht (Penning and Wilmink, 1987). Dies bedeutet, dass die Rotationsachse des *Atlanto-axial*-Gelenks bezogen auf die Querschnittsfläche des Spinalkanals exzentrisch gelagert ist, was zu einem *Zigarrencutter*-Effekt führt, der das Rückenmark einengt (Molnár und Mitarbeiter, 2006). Es ist weiterhin bekannt, dass sich mit einer Rotation zur linken Seite der rechte Teil des *Atlas* nach vorne und zur Seite bewegt, während sich sein linker Teil nach hinten und zur Mitte bewegt (Dumas und Mitarbeiter, 1994). *In vitro*-Arbeiten zeigen, dass sich bei maximaler Rotation im *Atlanto-axial*-Gelenk der Querschnitt des Spinalkanals auf 61 % gegenüber der Neutralstellung verringert (Tucker and Taylor, 1998). Dies ist in Abb. 27 dargestellt.



**Abb. 27: Einengung des Rückenmarks im *Atlanto-axial*-Gelenk bei Linksrotation in Neutralstellung**  
 RM = Rückenmark, HW = Halswirbel (Ludwig Klasen)

Die hier angefertigten Messungen zeigen, dass sich die Richtung der Verlagerung des Rückenmarks im Bereich der HWS abhängig vom jeweiligen Level, in dem sie gemessen wurde, unterscheidet.

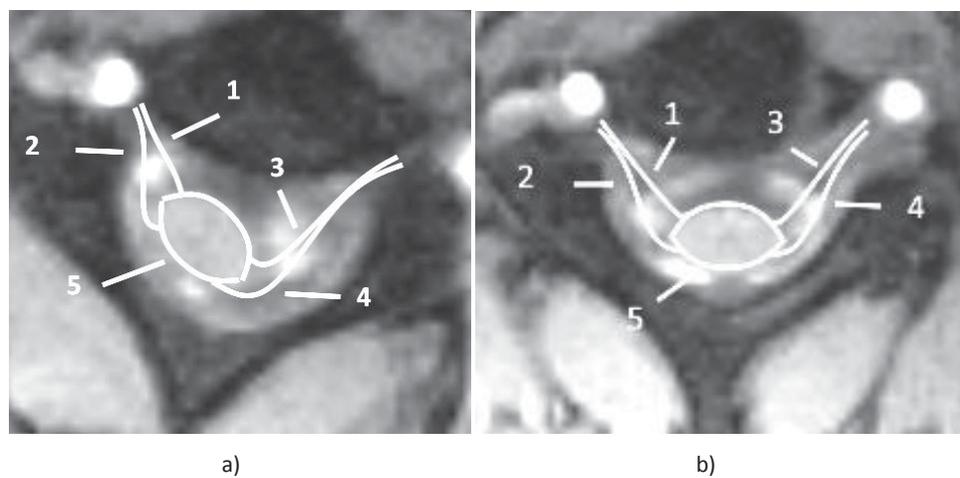
Am Beispiel der Linksrotation kommt es im Bereich des *Atlas* zu einer Verlagerung des Rückenmarks nach links ( $1,7 \pm 0,9$  mm), im Bereich des *Axis* zu einer Verlagerung des Rückenmarks nach rechts ( $2,9 \pm 1,2$  mm) und im Bereich der Segmente HW4 ( $0,4 \pm 0,6$  mm), HW5 ( $0,5 \pm 0,5$  mm) und HW6 ( $0,1 \pm 0,3$  mm) zu einer Verlagerung des Rückenmarks nach links. Die Verschiebungen, die im *Atlanto-axial*-Gelenk durch die exzentrische Lagerung entstehen, werden in den Segmenten HW4, HW5 und HW6 mit einer signifikanten Ausgleichsbewegung kompensiert (Abb. 22 und Abb. 23, Abschnitt 3.2.2).

In dieser Hinsicht lässt sich die Rückenmarksverlagerung, je nach Verlagerungsrichtung, in drei Bereiche einteilen: In den Bereich des *Atlas*, des *Axis* und der Segmente HW4, HW5 und HW6. Das Rückenmark verlagert sich dabei nach einem *ipsilateral(Atlas)-kontralateral(Axis)-ipsilateralen(HW4-6)*-Muster.

Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die verlängerte Strecke, welche aus der Differenz von Wirbelrotation und Rückenmarkstorsion und der seitlichen Verlagerung des Rückenmarks im *Axis*-Level hervorgeht, von den Nervenästen

kompensiert werden muss. Bei maximaler Rotation ergibt sich so eine Distanz von bis zu ca. 6 mm, die vom *Radix posterior* des *Nervus spinalis* zu überbrückt ist, wie in Abb. 28 dargestellt wird.

