

# **Auswirkungen unterschiedlicher MRT-Sequenzen auf die manuelle Größenbestimmung von Bandscheiben**

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
des Fachbereichs Medizin  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Caroline Pohl  
aus Siegen

Gießen, 2013

Aus der Abteilung Neuroradiologie  
der Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH  
Standort Gießen  
Leiterin: Prof. Dr. med. Elke R. Gizewski

Gutachter: Frau Prof. Dr. Gizewski  
Gutachter: Herr Prof. Dr. Uhl  
Tag der Disputation: 10. November 2014

Gewidmet  
meinem Mann Daniel und meinen Eltern

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung der Arbeit	2
1.2	Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext	3
1.2.1	Übersicht von Verfahren zur Bestimmung von Körpergröße und Bandscheibenhöhe	3
1.2.2	Automatische Bildsegmentierung und Ausmessung von Bandscheiben	6
1.2.3	Grundlagen des Aufbaus der menschlichen Wirbelsäule	9
1.2.4	Anatomie der Bandscheiben	11
1.2.5	Histologie der Bandscheiben	12
<b>2</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>13</b>
2.1	Humanbeispieldatensätze	13
2.1.1	MR- Tomographische Messungen der menschlichen Wirbelsäulen	14
2.2	Messung der Schweinewirbelsäule als Phantom	15
2.2.1	MR-Tomographische Messung der Schweinewirbelsäule	16
2.2.2	Messung der Schweinewirbelsäule im Volumen Computer Tomographen	17
2.3	Technische Angaben zur genutzten Bildgebung	17
2.3.1	Technische Angaben zum genutzten MR-Tomographen	17
2.3.2	Technische Angaben zum genutztem VCT	18
2.4	Vorbereitung der Bilddaten	19
2.5	Vermessung der Bandscheiben	22
2.6	Verwendete statistische Tests	27
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>29</b>
3.1	Ergebnisse der Messungen des männlichen Probanden	31
3.1.1	Vergleich der Sequenzen	31
3.1.1.1	Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM	32
3.1.1.2	Vergleich der Sequenzen T1 und T2	32
3.1.1.3	Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM	32
3.1.2	Vergleich der morgendlichen und abendlichen Messungen der Daten des männlichen Probanden	39
3.1.3	Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen	44
3.2	Ergebnisse der Messungen des weiblichen Probanden	46
3.2.1	Vergleich der Sequenzen	46
3.2.1.1	Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM	46
3.2.1.2	Vergleich der Sequenzen T2 und T1	46
3.2.1.3	Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM	46
3.2.2	Vergleich der morgendlichen und abendlichen Messungen der Daten des weiblichen Probanden	53
3.2.3	Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen	58

<b>3.3</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse der humanen Datensätze</b>	<b>60</b>
3.3.1	Vergleich der Messungen der Sequenzen T1 und TIRM	60
3.3.2	Vergleich der Messungen der Sequenzen T2 und T1	60
3.3.3	Vergleich der Messungen der Sequenzen T2 und TIRM	60
3.3.4	Vergleich der Daten der morgendlichen und abendlichen Messungen.	60
<b>3.4</b>	<b>Ergebnisse der Messungen der Schweinewirbelsäule</b>	<b>61</b>
3.4.1	Vergleich der MRT-Sequenzen	61
3.4.2	Vergleich der MRT-Sequenzen mit den Aufnahmen des VCTs	63
3.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Schweinewirbelsäule	64
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>64</b>
4.1	Diskussion von Versuchsablauf und Messmethoden	64
4.2	Diskussion der statistischen Auswertung	66
4.3	Diskussion der Ergebnisse der humanen Datensätze	67
4.3.1	Vergleich der Sequenzen	67
4.3.2	Vergleich der Daten der morgendlichen und abendlichen Messungen.	67
4.4	Diskussion der Ergebnisse der Schweinewirbelsäule	70
4.5	Ausblick	72
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>Summary</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>76</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>85</b>
<b>11</b>	<b>Ehrenwörtliche Erklärung</b>	<b>86</b>
<b>12</b>	<b>Danksagung</b>	<b>87</b>

## 1 Einleitung

Rückenschmerzen sind ein großes und häufiges gesundheitliches Problem. So erfahren nach Rubin (Rubin, 2007) geschätzte 15% bis 20% der Erwachsenen Rückenschmerzen während eines Jahres und 50% bis 80% zumindest eine Episode mit Rückenschmerzen während der Lebenszeit. Schmidt und Mitarbeiter (Schmidt et al., 2007) führten eine Studie in Deutschland durch, bei der 9263 Personen zum Vorliegen von Rückenschmerzen befragt wurden, hier gaben 37,1% an zum Zeitpunkt der Befragung Rückenschmerzen zu haben, die ein Jahres Prävalenz lag bei 76% und die Lebenszeitprävalenz bei 85,5%. Koes et al. (Koes et al., 2006) berichten von einer Lebenszeitprävalenz zwischen 49-70% und einer Punktprävalenz von 12-30% in den westlichen Ländern. Bestehen die Rückenschmerzen länger oder nehmen sie an Intensität zu, wird oft mittels Magnet-Resonanz-Tomographischer (MRT) Bildgebung nach den Ursachen gesucht. Die MRT Bildgebung ist dabei die Bildgebung der Wahl, um alle klinischen Fragestellungen bezüglich Wirbelsäulenerkrankungen, wie Degeneration, Knochenerkrankungen, Rückenmarksverletzungen und Infektionen, Wirbelkörperumore, vaskuläre Malformationen und Traumata der Wirbelsäule zu diagnostizieren (Meindl et al., 2009). Desweiteren ist die Bildgebung mittels MRT ohne ionisierende Strahlenbelastung, nicht invasiv, beliebig oft durchführbar (Urban und Winlove, 2007) und hat einen guten Weichteilkontrast. Allerdings findet man bei etwa 90% aller Patienten mit tiefsitzenden Rückenschmerzen keine spezifische Pathologie, meist verschwinden die Beschwerden innerhalb von wenigen Wochen (Koes et al., 2006).

Eine Ursache für Rückenschmerzen können degenerativ veränderte Bandscheiben darstellen, die sich in der MRT Bildgebung zunächst als höhengemindert und mit einem Signalverlust in einer T2-gewichteten Sequenz einhergehend darstellen, da sich ihre Fähigkeit sich zu hydrieren mit fortschreitender Degeneration vermindert (Urban und Winlove, 2007), auch können Teile der (degenerierten) Bandscheibe in den Spinalkanal prolabieren bzw. vorfallen und zu neurologischen Ausfallerscheinungen führen. Andererseits finden sich aber auch viele Personen ohne Beschwerden, die dennoch in

zufälligen Untersuchungen degenerative Veränderungen aufweisen (Koes et al., 2006; Modic und Jeffery, 2007).

Es gibt unterschiedliche Ansichten, ob eine Höhenminderung der Bandscheiben zu Rückenschmerzen führt. Dabbs (Dabbs, 1990) gelangte in seiner durchgeführten Studie zur Korrelation von Rückenschmerzen und Höhenminderung der Bandscheiben zu dem Ergebnis, dass keine Korrelation besteht.

Videmann und seine Mitarbeiter hingegen (Videmann et al., 2003) kommen zu dem Schluss, dass die Höhenminderung von Bandscheiben zu Rückenschmerzen führen kann, bzw. mit tiefsitzendem Rückenschmerz einhergeht. Er gibt weitere Quellen an, die zu diesem Ergebnis kommen.

## **1.1 Zielsetzung der Arbeit**

Vermeehrt werden Wirbelsäulen bzw. Bandscheiben Software gestützt segmentiert und vermessen, um neue Erkenntnisse zu gewinnen oder die Diagnostik von Wirbelsäulenerkrankungen zu vereinfachen oder computergestützt und automatisiert die Reproduzierbarkeit bei Datenauswertungen durch die Verwendung von genau definierten Algorithmen zu erhöhen. Computergestützte Bildauswertungen sind kostengünstig zu realisieren und sollen den befundenden Arzt unterstützen. Mit der hier vorliegenden Studie wurden Landmarken zur manuellen Ausmessung und damit Daten der Morphologie der Bandscheiben definiert, die zur Entwicklung einer weiteren Software zur Bildverarbeitung genutzt werden sollen. Zur Entwicklung von Algorithmen sind manuelle Vermessungen eine Voraussetzung, um die Qualität der Software und notwendig auftretende Auswertungsfehler beurteilen zu können. Diese Software soll die Bilddaten von in der Routine aufgenommenen MRT-Bildern auswerten. Eigene Software soll in der Abteilung Neuroradiologie entwickelt werden, da es noch keine wirklich zufrieden stellenden Computerprogramme zu dieser Thematik gibt.