Diese Feststellung ist an die Verwendung von MRT-Aufnahmen gebunden und in dieser Arbeit erstmalig beschrieben. Aus diesem Grund liegen in der Literatur keine vergleichbaren Ergebnisse vor, die an dieser Stelle diskutiert werden könnten. Auch lieferte die Literaturrecherche generell keine Arbeiten, die sich mit dem Einfluss der Rotation der HWS auf das Rückenmark bei gesunden Probanden beschäftigten, wodurch zu der hier geschilderten Fragestellung Referenzarbeiten fehlen.



**Abb. 28: Einfluss der unterschiedlichen Verlagerung von Rückenmark und 2. Halswirbel auf den *Radix posterior* (4) des *Nervus spinalis* in Linksrotation gegenüber Neutralstellung**

a) zeigt das verschobene Rückenmark (5) mit langgezogenem linken *Radix posterior* (4) auf Höhe des 2. Halswirbels in Linksrotation. b) zeigt auf Höhe des 2. Halswirbels die Lage des Rückenmarks in Neutralstellung. 1 = *Radix anterior dextra*, 2 = *Radix posterior dextra*, 3 = *Radix anterior sinistra*, 4 = *Radix posterior sinistra*, 5 = Rückenmarksumriss (Magnetresonanztomographie-Aufnahmen: Archiv Dr. med. Josef Assheuer, Köln)

#### **4.3.2 Veränderung von Rückenmarksdurchmesser und –Querschnittsfläche in Rotation**

Zur Beantwortung der Frage, ob es bei einer Rotation der HWS zu einer Veränderung des Rückenmarksdurchmessers und/oder seiner Querschnittsfläche kommt, werden der *anterior-posteriore* und der *laterale* Durchmesser in Neutral- und Rotationsstellung gemessen und aus ihnen die Rückenmarksfläche berechnet. Die Fläche des Rückenmarks wurde bereits von Okada und Mitarbeiter (1994) und von Kuwazawa und Mitarbeiter (2006a) anhand von MRT-Aufnahmen in Neutralstellung vermessen, weswegen sich an dieser Stelle ein Vergleich der

Ergebnisse anbietet. Die beiden oben genannten Studien konstatieren eine Querschnittsfläche des Rückenmarks z.B. auf Level HW4-HW5 von 90,9 mm<sup>2</sup> (Kuwazawa und Mitarbeiter (2006a)) und 85.8 mm<sup>2</sup> (Okada und Mitarbeiter (1994)) und gleichen damit den Ergebnissen dieser Arbeit (Level HW4-HW5 von 82,0 ± 8,9 mm<sup>2</sup>).

In dieser Arbeit zeigt sich, dass es in Rotation zu einer signifikanten Zunahme der Querschnittsfläche auf der Höhe des *Dens axis* von 90,9 mm<sup>2</sup> in Neutralstellung auf 98 mm<sup>2</sup> und auf Höhe von HW4-HW5 von 82,8 mm<sup>2</sup> in Neutralstellung auf 89.7 mm<sup>2</sup> kommt (Tabelle 17, Abschnitt 3.3.2). Diese Feststellung ist an die Verwendung von MRT-Aufnahmen gebunden und wird in dieser Arbeit erstmalig beschrieben.

Vermuten lässt sich, dass diese Flächenzunahme durch die Torsionsbewegung des Rückenmarks bei Rotation der HWS zustande kommt. Der Effekt lässt sich mit einem verwundenen Drahtseil vergleichen, das durch die Torsion verdreht wird: Es verkürzt sich und vergrößert dabei seinen Umfang, wodurch die Querschnittsfläche zunimmt.

#### **4.4 Fazit zur Diskussion der Ergebnisse**

Die umfangreich erhobenen Daten haben neue Erkenntnisse zu den Einflüssen der Rotation der HWS auf das Rückenmark geliefert und konnten darüber hinaus die in der Literatur beschriebenen Zusammenhänge zu den Einflüssen der Anteflexion und Retroflexion bestätigen (vergleiche erneut Muhle und Mitarbeiter (1998), Chiavassa und Mitarbeiter (2000), Kuwazawa und Mitarbeiter (2006a), Zhang und Mitarbeiter (2011) und Okada und Mitarbeiter (1994)).

#### **4.5 Diskussion der Limitationen und Einschränkungen der Methode**

Im Folgenden werden die methodischen Limitationen und Einschränkungen betrachtet, unter denen die Ergebnisse dieser Arbeit zu beurteilen sind.

##### **4.5.1 Auswahl der Probanden**

Bei der Wahl des Studienmaterials müssen die Vor- und Nachteile von gesunden Probanden gegenüber menschlichen oder tierischen Kadavern abgewogen werden.

Der Vorteil von Kadavern besteht in der Möglichkeit, besonders detaillierte Aufnahmen anfertigen zu können, da eine eingespannte Kadaverwirbelsäule unbegrenzt in jeder beliebigen Position gehalten werden kann. Probanden hingegen können nur eine gewisse Zeit in maximaler Funktionsstellung verharren.

Jedoch sind vor dem Hintergrund, dass hier ein genaues Bild der funktionellen topographischen Anatomie angefertigt werden soll, *in vivo*-Aufnahmen von gesunden Probanden gegenüber Aufnahmen von Kadavern vorzuziehen, da im letzteren Fall die fehlenden Einflüsse von *Liquordruck* und gefühltem *Venenplexi* die Anatomie verändern würden.

Den hier behandelten Aufnahmen liegt eine homogene Gruppe von männlichen Probanden ohne objektiv oder subjektiv erkennbare gesundheitliche Einschränkungen zugrunde. Aufgrund der geringen Probandenanzahl von neun männlichen Probanden, erweist es sich als schwierig, aussagekräftige und signifikante Werte zu erhalten. Jedoch sollte ihre Bedeutung aufgrund der Homogenität der Probandengruppe nicht unterschätzt werden.

Es ist denkbar, dass aus der Tatsache, dass es sich bei den Probanden um Sportstudenten handelt, wenig repräsentative Ergebnisse resultieren, da sich die Probanden voraussichtlich mehr als die Durchschnittsbevölkerung körperlich betätigen.

#### **4.5.2 MRT-Aufnahmen**

Die strahlungsfreie Magnetresonanztomographie (MRT) stellt gegenüber der Computertomographie (CT) oder anderen radiologischen Methoden das Verfahren erster Wahl bei der Darstellung von Weichgewebe dar (Forsting und Jansen, 2014). Die MRT-Aufnahmen sind durch Schnittdicke und Dauer der Untersuchung limitiert (Salem und Mitarbeiter, 2013). Bei den Aufnahmen müssen die Probanden die eingenommene Position mit geringer Unterstützung selbst aufrechterhalten. Dies erfordert im Vorfeld ein sorgfältiges Abwägen der Dauer und Schnittdicke der Aufnahme. Um möglichst genaue Messungen vorzunehmen, wurde die Schichtdicke auf 3 mm festgelegt. Dies ist der Kompromiss für eine hohe Messgenauigkeit ohne Bewegungsartefakte durch zu lange Aufnahmezeiten.

### **4.5.3 Lagerung der Probanden**

Die Lagerung der aktiv eingenommenen Bewegung durch Lagerungskissen ist ein simples und kostengünstigstes Verfahren. Jedoch erschwert die willkürlich eingenommene Haltung im Nachhinein die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, da es sich nicht um eine einheitliche Position handelt.

Bei Aufnahmen mit Halteapparaten können passive Bewegungen vermessen werden, da die Stabilisierung nicht durch Muskeln veranlasst wird. Dadurch, dass die Muskeln in den hier betrachteten Bereichen einerseits am Kopf ansetzen, andererseits an den Wirbeln, die jedoch nicht fixiert werden können, würden sie sich bei einer Lagerung im Halteapparat höchstwahrscheinlich in Richtung ihrer neutralen Position bewegen. Die Folge könnte sein, dass der Anteil der Rotation im *Atlanto-axial*-Gelenk vergrößert wird und somit die Ergebnisse verfälscht werden. Aus diesem Grund wurden die Aufnahmen ohne Halteapparat angefertigt.

Dadurch, dass die Aufnahmen im Liegen erfolgt sind, fehlt der Einfluss des 3,5 kg-Eigengewichtes des Kopfes in aufrechter Haltung. Das könnte möglicherweise Einfluss auf die anatomischen Gegebenheiten und damit auf die Messwerte haben. Kuwazawa und Mitarbeiter (2006a) haben in diesem Zusammenhang jedoch herausgefunden, dass sich kein signifikanter Unterschied bei ihren Messungen einstellte, je nachdem, ob die Aufnahmen im Liegen oder im Stehen angefertigt wurden. Auch der abweichende *Liquordruck* scheint bei Probandenaufnahmen im Liegen gegenüber solchen im Stehen im Bereich der HWS nur geringfügig Einfluss zu nehmen (Carlson und Mitarbeiter, 2003).