Ferner wurde in dieser Arbeit die Auswirkung der benutzten Sequenzen auf die Größenbestimmungen der Bandscheiben untersucht. Um Hinweise auf weitere Fehler auf Grund der gewählten Sequenz zu bekommen, wurde auch eine Schweinewirbelsäule als Phantom der MRT sowie der computer-tomographischen (CT) Bildgebung

unterzogen und diese Ergebnisse miteinander verglichen und in Beziehung gesetzt. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob es zu tageszeitlichen signifikanten Höhenunterschieden bei den Bandscheiben kommt, die eventuell die Diagnostik von Degenerationen an Hand der Höhenminderung einer Bandscheibe erschweren könnte. Dazu wurden an den drei Messtagen jeweils zwei MR-tomographische Messungen durchgeführt: morgens einige Stunden nach dem Aufstehen und abends nach einem „normalen“ Arbeitstag.

## **1.2 Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext**

### **1.2.1 Übersicht von Verfahren zur Bestimmung von Körpergröße und Bandscheibenhöhe**

Zu dem Verhalten von Bandscheiben während des Tagesverlaufs gibt es zahlreiche Studien, bei denen versucht wurde unter standardisierten Bedingungen, reproduzierbare Ergebnisse bezüglich der Zu- oder Abnahme der Größe der Bandscheibe zu erhalten.

In der Literatur finden sich *in vitro* Studien, bei denen das Verhalten von Kadaverbandscheiben auf externen Druck beobachtet wurden, jedoch sind diese Ergebnisse nur bedingt aussagekräftig bezüglich des Verhaltens von *in vivo* Bandscheiben: Botsford und seine Mitarbeiter (Botsford et al., 1994) zitieren hierfür eine Studie von Keller und Mitarbeitern (Keller et al., 1990), bei der sich *in vivo* und *in vitro* Bandscheiben in den physiologischen Eigenschaften unterscheiden.

Bei den *in vivo* Studien gibt es Studien, die indirekt über das Verhalten der Körpergröße, Aufschlüsse über das Verhalten von Bandscheiben geben sollten. Diskutiert wurde, ob die Abnahme der Körpergröße allein auf Veränderungen der Wirbelsäule bzw. der Bandscheiben beruht, oder ob auch Veränderungen an der unteren Extremität wie an Knie, Hüften, Knöchel oder Ferse (Lewis und Fowler, 2009) zu einer Veränderung der Körpergröße beitragen. McGill und Mitarbeiter (McGill et al., 1996) verglichen die Veränderung der Körpergröße im Sitzen und Liegen und beobachteten keinen signifikanten Unterschied, was zu der Aussage führte, dass Veränderungen der Körpergröße hauptsächlich auf Veränderungen der Bandscheiben beruhen.

Es wurden Versuchsaapparaturen entwickelt, die in einer aufrechten Körperposition eine möglichst exakte Reproduzierbarkeit der Messung der Körpergröße ermöglichen sollten. Da von extern wirkende Kräfte und eine Anspannung der Stammmuskulatur zu einer Verkleinerung der Körpergröße führen können (Althoff et al., 1992), wurde eine Versuchsaapparatur entwickelt, die die Muskelspannung verringern sollte. Eine solche

Versuchsapparatur entwickelten Eklund und Corlett 1984 (Eklund und Corlett, 1984), die z.B. in Studien von Althoff und seinen Mitarbeitern (Althoff et al., 1992), Tyrrell und Mitarbeitern (Tyrrell et al., 1984) und Reilly und Mitarbeitern (Reilly et al., 1984) ebenfalls in veränderter Form angewandt worden sind, um die Körpergröße im Tagesverlauf zu messen, bzw. Aussagen darüber zu erlangen, welchen Einfluss z.B. zusätzliche Schultergewichte auf die Körpergrößenabnahme haben und so indirekt auf das Verhalten der Bandscheiben schließen lassen. Die Arbeit von Krag und seinen Mitarbeitern (Krag et al., 1990) gibt eine detaillierte Auflistung von Studienergebnissen bezüglich der Veränderung der Körpergröße während des Tagesverlauf, so erwähnt er, dass bereits 1852 Bishop schriftlich notierte, dass die Körpergröße im Tagesverlauf um einen Zoll (2,54 Zentimeter) abnimmt. Krag und Mitarbeiter (Krag et al., 1990) und Eklund und Corlett (Eklund und Corlett, 1984) zitieren eine Studie von DePuky (DePuky, 1935), bei der 1216 Probanden zwischen 5 und 90 Jahren dreimalig während des Tagesverlaufes gemessen worden sind. Durchschnittlich wurde die Körpergröße um 15,7mm kleiner, der prozentuale Anteil der Körpergrößenabnahme korrelierte mit dem Lebensalter. Im Durchschnitt nahm die Körpergröße um 1% ab, bei Kindern um 2% und bei den 70-80 Jährigen um 0,5%. Fitzgerald (Fitzgerald, 1972, zitiert nach Krag et al., 1990) benutzte eine Versuchsapparatur mit der eine reproduktive Messung der Körpergröße möglich sein sollte. Die Standardabweichung wird mit 0,3mm oder weniger angegeben. Bei dieser Studie wurde von 8.30 bis 17.30 Uhr stündlich die Körpergröße bestimmt, die in dieser Studie um etwa 16mm abnahm. Reilly und seine Mitarbeiter (Reilly et al., 1984) versuchten die Änderung der Körpergröße mittels einer Versuchsvorrichtung, bei der die Muskelspannung auf ein Minimum beschränkt sein sollte und es möglich war eine möglichst standardisierte und reproduzierte Position der Probanden zu erreichen, zu messen. Hier wurden 10 Messungen über 24 Stunden hinweg durchgeführt, bei denen die Probanden 7,5 Stunden eine liegende Position eingenommen haben. Ein circadianer Rhythmus wurde beschrieben, bei dem der Größenverlust des Probanden durchschnittlich 19,3 mm betrug, dies entsprach etwa 1,1% der Gesamtkörpergröße. Ähnlich Ergebnisse bezüglich des durchschnittlichen Größenverlusts von 19,3mm fanden auch Tyrrell und seine Mitarbeiter. (Tyrrell et al., 1985), die ihre Ergebnisse als passend zu den Ergebnissen von De Puky (De Puky, 1935) und Krämer (Krämer, 1981) beschreiben.

Auch Roberts et al. geben in einer Studie (Roberts et al., 1998) eine Körpergrößenzunahme über Nacht von im Durchschnitt 19,3 mm an (8 bis 23mm), was einer prozentualen Körpergrößenzunahme von 1,17% mit einer Standardabweichung von 0,34% entspricht.

Krag und Mitarbeiter (Krag et al., 1990) beschreiben eine durchschnittliche Körpergrößenänderung von 16,39mm mit einer scheinbar extrem genauen Messmethodik mit einer Standardabweichung von 4,67mm nach einer achtstündigen sitzenden oder stehenden Tätigkeit. Dazu ließen sie 10 Probanden, nachdem sie 8 bis 10 Stunden lagen, eine sitzende oder stehende Tätigkeit nachgehen und bestimmten die Körpergröße in bestimmten Intervallen. Die Körpergröße nahm um 0,9% ab.

Auch erfolgte die Vermessungen von Bandscheiben anhand Bildmaterials von Röntgenbildern, CT-Aufnahmen und MRT-Aufnahmen der Wirbelsäule. Dabei wurden die Aufnahmen mittels Computertomographen und MR-Tomographie in einer liegenden Position der Probanden aufgenommen. Dabbs (Dabbs, 1990) entwickelte eine Methode um die Bandscheibengröße von lateral aufgenommenen Röntgenaufnahmen der menschlichen Wirbelsäule manuell auszumessen. Dabbs definierte die anteriore Höhe als Strecke zwischen der am weitesten vorne unteren gelegenen Ecke des oberen Wirbelkörpers und der am weitesten vorne oben gelegene Ecke des unteren Wirbelkörpers am Wirbelkörpervorderrand. Die posteriore Höhe wird analog hierzu am Wirbelkörperhinterrand bestimmt. Als Bandscheibenhöhe definierte Dabbs das Ergebnis aus (anteriore Höhe + posteriore Höhe) / 2. Dabbs beschreibt in seiner Arbeit noch Verfahren anderer Autoren, mit denen die Höhe der Bandscheiben manuell anhand von lateralen Röntgenaufnahmen ausgemessen werden kann.

Frobin und Mitarbeiter (Frobin et al., 2001) beschreiben Fehlerquellen bei der Bestimmung der Bandscheibenhöhe anhand von lateral angefertigten Röntgenbildern der menschlichen Wirbelsäule. Messungenauigkeiten treten durch Distorsion in der zentralen Projektion, nicht mittig zentrierte Ausrichtung, axiale Rotation und durch eine laterale Neigung der Wirbelsäule auf.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren, das eine Ausmessung von Bandscheiben unabhängig der oben genannten Fehlerquellen und unabhängig der Flexion der Wirbelsäule ermöglichen soll. Dieses Verfahren einer „Distorsions korrigierten Röntgen Analyse“ (im Englischen Original „Distorsion-Compensated Roentgen Analysis“, DCRA) wird als eine Weiterentwicklung einer Methode von Farfan, bei der die

anteriore und posteriore Höhe der Bandscheibe als ein Quotient zum Bandscheibendurchmesser angegeben wird (Dabbs, 1990), beschrieben.