### **4.5.4 Aufnahmen von Bewegungskombinationen**

Die HWS ermöglicht dem Kopf einen großen Bewegungsspielraum, der nötig ist, um die Umgebung wahrzunehmen. In dieser Arbeit war es nicht möglich, allen Bewegungen und ihren möglichen Kombinationen Rechnung zu tragen. Die Betrachtung der Hauptbewegungen Anteflexion-Retroflexion und Rotation in Verbindung mit den Erkenntnissen aus zuvor veröffentlichten Untersuchungen lässt aber eine Interpretation der Gesamtbeweglichkeit der HWS und deren Einflüsse auf das Rückenmark zu.

#### **4.5.5 Eichung des Bildrandes in Transversalaufnahmen**

Die Wahl des ersten *thorakalen* Wirbels als Referenzpunkt ist geeignet, um die Aufnahmen anschließender Untersuchungen miteinander zu vergleichen. Dieser darf aber nicht als Mittellinie des Menschen gesehen werden, wie Arbeiten mit *Situs inversus* Probanden zeigen (Kouwenhoven und Mitarbeiter, 2007).

#### **4.5.6 Torsionswinkel des Rückenmarks**

Die Erkenntnis, dass das Rückenmark fast unabhängig tordiert, sollte Anlass sein, das Augenmerk nicht allein auf die Rotation der Wirbel zu beschränken, sondern auch Erkenntnisse über das Verhalten des Rückenmarks zu gewinnen. Die vornehmliche Betrachtung der knöchernen Physiologie ist auf die Geschichte der Radiologie zurückzuführen. Da heute immer bessere Aufnahmetechniken für das Weichgewebe vorhanden sind, sollten neuere Arbeiten dieses zum Fokus haben.

#### **4.5.7 Messungen**

Die verwendete Vermessungsmethode ist auf die sorgfältige Betrachtung durch den Beurteiler angewiesen, da es noch keine Vermessungsprogramme gibt, die sichere Zahlen liefern. Durch die Anleitung des erfahrenen Nuklearmediziners Dr. med. J. Assheuer bei der Auswertung der MRT-Aufnahmen und Kontrolle der Messungen, konnte eine präzise Auswertung gewährleistet werden.

Bedingt durch Messungen in unterschiedlichen Bildschnittebenen (Transversal- und Mittsagittalebene) kam es zu variierenden Rückenmarksdurchmessern in Neutralstellung.

Aufgrund von Bewegungsartefakten konnte nicht jede Aufnahme verwertet werden. *Inter-* oder *intraobserve* Prozeduren sind nicht durchgeführt worden.

#### **4.6 Ausblick**

Die erfolgten Messungen zur Rotation der HWS zeigen sehr detailliert die bisher nicht in diesem Umfang beschriebenen unterschiedlichen Drehdynamiken von Rückenmark und Halswirbeln sowie die seitliche Verlagerung des Rückenmarks bei der Rotationsbewegung. Dies wirft die Frage auf, ob eine Rotation der HWS bei pathologischen Bewegungsvorgängen und bei Formveränderungen zu Schäden an

der Nervensubstanz führen kann. Aufgrund der großen Beweglichkeit der HWS sind diese wahrscheinlicher als bei der Lendenwirbelsäule.

Wie in den Arbeiten von Eskander und Mitarbeiter (2012) und Chugh und Mitarbeiter (2015) gezeigt wird, kann es bei Operationen an der unteren HWS aufgrund von Lagerungsfehlern des Kopfes durch eine vermehrte präoperative Torsion des Rückenmarks zu einer Häufung von postoperativen Lähmungen des fünften *cervicalen* Levels kommen. Diese Arbeiten verdeutlichen, dass noch weiterer Forschungsbedarf zum Thema „Schäden der Nervensubstanz durch Rückenmarkstorsion“ besteht.

Es ist des Weiteren bekannt, dass es bei einem HWS-Schleudertrauma im Verlauf zu Schmerzen und Bewegungseinschränkungen im Bereich von Hals und Schultern kommen kann. Eichberger und Mitarbeiter (2000) haben nachgewiesen, dass es in Folge des Peitschenschlagmechanismus mit vermehrter Ante- und Retroflexionsbewegung der HWS zu einer Erhöhung des Druckgradienten der Flüssigkeitssäule kommen kann, woraus sich Beschwerden ableiten.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung geben auch Anlass für weitere Forschungsarbeit in der Überlegung, ob eine Traumatisierung der Nervensubstanz etwa durch schrägseitliche Schleudertraumata und durch hintere Auffahrunfälle, bei denen der Fahrer im Aufprallmoment den Kopf rotiert, zustande kommen kann. In diesem Zusammenhang bleibt auch zu eruieren, ob das *Shaken baby-Syndrom* mit *Apnoe* eine mögliche Folge von *cervicalen* Rückenmarksverletzungen durch eine starke Rückenmarksverlagerung bei Kopfrotationen darstellen kann (Ghatan and Ellenbogen, 2002).

Es stellt sich außerdem die Frage, ob es Unterschiede im Rotationsverhalten des Rückenmarks bei Patienten mit Erkrankungen der HWS wie z.B. *Dystonien* oder *idiopathischer Skoliose* gibt. Die Arbeiten von Maruta und Mitarbeiter (2004) und Dohn und Mitarbeiter (2009) legen solche Zusammenhänge nahe und beschreiben die Beziehung zwischen der Rotation des Wirbels und der Rotation des Rückenmarks bei *Skoliose* durch drei Varianten: Einen überdrehten Typ, einen unterdrehten Typ und einen entgegengesetzten Typ. Bei Detorsionsoperationen der *Skoliose* kommt es vor allem beim überdrehten Typ zu Komplikation, so dass hier

von radikalem Vorgehen der Detorsionsoperation abgeraten wird (Maruta und Mitarbeiter (2004).

## 5 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Anatomie des <i>craniocervicalen</i> Übergangs, <i>Atlanto-okzipital</i> -Gelenk und <i>Atlanto-axial</i> - Gelenk (Putz und Pabst, 2006)	3
Abb. 2: Anatomie des Rückenmarks und der Rückenmarkshäute (Schiebler, 2004d)	4
Abb. 3: Anatomie der Rückenmarkshäute mit Spinalnerven (Netter, 2000)	6
Abb. 4: Definition der Winkelbestimmung und axialen Verschiebung in den Bewegungssegmenten HW2-HW3 bis HW6-HW7 nach Frobin und Mitarbeiter (2002)	12
Abb. 5: <i>Posterior</i> -Tangenten-Methode zur Vermessung der Halswirbelsäule Halswirbel 2 bis 7 (C2 bis C7) nach Harrison und Mitarbeiter (2000)	13
Abb. 6: Koordinatensystem zur dreidimensionalen Darstellung des Rotationswinkels der Halswirbel nach Ishii und Mitarbeiter (2004b)	15
Abb. 7: a), b) Methode zur Bestimmung der Rückenmarkstorsion mittels computertomographischer Myelographien nach Maruta und Mitarbeiter (2004)	17
Abb. 8: a), b), c), d) Darstellung der Grundidee einer Winkelbestimmung von Anteflexions- und Retroflexionsbewegungen in der Mittsagittalebene	26
Abb. 9: Winkelmessung im <i>Atlanto-okzipital</i> -Gelenk in Mittsagittalebene	27
Abb. 10: Winkelmessung im <i>Atlanto-axial</i> -Gelenk in Mittsagittalebene	29
Abb. 11: Winkelmessung zwischen dem 5. Halswirbel (HW5) und dem 6. Halswirbel (HW6) in Mittsagittalebene	30
Abb. 12: Vermessung des Rückenmarksdurchmessers (gepunktete Linie) und des <i>anterioren</i> und <i>posterioren Subarachnoidalraums</i> (durchgehende Linie) in Mittsagittalebene	31
Abb. 13: Kalibrierung der Lageposition des Probanden	34
Abb. 14: Rotationswinkel ( $\delta$ ) des Kopfes	35
Abb. 15: Rotationswinkel ( $\delta$ ) des <i>Atlas</i> in Links-Rotation	35
Abb. 16: Rotationswinkel ( $\delta$ ) des 2. Halswirbels in Links-Rotation	36
Abb. 17: Berechnung der Rückenmarksquerschnittsfläche	37
Abb. 18: Vermessung der Rückenmarksverlagerung auf Höhe des <i>Atlas</i> in Rechtsrotation	38
Abb. 19: Vermessung der Torsion des Rückenmarks in Rotationsstellung im Verhältnis zum Wirbel im Bereich der Halswirbelsäule	39
Abb. 20: Prozentuale Verteilung der Anteile der Bewegungssegmente an der gesamten Anteflexions-Retroflexions-Bewegung der Halswirbelsäule	41
Abb. 21: Prozentuale Verteilung der Anteile der Bewegungssegmente an der Rotation der Halswirbelsäule zur linken Seite	42
	65