Bei DCRA werden durch einen Computer-Algorithmus Landmarken definiert, die in einer lateralen Aufnahme immer sichtbar sind. Die anteriore Höhe der Bandscheibe wird rechtwinklig zu einer durch Software berechneten Geraden vermessen. Diese gewonnenen Daten werden, um eine projektionsbedingte Bildvergrößerung - bedingt durch radiologische Aufnahmen und Variationen der Körperstatur - zu kompensieren, durch die mittlere Tiefe des kranial gelegenen Wirbelkörpers geteilt. Dieser Quotient variiert je nach Geschlecht und Alter. Zusätzlich variiert die anteriore Höhe je nach Ausprägung der Lordose. Zusätzliche Berechnungen ermöglichen eine Winkel unabhängige Bandscheibenhöhen Bestimmung. Frobin und Mitarbeiter (Frobin et al., 2001) geben an, dass der relative Fehler dieser Methode bei 4,15% liegt.

Um Veränderungen der Bandscheibenhöhe an MRT-Aufnahmen halbautomatisch auszumessen, entwickelten z.B. Boos und seine Mitarbeiter (Boos et al., 1996) die sogenannte „Centroid“-Methode, bei der manuell etwa 60 Punkte definiert werden, die den äußeren Rand des Wirbelkörpers bilden. Anhand derer wird mittels eines Computerprogramms der Schwerpunkt des Wirbelkörpers bestimmt. Die Veränderung der Bandscheibenhöhe wird angegeben, als Veränderung der Strecke zwischen den beiden benachbarten Schwerpunkten des darüber- und darunterliegenden Wirbelkörpers. Boos und Mitarbeiter (Boos et al., 1996) verglichen die Reproduzierbarkeit ihrer Methode mit der oben erwähnten Methode nach Dabbs, angewandt auf laterale MRT- Aufnahmen. Dabei wird die Standardabweichung mit 0.36mm für die „Centroid“-Methode angegeben und mit 0.7mm für die Methode nach Dabbs.

Lewis und Fowler (Lewis und Fowler, 2008) maßen die Höhe von Bandscheiben bei sagittal aufgenommenen MRT-Aufnahmen in ihrer Arbeit ebenfalls mit der Methode nach Dabbs und gaben eine mittlere Messabweichung von 0,4mm an – was bei einer Voxelkantenlänge von angegebenen 1,4mm schwer verständlich ist (angegebene Messfeldgröße (Englisch, „Field of View“, abgekürzt „FOV“) 35cm; Bildmatrix  $256^2$ ).

### **1.2.2 Automatische Bildsegmentierung und Ausmessung von Bandscheiben**

Es gibt zahlreiche Studien, die mittels verschiedener Algorithmen der angewandten Mathematik versuchen, eine automatische Erkennung und Ausmessung von

Bandscheiben zu ermöglichen. Dabei sind meist mehrere Schritte nötig, um die gewünschten Bildinformationen auswerten zu können. Zu Beginn werden die Bilder segmentiert, um das eigentlich relevante Objekt von seiner räumlichen Umgebung zu trennen (im hier untersuchten Fall, also die Bandscheibe).

Ziele der Segmentation innerhalb der medizinischen Anwendung sind nach Sharma und Aggarwal (Sharma und Aggarwal, 2010) und Pham und Mitarbeiter (Pham et al., 2000):

- Anatomische Strukturen abzugrenzen und isoliert zu studieren
- Die Identifizierung von Regionen von besonderen Interessen (Englisch, Region of Interest, ROI) wie z.B. Tumore, Läsionen, oder andere Anomalitäten
- Das Volumen von bestimmten Gewebe zu messen, z.B. das von Tumoren, auch um Therapieerfolge zu sehen
- Hilfe bei der Planung der Radiotherapie und der Kalkulation der Radiatiodosis (Sharma und Aggarwal, 2010)
- Computer unterstützte Operation (Pham et al., 2000)

Es gibt verschiedene Methoden um Bilder zu segmentieren, abhängig, welches Gewebe oder Region des Bildes segmentiert werden soll. Hier soll ein kurzer Einblick in ausgewählte Verfahren der Segmentation von Bildern gegeben werden:

- Schwelwertverfahren

Hierbei wird eine Schwellenwertbildung (Englisch, Thresholding) auf Basis eines Histogramms, was die Graustufen darstellt, durchgeführt. Man trägt dabei die Menge der schwarzen Pixel auf die eine Seite des Histogramms auf, die Menge der weißen Pixels auf der anderen Seite und alle Graustufen, die in der Bilddatei vorkommen, werden in dem Bereich dazwischen eingetragen. Je nachdem ob der Grauwert eines Pixels über oder unter einem bestimmten Schwellenwert liegt, ist er schwarz oder weiß (Wikipedia, 2013) und wird als zugehörig zum Objekt angesehen oder nicht. Optimal kann die Schwellenwertbildung angewandt werden, bei einem homogen grauen Objekt vor einem Hintergrund mit einem anderen Grauwert (Sharma und Aggarwal, 2010).

- Kantenbasierte Segmentation

Sie basiert auf Erkennung von Kanten, also Grenzen, die verschiedene Regionen voneinander trennen. Diese Grenzen oder Kanten zeichnen sich im Idealfall dadurch aus, dass Diskontinuitäten im Bild vorhanden sind, z.B. von Grauwertunterschieden, wenn zwei verschiedene Gewebe aneinander grenzen.

Ein Beispiel für eine Methode der kantenbasierten Segmentation ist der Watershed-Algorithmus. Hierbei wird die Graustufe jedes Pixels in einen Graph eingetragen und ein Graph konstruiert, indem jeder Punkt in Höhe des Grauwertes gezeichnet wird (Grah, 2011). So entsteht ein Bild, das einer topographischen Karte mit Tälern und Bergen ähnelt. Füllt man bildlich gesprochen Wasser in diese Täler, so verbindet die entstandene Wasserfläche alle Pixel eines bestimmten Grauwertes.

- Regionbasierte Segmentation

Bei der Regionbasierten Methode der Segmentation betrachtet man die Homogenität von Pixeln. Pixel, die ähnliche Grauwerte haben, werden als homogene Region zusammengefasst. Bei der regionbasierten Segmentation unterscheidet man nochmals mehrere Verfahren, die zur Anwendung kommen (Wikipedia, 2013, Sharma und Aggarwal, 2010).

Um Bilder zu segmentieren werden manchmal Bildinformationen aus verschiedenen Sequenzen kombiniert (Roberts et al., 1997; Bhole et al., 2009; Hoad und Martel, 2002). Bhole et al. (Bhole et al, 2009) verwendeten ein Zusammenfügen der Informationen, die aus den T1 und den T2 gewichteten Aufnahmen resultieren. Da, vereinfacht dargestellt, die T1 Wichtung Fettgewebe sensitiv darstellt und die T2 Wichtung Wasser, wird bei Zusammenfügen der Informationen die Regionen hervorgehoben oder betont, die einen hohen Wassergehalt und einen niedrigen Fettgehalt haben (Bhole et al., 2009), so konnte das Rückenmark, der Nucleus pulposus, Haut und andere Gewebe extrahiert werden und die so gewonnenen Bildinformationen weiterverwendet werden. Hoad und Martel (Hoad und Martel 2002) entwickelten eine vollautomatische Segmentierung der Wirbelsäule, basierend auf einer Kombination von mehreren Segmentierungsmethoden, zur Verwendung bei computer-assistierten Operationen, um Knochen von Weichteilgewebe zu trennen. Sie verwendeten T1-gewichtete Bilder mit

unterschiedlichen Echozeiten und kombinierten die damit gewonnenen Bildinformationen, sodass ein guter Kontrast zwischen Knochen und Weichteilgewebe erreicht wurde, um diese optimal zu segmentieren.

Roberts und seine Mitarbeiter (Roberts et al., 1997) definierten, dass die obere und untere Endplatte, sowie das vordere und hintere Längsband die Grenzen der jeweiligen Bandscheibe definieren sollten. Es wurden Eigenschaften von T2 gewichteten und von Protonendichte (PD)-gewichteten Aufnahmen kombiniert und mittels mathematischen Algorithmen konnten die Grenzen der Bandscheiben als signalarmer hypointenser Rand dargestellt werden und die Bandscheibe selbst, als signalreicher Kern. Über weitere Rechenschritte konnte eine völlig automatische Segmentation und Höhenbestimmung der maximalen zentralen Höhe der Bandscheibe erfolgen, wobei der Watershed-Algorithmus zur Anwendung kam.

### **1.2.3 Grundlagen des Aufbaus der menschlichen Wirbelsäule**

Dieser Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über die Anatomie der menschlichen Wirbelsäule. Hierbei sind anatomische Grundlagen aus den anatomischen Lehrbüchern „Schiebler-Anatomie 2005“ und „Benninghoff-Anatomie 2003“ zusammengefasst worden.