Abb. 22: Verlagerung des Mittelpunktes des Rückenmarks im Spinalkanal bei Rechtsrotation gegenüber der Neutralstellung	44
Abb. 23: Verlagerung des Mittelpunktes des Rückenmarks im Spinalkanal bei Linksrotation gegenüber der Neutralstellung	45
Abb. 24: Rückenmarksdurchmesser in der Mittsagittalebene in Anteflexions-, Neutral- und Retroflexionsstellung der HWS	46
Abb. 25: Fläche des Rückenmarks in Neutralstellung und in Rotation	48
Abb. 26: Vergleich der prozentualen Verteilung der Rotationswinkel der Halswirbel und des Rückenmarks in den einzelnen Halswirbelsäulensegmenten in Linksrotation	50
Abb. 26: Einengung des Rückenmarks im <i>Atlanto-axial</i> -Gelenk bei Linksrotation in Neutralstellung	57
Abb. 28: Einfluss der unterschiedlichen Verlagerung von Rückenmark und 2. Halswirbel auf den <i>Radix posterior</i> (4) des <i>Nervus spinalis</i> in Linksrotation gegenüber Neutralstellung	58

## 6 Quellenverzeichnis

- Ashburner, J., Friston, K.J., 2000. Voxel-Based Morphometry—The Methods. *NeuroImage* 11, 805–821.
- Bogduk, N., Mercer, S., 2000. Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics. *Clin. Biomech.* 15, 633–648.
- Carlson, G.D., Oliff, H.S., Gorden, C., Smith, J., Anderson, P.A., 2003. Cerebral spinal fluid pressure: effects of body position and lumbar subarachnoid drainage in a canine model. *Spine* 28, 119–122.
- Chiavassa, H., Sans, N., Galy-Fourcade, D., Jarlaud, T., Giobbini, K., Manelfe, C., Railhac, J., 2000. HASTE sequence and cine-MRI evaluation of the cervical spinal canal: evaluation in 11 healthy subjects. *J. Radiol.* 81, 611–617.
- Chugh, A.J., Gebhart, J.J., Eubanks, J.D., 2015. Predicting Postoperative C5 Palsy Using Preoperative Spinal Cord Rotation. *Orthopedics* 38, 830–835.
- Dohn, P., Vialle, R., Thévenin-Lemoine, C., Balu, M., Lenoir, T., Abelin, K., 2009. Assessing the rotation of the spinal cord in idiopathic scoliosis: a preliminary report of MRI feasibility. *Childs Nerv. Syst. ChNS Off. J. Int. Soc. Pediatr. Neurosurg.* 25, 479–483.
- Dumas, J.L., Thoreux, P., Attali, P., Goldlust, D., Chevrel, J.P., 1994. Three-dimensional CT analysis of atlantoaxial rotation: results in the normal subject. *Surg. Radiol. Anat. SRA* 16, 199–204.
- Dvorak, J., Hayek, J., Zehnder, R., 1987. CT-functional diagnostics of the rotatory instability of the upper cervical spine. Part 2. An evaluation on healthy adults and patients with suspected instability. *Spine* 12, 726–731.
- Eichberger, A., Darok, M., Steffan, H., Leinzinger, P.E., Boström, O., Svensson, M.Y., 2000. Pressure measurements in the spinal canal of post-mortem human subjects during rear-end impact and correlation of results to the neck injury criterion. *Accid. Anal. Prev.* 32, 251–260.
- Eskander, M.S., Balsis, S.M., Balinger, C., Howard, C.M., Lewing, N.W., Eskander, J.P., Aubin, M.E., Lange, J., Eck, J., Connolly, P.J., Jenis, L.G., 2012. The association between preoperative spinal cord rotation and postoperative C5 nerve palsy. *J. Bone Joint Surg. Am.* 94, 1605–1609.
- Forsting, M., Jansen, O., 2014. , in: *MRT des Zentralnervensystems*. Georg Thieme Verlag, S. 93.
- Frobin, W., Leivseth, G., Biggemann, M., Brinckmann, P., 2002. Sagittal plane segmental motion of the cervical spine. A new precision measurement protocol and normal motion data of healthy adults. *Clin. Biomech.* 17, 21–31.
- Ghatan, S., Ellenbogen, R.G., 2002. Pediatric spine and spinal cord injury after inflicted trauma. *Neurosurg. Clin. N. Am.* 13, 227–233.
- Gürer, B., Canbay, S., Bozkurt, M., Cikla, U., Hananya, T., Okut, H., Başkaya, M.K., 2014. Microsurgical anatomy of the denticulate ligaments and their relationship with the axilla of the spinal nerve roots. *Clin. Anat. N. Y. N* 27, 733–737.
- Harrison, D.E., Harrison, D.D., Cailliet, R., Troyanovich, S.J., Janik, T.J., Holland, B., 2000. Cobb method or Harrison posterior tangent method: which to choose for lateral cervical radiographic analysis. *Spine* 25, 2072–2078.