Die menschliche Wirbelsäule besteht aus 24 präsakralen Wirbeln. Von den 24 präsakralen Wirbeln gehören sieben zur Halswirbelsäule, die als *Vertebrae cervicales* bezeichnet werden (C1-C7), 12 Wirbel zur Brustwirbelsäule, auch *Vertebrae thoracicae* genannt (Th1-Th12) und fünf Wirbel zur Lendenwirbelsäule (*Vertebrae lumbales* L1-L5).

Zusätzlich wird das Kreuzbein (*Os Sacrum*), bestehend aus fünf miteinander verwachsenen *Vertebrae sacrales*, den Kreuzbeinwirbeln und die vier rudimentär angelegten Steißwirbel (*Vertebrae coccygeae*) zur Wirbelsäule gerechnet.

Die menschliche Wirbelsäule besitzt als charakteristische Eigenform eine doppelt S-förmige Krümmung in der Sagittalebene. Dabei bezeichnet man die Krümmung nach vorne im Bereich der Lendenwirbelsäule als Lendenlordose, die Gegenkrümmung der Brustwirbelsäule, als Brustkyphose. Die Halswirbelsäule weist wie die

Lendenwirbelsäule eine Krümmung nach vorne auf, was als Halslordose bezeichnet wird.

Der Wirbel selbst besteht aus dem Wirbelkörper, *Corpus vertebrae*, sowie dem Wirbelbogen, *Arcus vertebrae*, mit seinen verschiedenen Fortsätzen, den *Processi*. Das Rückenmark verläuft im Wirbelkörperkanal (*Canalis spinalis*), der von den dorsalen Rändern der Wirbelkörper und den Wirbelbögen gebildet wird. Die aus dem Rückenmark austretenden Spinalnerven durchtreten die Wirbelsäule durch die Zwischenwirbellöcher, den *Foramina intervertebralia*. Diese werden durch Aussparungen in den *Peduncularcus vertebrae* des darüber und darunter liegenden Wirbels gebildet. Bei den *Peduncularcus vertebrae* handelt es sich um einem Bereich des Wirbelbogens unmittelbar in Nähe des Wirbelkörpers.

Zusätzlich zu dem *Processus dorsalis*, dem Dornfortsatz, der sich am dorsalen Ende des Wirbelbogens befindet, weist der Wirbelbogen noch zwei Querfortsätze (*Processi transversi*) auf. Links und rechts neben dem Dornfortsatz, befinden sich die Gelenkfortsätze, die *Processi articularis superiores* und *inferiores*, die, wie der Name schon sagt, sich sowohl nach oben wie auch nach unten erstrecken. Auf diese Art sind zwei benachbarte Wirbel über vier Gelenke miteinander verbunden.

Es lassen sich Wirbelgruppen unterscheiden, da die Morphe der Wirbel der unterschiedlichen Belastung der Wirbelsäule angepasst sind.

So werden die Wirbelkörper von kranial nach kaudal massiver, da kaudal die Wirbelkörper eine höhere Last tragen müssen. Die Wirbelkörper der Halswirbelsäule haben eine eher rechteckige Form, die Wirbelkörper der Brustwirbelsäule sind eher dreieckig, die Wirbelkörper der Lendenwirbelsäule weisen eine bohnenförmige Form auf. Weitere Unterschiede bestehen zum Beispiel in der Ausrichtung der *Processi dorsales*, dem Vorhandensein von gelenkigen Verbindungen mit den Rippen im Bereich der Brustwirbelsäule, sowie der Form des Querschnitts des Wirbelkanals. Der erste und zweite Halswirbel weichen von der Grundform der Wirbel deutlich ab, da sie die Beweglichkeit des Kopfes in alle drei Freiheitsgrade ermöglichen müssen.

Jeder Wirbelkörper grenzt mit seiner Endplatte an eine Bandscheibe, wobei auch hier eine Ausnahme zwischen dem ersten und zweiten Halswirbel besteht. Diese Endplatte ist mit einer maximal 1mm dicken, hyalinen Knorpelplatte bedeckt, (Raj 2008; Bernick und Cailliet, 1982 zitiert nach Urban und Winlove, 2007) und von einer verdickten

knöchernen Randleiste, der Epiphysis anularis umgeben. Dabei werden die Bandscheibe und ihre angrenzenden Wirbelkörper als Bewegungssegment definiert.

#### **1.2.4 Anatomie der Bandscheiben**

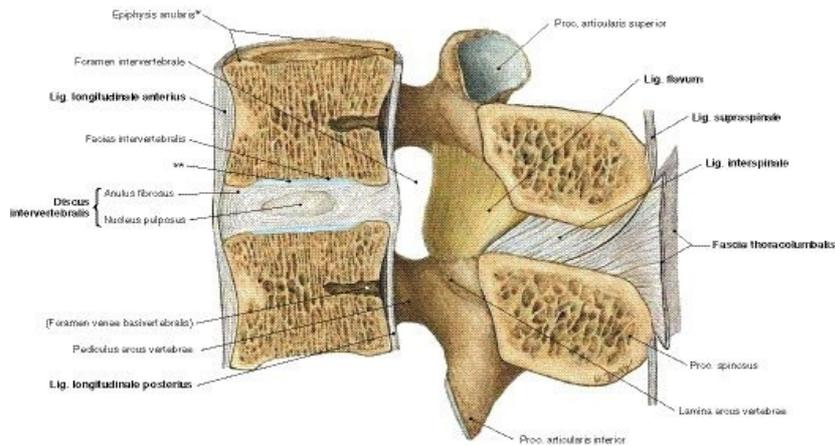
Die 23 Bandscheiben der menschlichen Wirbelsäule sind jeweils mit den Endplatten der benachbarten Wirbelkörper durch einstrahlende Kollagenfasern verwachsen (Raj, 2008) und machen, je nach Literaturangabe ca. 25 % (Benninghoff und Drenckhahn, 2003) bis ca. 33% (Raj, 2008) der Gesamtlänge der Wirbelsäule aus.

Sie bestehen aus einem Faserring (Anulus fibrosus), der den Nucleus pulposus, einem festen Gallertkern, umgibt. Ihre Hauptaufgabe ist es mechanische Belastungen gleichmäßig auf die benachbarten Endplatten zu verteilen und Bewegungen wie Flexion und Extension zu ermöglichen. Des Weiteren tragen sie zur normalen Krümmung der Wirbelsäule bei, da sie eine schwach keilförmige Form haben, sodass sie in der Hals- und Lendenwirbelsäule vorne höher als hinten sind. Bei der Brustwirbelsäule sind es die Wirbelkörper, die vorne etwas niedriger als hinten sind.

In Abhängigkeit von der Krümmung der Wirbelsäule verändert sich die Morphe der Bandscheiben, so werden die Bandscheiben auf der konkaven Seite niedriger und auf der konvexen Seite höher, sobald man sich beugt.

Eingeschränkt wird die Beweglichkeit der Wirbelsäule durch den angrenzenden Bandapparat. Dieser verbindet die einzelnen Wirbel untereinander. An Vorder- und Hinterkante der Wirbelkörper erstrecken sich die Längsbänder (Liggamenti longitudinale anterius et posterius), die ebenfalls mit den Bandscheiben verwachsen sind.

Abbildung 1 zeigt zur Verdeutlichung der Anatomie einen sagittalen Schnitt durch ein lumbales Bewegungssegment.



**Abbildung 1: Lumbales Bewegungssegment, Medianschnitt aus Paulsen und Waschke 2010, Atlas der Anatomie des Menschen Sobotta, 23. Auflage, mit freundlicher Genehmigung des Elsevier GmbH, Urban & Fischer Verlages.**

### 1.2.5 Histologie der Bandscheiben

Der Nucleus pulposus einer Bandscheibe besteht aus Kollagenfibrillen, sowie elastischen Fasern, die in einer Matrix aus dem Proteoglycan Aggretan eingebettet sind (Raj, 2008).

Auch der Anulus fibrosus besteht aus Kollagenfasern (Typ I und II) und elastischen Fasern, jedoch sind hier die Kollagenfasern parallel in konzentrischen Lamellen angeordnet. Der Verlauf der Kollagenfasern wechselt von Lamelle zu Lamelle (Raj, 2008). Die vom Anulus ausgehenden Kollagenfasern inserieren an dem hyalinen Knorpel der Endplatte der angrenzenden Wirbelkörper (Inoue, 1981; Ray, 2008), sowie an die anliegenden Längsbänder (Raj, 2008; Benninghoff und Drenckhahn, 2003).

Das in der Extrazellulärmatrix vorliegende Proteoglycan Aggretan ist zusammen mit den Kollagenfasern und den elastischen Fasern für die mechanischen Eigenschaften der Bandscheiben verantwortlich. Die Kollagenfasern geben den Disci die nötige Stabilität und verankern sie mit den Endplatten (Raj, 2008; Benninghoff und Drenckhahn, 2003), während das Aggretan für die Druckeigenschaften der Bandscheiben verantwortlich ist. Zum einen, da es mit seinen negativ geladenen Glykosaminoglykanen Wasser anzieht und bindet (Lüllmann-Rauch, 2006; Adams und Roughley, 2006) womit dem hydrostatischen Druck, der auf die Bandscheiben wirkt und Flüssigkeit aus diesen herausdrückt (Karakida et al, 2003), mittels osmotischem Druck entgegengewirkt wird (Raj, 2008). Zum anderen können sich die negativ geladenen Glykosaminoglykane durch die umliegenden Kollagenfasern weder ausdehnen noch abstoßen, wodurch die Bandscheibe der Druckbelastung nur wenig nachgeben kann und wieder in ihre Form zurückfedert (Lüllmann-Rauch, 2006). Diverse Studien (u.a. Karakida et al., 2003;

Roberts et al., 1998; Malko et al., 1996) beschreiben, dass die Höhenveränderung von den Bandscheiben auf dem Herauspressen von Flüssigkeit durch den auf den Bandscheiben wirkenden Druck bedingt ist, bzw. auf das Einströmen von Flüssigkeit in die Bandscheiben, wenn eine Position eingenommen wird bei der der Druck auf die Bandscheiben weggenommen wird.

Der Proteoglycangehalt und somit der Wassergehalt des Nucleus pulposi ist mit etwa 80% bei jungen Erwachsenen (Antoniou et al., 1996; zitiert nach Urban und Winlove, 2007) höher als der in dem Anulus (etwa 65% Wassergehalt, Antoniou et al., 1996; zitiert nach Urban und Winlove, 2007), wobei der Anulus einen höheren Gehalt an Kollagenfasern aufweist (Raj, 2008).

Im Alter sinkt jedoch der Gehalt von Proteoglykanen der Bandscheiben (Johnstone und Bayliss, 1995), Karakida und seine Mitarbeiter (Karakida et al., 2003) beobachteten diesen Sachverhalt mittels T2- gewichteten MRT-Aufnahmen und beschreiben, dass es zu einer Reduktion des T2-Signals kommt, bei zunehmendem Alter der Probanden und zunehmender Degeneration, da die Bandscheiben im Alter nicht mehr so viel Flüssigkeit aufnehmen können. Auch Benneker und seine Mitarbeiter (Benneker et al., 2003) beschreiben diesen Zusammenhang und nennen die Signaländerung der T2 Wichtung als am sensitivsten um hochgradig degenerativ veränderte Bandscheiben zu erkennen.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Humanbeispieldatensätze**

Ein männlicher und ein weiblicher Proband wurden als Versuchspersonen in dieser Studie eingesetzt. Beide wurden nach den Vorgaben der Ethikkommission in einem Aufklärungsgespräch über mögliche Nebenwirkungen der geplanten Untersuchungen aufgeklärt. Die schriftliche Einverständniserklärung der Probanden liegt vor.

Bevor die Studie „Bestimmung geometrischer Parameter der menschlichen Wirbelsäule“ begonnen wurde, wurde die Studie durch die Ethikkommission der Universität Gießen, am 03. Mai 2011 genehmigt.

### 2.1.1 MR- Tomographische Messungen der menschlichen Wirbelsäulen

Zur Durchführung der Studie wurden an drei aufeinanderfolgenden Tagen (Tag 1, Tag 2, Tag 3) MRT-Aufnahmen mit mehreren, jeweils identischen, Sequenzen der gesamten Wirbelsäule von einem männlichen Proband (24 Jahre, 1,86m, 70kg) und einem weiblichen Probanden (25 Jahre, 1,69m, 60kg) angefertigt. Nach einer Nachtruhe von etwa 5 Stunden erreichten die Probanden das MRT zur morgendlichen Messung zwischen 7 und 11 Uhr, innerhalb von maximal 2 Stunden nach dem Aufstehen. Bis zur abendlichen Messung, die zwischen 20 und 23 Uhr erfolgte, gingen die Probanden einer leichten, meist sitzenden Tätigkeit nach.

Die Lagerung der Probanden auf der Patientenliege des MRT erfolgte gemäß den routinemäßigen Standards für Wirbelsäulenaufnahmen des Universitätsklinikum Gießen. Dabei befanden sich die Probanden in Rückenlage und wurden mit dem Kopf zuerst in den MR-Tomographen gefahren. Wie in der Klinikroutine üblich, wurde es den Probanden ermöglicht, je nach bevorzugter Liegeposition mit einem Kniekeil gelagert zu werden. Durch diesen kann bei manchen Patienten bzw. Probanden ein erhöhter Liegekomfort erreicht werden, da die nicht völlig flache Liegeposition häufig als sehr angenehm empfunden wird.

Während der männliche Proband auf einen Kniekeil verzichtete, entschied sich der weibliche Proband für einen 15cm hohen Kniekeil während der gesamten Messzeit. Bei dem männlichen Proband wurde die Bildgebung jeweils nach ca. 37 Minuten für ca. eine Stunde unterbrochen, in der der Proband eine sitzende Körperhaltung einnahm, da das stille Liegen von etwa 1 Stunde 20 Minuten nicht am Stück bewältigt werden konnte und man einer eventuell auftretenden „Relaxierung“ der Bandscheiben durch den fehlenden hydrostatischen Druck entgegenwirken wollte. Die Messzeit betrug bei dem weiblichen Probanden mit Planung der Bilder ca. 50 Minuten. Die Untersuchungen wurden unterbrechungsfrei durchgeführt. Die Probanden wurden aufgefordert während den Messungen still zu liegen und sich nicht zu bewegen.

Zur Planung der MRT-Aufnahmen wurde der Mittelpunkt der verwendeten Halsspule zentriert. Dabei wird der Messtisch mit liegenden Probanden, mittels eines „Laserfadekreuzes“, welches sich auf den Probanden projiziert, ausgerichtet, und zwar so, dass das Fadenkreuz im Mittelpunkt der Halsspule erscheint.

Die Planung erfolgte mittels sagittalen und coronaren Localizer von der Halswirbelsäule (HWS), Brustwirbelsäule (BWS) und Lendenwirbelsäule (LWS), mittels derer das Messfeld (FOV) so eingerichtet wurde, dass sich die Wirbelkörper vollständig abbilden ließen. Damit diese in sagittaler Richtung nicht schräg angeschnitten wurden, wurde das FOV parallel zur Wirbelsäule ausgerichtet.

Bedingt durch die Körpergröße des männlichen Probanden mussten zur Abbildung der gesamten Wirbelsäule drei Schichtpakete (HWS, BWS, LWS) der männlichen Wirbelsäule angefertigt werden, bei dem weiblichen Probanden wurden nur zwei Schichtpakete (HWS und BWS gemeinsam, LWS) benötigt. Die erhöhte benötigte Anzahl der Schichtpakete des männlichen Probanden erklärt auch, warum die Messzeit des männlichen Probanden deutlich über der Messzeit des weiblichen Probanden lag.

Bei dem männlichen Probanden wurden die Aufnahmen mit 17 Schichten gefahren, eine Ausnahme bestand bei der morgendlichen Messung des ersten Tages, dort wurden die Aufnahmen mit 15 Schichten erstellt. Bei dem weiblichen Probanden wurden die Aufnahmen bei allen sechs Messungen mit 15 Schichten erstellt.

Weitere Angaben zu den verwendeten Messparametern finden sich in Abschnitt 2.3. Dort finden sich ebenso technische Angaben zum genutzten MR-Tomographen.

## **2.2 Messung der Schweinewirbelsäule als Phantom**

Ein 30cm langes Stück einer unversehrten Schweinewirbelsäule mit noch erhaltenem muskulosklettalem Apparat wurde sowohl in einem Volumen-Computer-Tomographen (VCT) eXplore Locus Ultra, GE Healthcare, London, Ontario, Kanada, wie auch in dem für die menschlichen Wirbelsäulen genutzten Avanto-Tomographen Siemens, Erlangen, Deutschland, untersucht.

### 2.2.1 MR-Tomographische Messung der Schweinewirbelsäule

Die Schweinewirbelsäule wurde auf einer Nierenschale aus Pappe auf dem MR-Tisch gelagert und mit den zuvor genutzten Sequenzen der menschlichen Wirbelsäule, sowie mit den selbigen Protokollen gemessen, lediglich das FOV wurde auf 260mm verringert. Die daraus resultierenden Bilder waren jedoch auf Grund der entstanden Suszeptibilitätartefakten an der anterioren Wirbelsäulenkante nicht verwendbar. Unter Suszeptibilitätartefakten versteht man Artefakte, die entstehen, wenn Stoffe mit unterschiedlich guter Magnetisierbarkeit (Suszeptibilität) aneinander grenzen (Weishaupt et al., 2009), wobei es an den Grenzflächen zu Dephasierung und somit zur Signalauslöschung kommt (Bushberg et al., 2013). Deshalb war lediglich die vordere Kante der Schweinewirbelsäule betroffen, da hier die Bandscheiben bzw. knöchernen Wirbelkörpern unmittelbar an Luft grenzten.