- Hsu, W.-H., Benzel, E.C., Chen, T.-Y., Chen, Y.-L., 2008. Axial and coronal orientation of subaxial cervical zygapophysial joints and their effect on axial rotation and lateral bending. *Spine* 33, 2409–2414.
- Hüter-Becker, A., Dölken, M., Klein, D., Laube, W., 2011. , in: *Biomechanik, Bewegungslehre, Leistungsphysiologie, Trainingslehre*. Georg Thieme Verlag, 114–116.
- Ishii, T., Mukai, Y., Hosono, N., Sakaura, H., Fujii, R., Nakajima, Y., Tamura, S., Sugamoto, K., Yoshikawa, H., 2004a. Kinematics of the subaxial cervical spine in rotation in vivo three-dimensional analysis. *Spine* 29, 2826–2831.
- Ishii, T., Mukai, Y., Hosono, N., Sakaura, H., Nakajima, Y., Sato, Y., Sugamoto, K., Yoshikawa, H., 2004b. Kinematics of the upper cervical spine in rotation: in vivo three-dimensional analysis. *Spine* 29, 139–144.
- Karhu, J.O., Parkkola, R.K., Komu, M.E., Kormanen, M.J., Koskinen, S.K., 1999. Kinematic magnetic resonance imaging of the upper cervical spine using a novel positioning device. *Spine* 21, 2046–2056.
- Kouwenhoven, J.-W.M., Bartels, L.W., Vincken, K.L., Viergever, M.A., Verbout, A.J., Delhaas, T., Castelein, R.M., 2007. The relation between organ anatomy and pre-existent vertebral rotation in the normal spine: magnetic resonance imaging study in humans with situs inversus totalis. *Spine* 32, 1123–1128.
- Kuwazawa, Y., Bashir, W., Pope, M.H., Takahashi, K., Smith, F.W., 2006a. Biomechanical aspects of the cervical cord: effects of postural changes in healthy volunteers using positional magnetic resonance imaging. *J. Spinal Disord. Tech.* 19, 348–352.
- Kuwazawa, Y., Pope, M.H., Bashir, W., Takahashi, K., Smith, F.W., 2006b. The length of the cervical cord: effects of postural changes in healthy volunteers using positional magnetic resonance imaging. *Spine* 31, 579–583.
- Lang, J., Emminger, A., 1963. Über die Textur des Ligamentum denticulatum und der Pia mater spinalis. *Z. Für Anat. Entwicklungsgeschichte* 123, 505–522.
- Leivseth, G., Kolstad, F., Nygaard, Ø.P., Zoega, B., Frobin, W., Brinckmann, P., 2006. Comparing precision of distortion-compensated and stereophotogrammetric Roentgen analysis when monitoring fusion in the cervical spine. *Eur. Spine J.* 15, 774–779.
- Loughenbury, P.R., Wadhwani, S., Soames, R.W., 2006. The posterior longitudinal ligament and peridural (epidural) membrane. *Clin. Anat. N. Y. N* 19, 487–492.
- Maruta, T., Minami, S., Kitahara, H., Isobe, K., Otsuka, Y., Nakata, Y., Moriya, H., 2004. Rotation of the spinal cord in idiopathic scoliosis. *J. Bone Joint Surg. Br.* 86, 220–224.
- Molnár, S., Manó, S., Kiss, L., Csernátóny, Z., 2006. Ex vivo and in vitro determination of the axial rotational axis of the human thoracic spine. *Spine* 31, 984–991.
- Mönckeberg, J.E., Tomé, C.V., Matías, A., Alonso, A., Vásquez, J., Zubieta, J.L., 2009. CT scan study of atlantoaxial rotatory mobility in asymptomatic adult subjects: a basis for better understanding C1-C2 rotatory fixation and sublaxation. *Spine* 34, 1292–1295.
- Muhle, C., Wiskirchen, J., Brinkmann, G., Falliner, A., Weinert, D., Reuter, M., Heller, M., 1995. Kinematische MRT bei degenerativen