Eine erneute Messung der Schweinewirbelsäule erfolgte in einer mit Wasser gefüllten Schüssel, um den auftretenden Artefakten entgegen zu wirken. Die daraus resultierenden Bilder konnten für die weiteren Ausmessungen verwendet werden.

Um die Gliederung der Arbeit zu vereinfachen, werden die Ergebnisse bezüglich der Lagerung der Schweinewirbelsäule in Wasser bei der Durchführung der Bildgebung bereits in diesem Abschnitt genannt. Abbildungen 2 und 3 zeigen eine Aufnahme der Schweinewirbelsäule mit und ohne Gebrauch der mit Wasser gefüllten Schüssel.



**Abbildung 2: T1- gewichtete Aufnahme der Schweinewirbelsäule. Messanordnung Gewebe gegen Luft.**



**Abbildung 3: T1- gewichtete Aufnahme der Schweinewirbelsäule. Messanordnung Gewebe eingelagert in Wasser.**

## 2.2.2 Messung der Schweinewirbelsäule im Volumen Computer Tomographen

Auch hier wurde die Schweinewirbelsäule auf einer Nierenschale aus Pappe gelagert. Nachdem der Localizer zur Erfassung der Schweinewirbelsäule verwendet wurde, konnte das FOV so gelegt werden, dass die letzten vier Bandscheiben, sowie die sie begrenzenden Wirbelkörperkanten abgebildet wurden. Die Schichtdicke eines rekonstruierten Bildes betrug 0,1mm, die Matrix bestand aus  $512 \times 512$  Voxeln.

## 2.3 Technische Angaben zur genutzten Bildgebung

### 2.3.1 Technische Angaben zum genutzten MR-Tomographen

Zur Studie stand der 1,5 Tesla starke Siemens Magnetom Avanto des Universitätsklinikums Gießen und Marburg, Standort Gießen, zur Verfügung, der in der Routine von klinischen Fragestellungen bezüglich Erkrankungen der Wirbelsäule genutzt wird. Der Avanto-Tomograph wird mit der Betriebssoftware Syngo MR betrieben, mit der die Untersuchungsplanung und über die die Gerätebedienung erfolgt.

Die Wirbelsäule wurde mittels einer T1 und einer T2 gewichteten Routinesequenz, einer zusätzlichen T2-TIRM Sequenz, sowie mittels einer 3D Sequenz dargestellt (diese wurde jedoch bei der hier vorliegenden Studie nicht ausgewertet). Dabei verlief die Phasenkodierrichtung bei allen Messungen in einer Richtung von Kopf zu Fuß. Die T2-TIRM Sequenz wurde gewählt, da der Kontrast zwischen Bandscheiben und knöchernen Strukturen besonders deutlich schien.

Die wichtigsten Parameter der genutzten Protokolle sind in Tabelle 1 aufgelistet; genutzte Fachtermini können der folgenden MRT Literatur entnommen werden (Haacke E.M., Magnetic Resonance Imaging, John Wiley & Sons Inc., 1999)

<b>Tabelle 1</b>	<b>T1_tse_sag</b>	<b>T2_tse_sag</b>	<b>T2_TIRM_sag</b>	<b>me3d_we_sag_iso</b>
<b>Voxelgröße</b>	0,7×0,7×4mm	0,7×0,7×4mm	1,2×1,1×4mm	1,4×1,4×1,4mm
<b>Schichtdicke</b>	4mm	4mm	4mm	1,4mm
<b>Distanzfaktor</b>	10%	10%	10%	50%
<b>FOV Auslese</b>	350mm	350mm	350mm	350mm
<b>FOV Phase</b>	100%	100%	100%	100%
<b>Time of repetition TR</b>	4000ms	796ms	3000ms	45ms
<b>Time of echo TE</b>	83ms	11ms	30ms	17ms
<b>Flipwinkel</b>	150°	150°	150°	20°

**Tabelle 1: Die wichtigsten genutzten Parameter, der in den Messungen genutzten Protokolle für die menschliche Wirbelsäule. Die Schweinewirbelsäule wurde mit denselben MR-Parametern gemessen, lediglich das FOV ist auf 230mm verringert worden.**

### 2.3.2 Technische Angaben zum genutztem VCT

Zur computertomographischen Darstellung der Schweinewirbelsäule wurde der Flat-Panel Volumen Computer Tomograph (VCT) eXploreLocus Ultra der Firma GE, des Universitätsklinikum Gießen genutzt, der im Gegensatz zu den in der klinischen Routine eingesetzten Computer Tomographen über einen Flat-Paneldetektor verfügt. Dieser ermöglicht eine höhere Auflösung und damit auch eine bessere Bildqualität, da die Bauelemente zur Strahlendetektion kleiner sind, als bei herkömmlichen Computer

Tomographen (Internetseiten der Universität Gießen, 2011) Das Flat-Panel besteht u.a. aus Caesiumjodid-Kristallen, die auf einer Schicht aus photosensitivem, amorphen Silizium aufgebracht sind (Weber, 2005). Der Detektor ist ca.  $23 \times 23 \text{ cm}^2$  groß und besitzt eine  $1024 \times 1024$  Pixel Matrix. Die Sequenzen wurden mit 140 kVp und 10 mA aufgenommen. Die genutzten Fachtermini können der folgenden CT-Fachliteratur entnommen werden: (Kalender, 2000).

## 2.4 Vorbereitung der Bilddaten

Die Datensätze wurden im DICOM-Format auf die Advanced Workstation 4.2 vom Hersteller GE Medical Systems, USA, übertragen. Mit ihr besteht die Möglichkeit die Datensätze in verschiedenen Ansichten darzustellen. So werden aus den sagittalen 2D MR- Aufnahmen ebenfalls coronare, axiale und eine 3D Ansicht rekonstruiert. Um einen besseren Kontrast zu erzielen und die Bandscheiben von den Wirbelkörpern besser abgrenzen zu können, wurden die Fenstereinstellungen der einzelnen Wirbelsäulenaufnahmen per Hand optimiert. Bei VC-Tomographischen Messungen können durch die Fensterung bestimmte Teile der Dichteskala hervorgehoben werden (Kalender, 2000), um so Gewebe mit unterschiedlicher radiologischer Dichte besser unterscheiden zu können. Bei MR-Tomographischen Bildern sind die Graustufen rein willkürlich gewählt, da es kein Gegenstück zur Hounsfieldskala der Computertomographie gibt (Kalender, 2000). Dies ist damit zu erklären, dass das Funktionsprinzip der MR-Tomographie auf der Anregungsfähigkeit von freien Protonen beruht, wohingegen bei der Computertomographie die Schwächung der Röntgenstrahlen von Bedeutung ist, woraus die Hounsfieldskala abgeleitet wird (Kalender, 2000). Wie sehr die Röntgenstrahlen geschwächt werden, hängt von den physikalischen Eigenschaften des zu untersuchenden Gewebes ab, die die ausgesendeten Röntgenstrahlen für das jeweilige Gewebe spezifisch schwächen. Errechnet wird dadurch ein sogenannter Schwächungskoeffizient. Dieser ist von der verwendeten Energie abhängig, sodass sich Bilder von unterschiedlichen Geräten nicht direkt vergleichen lassen (Kalender, 2000).

Deshalb wird der Schwächungskoeffizient über sogenannte CT-Zahlen relativ zur Schwächung von Wasser angegeben (Kalender, 2000), welche in Hounsfield Einheiten (Englisch: Hounsfield units, abgekürzt deshalb HU) angegeben werden. Der CT

Wertebereich erstreckt sich bei medizinischen Scannern meist von -1024 HU bis +3071 HU, er umfasst also meist 4096 Graustufen, die das menschliche Auge nicht in diesem Umfang unterscheiden kann (Kalender, 2000). Deshalb wird die sogenannte Fensterung verwendet. Man stellt sich damit den Bereich der Hounsfieldskala dar, der für eine bestimmte Fragestellung von Interesse ist. So lässt sich mit der Fensterweite (Englisch, Window Width, WW) die Breite dieses Bereichs festlegen, die Fensterhöhe (Englisch, Window Level, WL) gibt das Zentrum dieses Bereichs an. So werden Werte oberhalb dieses Fensters weiß dargestellt, Werte unterhalb dieses Fensters schwarz (Kalender, 2000).

Die in dieser Studie verwendete Fensterung variierte von MR-Sequenz zu MR-Sequenz, wurde jedoch bei allen Vermessungen der menschlichen Wirbelsäule innerhalb einer Sequenz beibehalten. Die benutzte Fensterung für die jeweilige Sequenz wurde so gewählt, dass bei der Ausmessung der Daten der männlichen Wirbelsäule eine subjektiv bestmögliche Abgrenzung der Bandscheiben von den Wirbelkörpern möglich war. Diese Fensterung wurde zur Ausmessung der Daten der weiblichen Wirbelsäule übernommen.

Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen Beispiele der benutzten Fensterung bei den verwendeten Sequenzen, bei der die Vermessungspunkte subjektiv visuell bestmöglich abgrenzbar sind.



**Abbildung 4:** Beispielabbildung der benutzten Fensterung der TIRM- Sequenz.

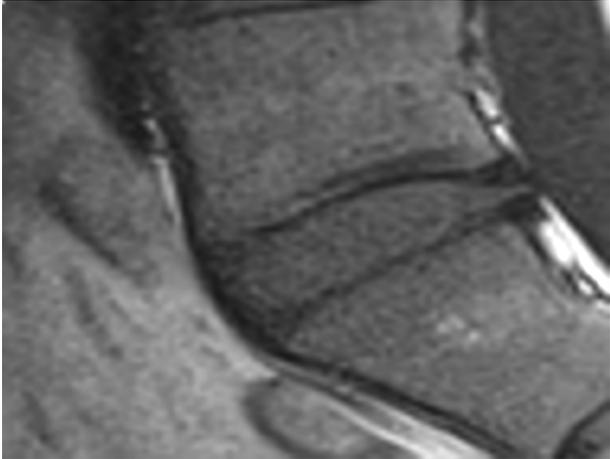


Abbildung 5: Beispielabbildung der benutzten Fensterung der T1-Sequenz.

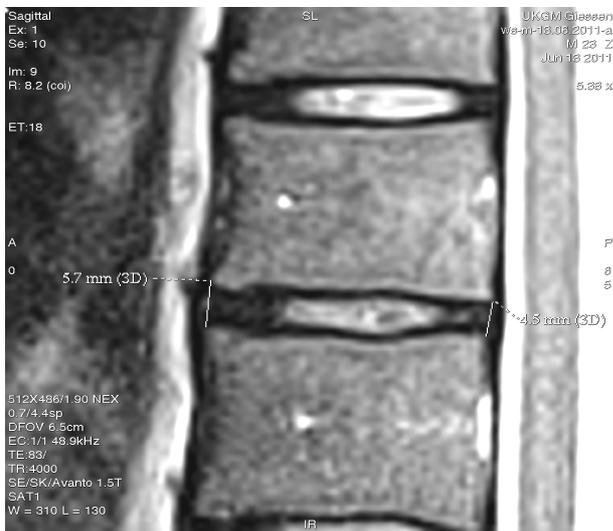


Abbildung 6: Beispielabbildung der benutzten Fensterung der T2-Sequenz.

Die benutzten Fensterungen zur Ausmessung der menschlichen Wirbelsäule sind in Tabelle 2 aufgelistet.

<b>Tabelle 2</b>	<b>Fensterweite (WW)</b>	<b>Fensterhöhe (WL)</b>	<b>Displayed Field of View (DFOV)</b>
<b>Sequenz</b>			
<b>T2</b>	310	130	6,5cm
<b>T1</b>	580	230	6,5cm
<b>TIRM</b>	260	135	7,0cm

Tabelle 2: Verwendete Fensterungen zur Ausmessung der Bilddaten der menschlichen Wirbelsäule.

Die verwendeten Fensterungen der Schweinewirbelsäule finden sich in Tabelle 3.

<b>Tabelle 3</b>	<b>Fensterweite (WW)</b>	<b>Fensterhöhe (WL)</b>	<b>Displayed Field of View (DFOV)</b>
<b>T2</b>	790	315	6,5cm
<b>T1</b>	1200	710	6,5cm
<b>TIRM</b>	500	350	7,0cm
<b>VCT</b>	2303	131	5,12cm

**Tabelle 3: Verwendete Fensterung zur Ausmessung der Bilddaten der Schweinewirbelsäule.**

## **2.5 Vermessung der Bandscheiben**

Bei jeder Bandscheibe wurden 8 Messpunkte gesetzt, um eine vordere (anteriore) und hintere (posteriore) Bandscheibenhöhe, eine anteriore-posteriore (ap)-Länge der Bandscheibe und die Höhe in der Mitte der Bandscheibe zu vermessen. Jede Bandscheibe wurde dreimal vermessen, dies erfolgte in unterschiedlichen Sitzungen. Die vordere Bandscheibenhöhe erstreckt sich von der vorderen äußersten Unterkante des darüberliegenden Wirbelkörpers bis zur vorderen äußersten Oberkante des darunterliegenden Wirbelkörpers, die hintere Bandscheibenhöhe wird analog dazu mittels den hinteren äußersten Ober- bzw. Unterkanten bestimmt. Die Strecke zwischen den anterioren und den posterioren Messpunkten entsprach der ap-Länge. Um die Höhe der Mitte der Bandscheibe zu bestimmen wurde die ap-Strecke halbiert und an dieser Stelle die Höhe der Bandscheibe bestimmt. Alle gemachten Größenangaben sind in Millimeter (mm) gemacht. Die Vermessung wird in den Abbildungen 7 bis 10 bei Aufnahmen der T2-Sequenz dargestellt.

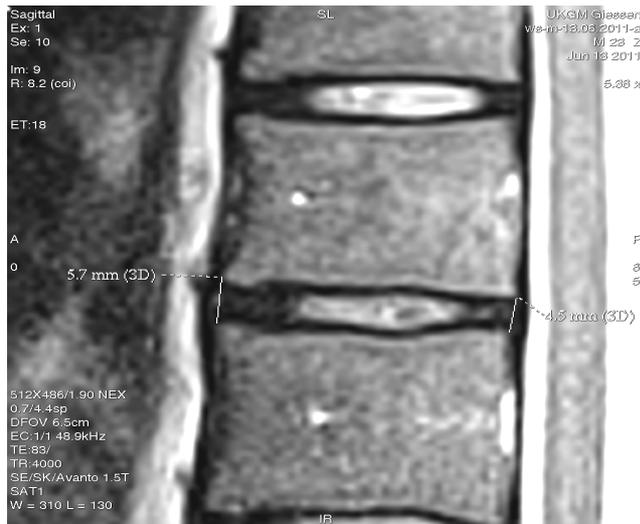


Abbildung 7: Einzeichnung der anterioren und posterioren Höhe der Bandscheibe.

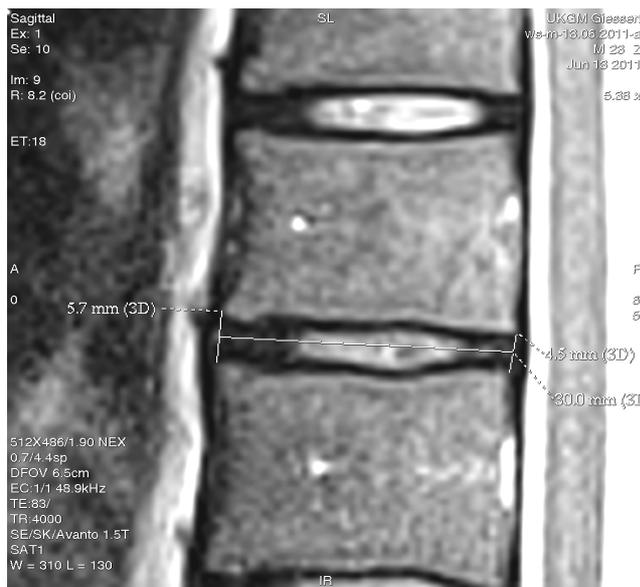
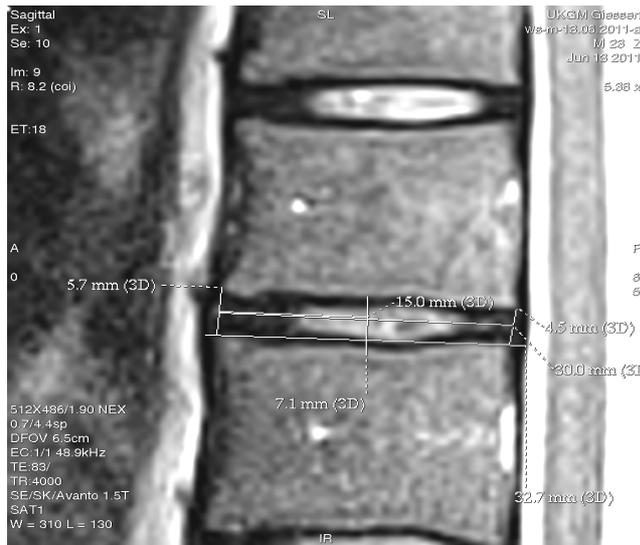


Abbildung 8: Vermessung der ap-Länge der Bandscheibe.