- Halswirbelsäulenveränderungen. *RöFo - Fortschritte Auf Dem Geb. Röntgenstrahlen Bildgeb. Verfahr.* 163, 148–154.
- Muhle, C., Wiskirchen, J., Weinert, D., Falliner, A., Wesner, F., Brinkmann, G., Heller, M., 1998. Biomechanical aspects of the subarachnoid space and cervical cord in healthy individuals examined with kinematic magnetic resonance imaging. *Spine* 23, 556–567.
- Netter, F.H., 2000. , in: *Atlas der Anatomie des Menschen*. Thieme, Stuttgart [u.a.], S. 109.
- Okada, Y., Ikata, T., Katoh, S., Yamada, H., 1994. Morphologic analysis of the cervical spinal cord, dural tube, and spinal canal by magnetic resonance imaging in normal adults and patients with cervical spondylotic myelopathy. *Spine* 19, 2331–2335.
- Papula, L., 2014. , in: *Mathematische Formelsammlung: Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag, S. 33.
- Penning, L., Wilmlink, J.T., 1987. Rotation of the cervical spine. A CT study in normal subjects. *Spine* 12, 732–738.
- Polak, K., Czyż, M., Ścigała, K., Jarmundowicz, W., Będziński, R., 2014. Biomechanical characteristics of the porcine denticulate ligament in different vertebral levels of the cervical spine—Preliminary results of an experimental study. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 34, 165–170.
- Puglisi, F., Strimpakos, N., Papathanasiou, M., Kapreli, E., Bonelli, A., Sgambetterra, S., Ferrari, R., 2007. Cervical spine segmental vertebral motion in healthy volunteers feigning restriction of neck flexion and extension. *Int. J. Legal Med.* 121, 337–340.
- Putz, R., Pabst, R., 2006. , in: *Atlas der Anatomie des Menschen, Bd.2 : Rumpf, Eingeweide, untere Extremität*. Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH, München u.a., S. 19, Abb. 778.
- Reesink, E.M., Wilmlink, J.T., Kingma, H., Lataster, L.M.A., van Mameren, H., 2001. The internal vertebral venous plexus prevents compression of the dural sac during atlanto-axial rotation. *Neuroradiology* 43, 851–858.
- Reitman, C.A., Mauro, K.M., Nguyen, L., Ziegler, J.M., Hipp, J.A., 2004. Intervertebral motion between flexion and extension in asymptomatic individuals. *Spine* 29, 2832–2843.
- Salem, W., Lenders, C., Mathieu, J., Hermanus, N., Klein, P., 2013. In vivo three-dimensional kinematics of the cervical spine during maximal axial rotation. *Man. Ther.* 18, 339–344.
- Schiebler, T.H., 2004a. , in: *Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie*. Springer, S. 177.
- Schiebler, T.H., 2004b. , in: *Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie*. Springer, 193–199.
- Schiebler, T.H., 2004c. , in: *Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie*. Springer, 819–820.

- Schiebler, T.H., 2004d. , in: Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie. Springer, S. 819, Abb. 10.73.
- Shi, B., Zheng, X., Min, S., Zhou, Z., Ding, Z., Jin, A., 2014. The morphology and clinical significance of the dorsal meningovertebra ligaments in the cervical epidural space. *Spine J. Off. J. North Am. Spine Soc.* 14, 2733–2739.
- Takasaki, H., Hall, T., Oshiro, S., Kaneko, S., Ikemoto, Y., Jull, G., 2011. Normal kinematics of the upper cervical spine during the Flexion–Rotation Test – In vivo measurements using magnetic resonance imaging. *Man. Ther.* 16, 167–171.
- Takeshima, T., Omokawa, S., Takaoka, T., Araki, M., Ueda, Y., Takakura, Y., 2002. Sagittal alignment of cervical flexion and extension: lateral radiographic analysis. *Spine* 27, 348–355.
- Tucker, S.K., Taylor, B.A., 1998. Spinal canal capacity in simulated displacements of the atlantoaxial segment: a skeletal study. *J. Bone Joint Surg. Br.* 80, 1073–1078.
- Wadhvani, S., Loughenbury, P., Soames, R., 2004. The anterior dural (Hofmann) ligaments. *Spine* 29, 623–627.
- Xu-hui, Z., Jia-hu, F., Lian-shun, J., Zhi-yong, C., Yong, Z., Xiong-sheng, C., Wei-ping, W., 2009. Clinical significance of cervical vertebral flexion and extension spatial alignment changes. *Spine* 34, 21–26.
- Yuan, Q., Dougherty, L., Margulies, S.S., 1998. In vivo human cervical spinal cord deformation and displacement in flexion. *Spine* 23, 1677–1683.
- Zhang, L., Zeitoun, D., Rangel, A., Lazennec, J.Y., Catonné, Y., Pascal-Moussellard, H., 2011. Preoperative evaluation of the cervical spondylotic myelopathy with flexion-extension magnetic resonance imaging: about a prospective study of fifty patients. *Spine* 36, 1134–1139.

## Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere an Eides statt, dass die Dissertation selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erstellt worden ist und die hier vorgelegte Dissertation nicht von einer anderen medizinischen Fakultät abgelehnt worden ist.

Ludwig Klasen