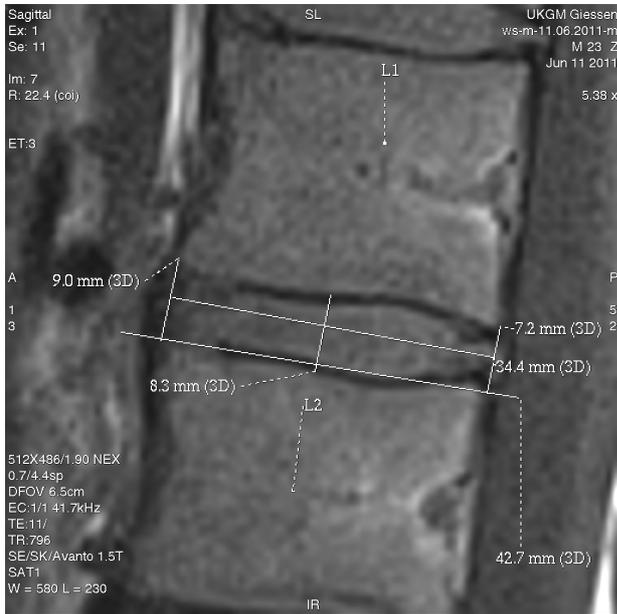


**Abbildung 9: Einzeichnung einer Hilfslinie an dem unteren Messpunkt der anterioren und posterioren Messlinie. Rechtwinklig dazu wurde eine weitere Messlinie auf halber ap-Länge eingezeichnet.**



**Abbildung 10: Einkürzung der Messlinie auf Höhe der Mitte der Bandscheibe.**

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen ebenfalls nochmals exemplarisch die Bestimmung der vier Bandscheibengrößen in den Sequenzen T1 und TIRM.



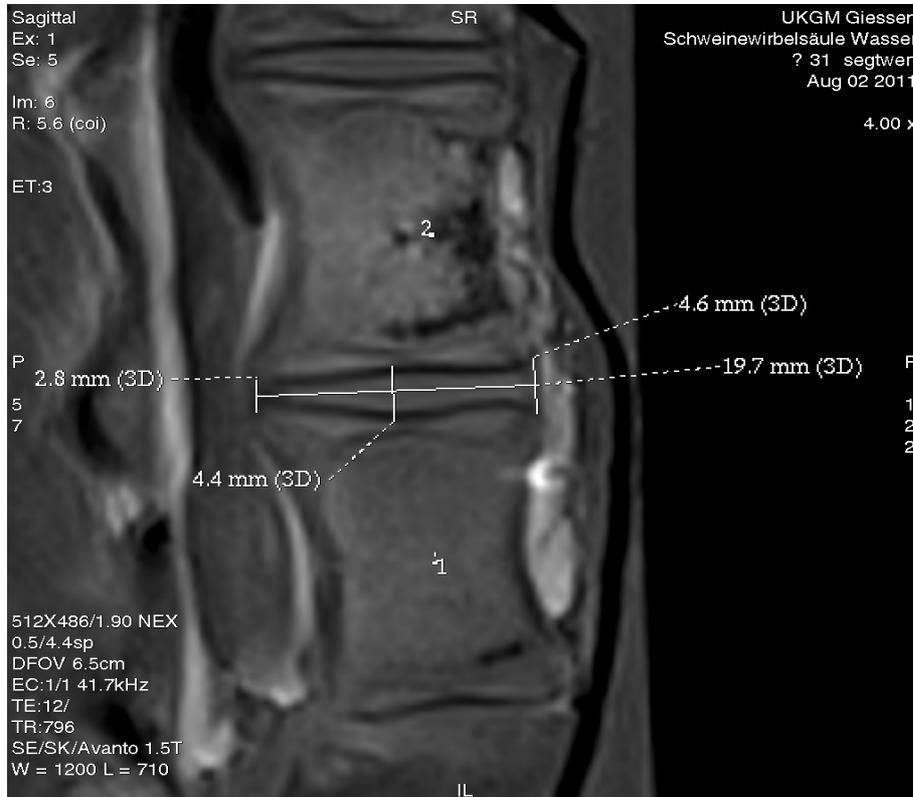
**Abbildung 11: Beispielaufnahme der Sequenz T1, Bestimmung der Bandscheibengrößen.**



**Abbildung 12: Beispielaufnahme der Sequenz TIRM, Bestimmung der Bandscheibengrößen.**



**Abbildung 13:** Beispielaufnahme Schweinewirbelsäule, Sequenz T2, Bestimmung der Bandscheibengrößen.



**Abbildung 14:** Beispielaufnahme Schweinewirbelsäule, Sequenz T1, Bestimmung der Bandscheibengrößen.



**Abbildung 15: Beispielaufnahme Schweinewirbelsäule, Sequenz TIRM, Bestimmung der Bandscheibengrößen.**

Die von der Advantage Windows Workstation generierte coronare Ansicht der Wirbelsäule wurde dazu genutzt, um sicherzustellen, dass sich die zu vermessende Schicht in der Mitte der Wirbelsäule befand.

## 2.6 Verwendete statistische Tests

Es wurden insgesamt 10 Bandscheiben der menschlichen Wirbelsäule im Bereich von Th8/Th9 bis L5/S1 vermessen. Bei jeder Bandscheibe wurden drei Einzelmessungen der jeweiligen Messgröße (anteriore Höhe, posteriore Höhe, ap-Länge, Höhe in der Mitte der Bandscheibe) vorgenommen und deren Ergebnisse in einer Exceltabelle des Programms Microsoft Excel, Version 2010, protokolliert.

Aus den drei Einzelmessungen einer Größe der Bandscheibe wurde ebenfalls durch das Programm Microsoft Excel ein arithmetischer Mittelwert gebildet (z.B.: der Mittelwert für die anteriore Höhe der Bandscheibe L1/L2 des weiblichen Probanden am Tag 1 in der MRT-Sequenz „T2“). Diese errechneten arithmetischen Mittelwerte für eine

Bandscheibe wurden miteinander verglichen, indem die Differenz der arithmetischen Mittelwerte gebildet wurde.

Dabei kann eine Differenz der arithmetischen Mittelwerte rein zufällig entstanden sein oder es liegt in Wirklichkeit ein Unterschied der Mittelwerte vor. Die erste Annahme, dass die Differenz der arithmetischen Mittelwerte rein zufällig entstanden ist und es in Wirklichkeit kein Unterschied zwischen den beiden arithmetischen Mittelwerten besteht, wird als Nullhypothese bezeichnet. Die zweite Annahme, dass die Differenz der arithmetischen Mittelwerte nicht zufällig entstanden ist, sondern dass die Mittelwerte tatsächlich voneinander verschieden sind, wird als Alternativhypothese bezeichnet.

Um die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, ob diese Differenz zufällig entstanden ist, oder ob es einen wirklichen Unterschied der Mittelwerte gibt, wurden die Messergebnisse mittels t-Test für gepaarte Stichproben überprüft (Beichelt und Montgomery, 2003). Der t-Test liefert eine Entscheidungshilfe dafür, ob ein gefundener Mittelwertsunterschied rein zufällig entstanden ist, oder ob es wirklich bedeutsame Unterschiede zwischen den zwei untersuchten Gruppen gibt (Rasch et al., 2006). Bei Durchführung des t-Tests wird ein p-Wert bestimmt. Dieser p-Wert liegt im Bereich zwischen 0 und 1. Je kleiner p, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die verglichenen Mittelwerte tatsächlich voneinander verschieden sind. Für die Berechnung wurde eine maximale Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  festgelegt ( $\alpha = 0,05$ ). Das statistische Ergebnis wurde als signifikant bezeichnet, wenn  $p < 0,05$  ist. Ein signifikantes Ergebnis gibt an, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die gefundenen Ergebnisse nur zufällig entstanden sind, gering ist.

Die Berechnung des p-Wertes erfolgte ebenfalls mittels des Programmes Microsoft Excel, Version 2010. Zuvor erfolgte ein Vergleich der von Excel errechneten p-Werte mit p-Werten, die von dem Statistikprogramm „IBM SPSS Statistic Version 19, Ehningen, Deutschland“ errechnet wurden, um numerische Ungenauigkeiten von Excel aufzudecken. Beide Werte stimmten überein, sodass die Berechnung der p-Werte mittels Excel erfolgte.

### 3 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse wurde wie folgt gegliedert: zuerst werden die Ergebnisse der humanen Datensätze aufgeführt. Hier beginnt zunächst der Ergebnissteils des männlichen Probanden, danach folgt der des weiblichen Probanden. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der Vermessung der Schweinewirbelsäule aufgeführt.

Bei den humanen Daten werden zunächst die Vergleiche besprochen bei denen die Sequenzen untereinander verglichen werden. Hier wurde der Fragestellung nachgegangen, ob und wie sich die bestimmten Bandscheibengrößen bei verschiedenen benutzten Sequenzen unterscheiden. Dann folgen die Daten des Vergleiches der morgendlichen und abendlichen Messungen, in denen beobachtet werden sollte, in wie fern es einen signifikanten Unterschied bei den Größenbestimmungen der Bandscheiben gibt, wenn die MR-Aufnahmen am Morgen oder am Abend durchgeführt wurden. Nach tabellarischer Darstellung der Ergebnisse folgt eine beschreibende Zusammenfassung der beobachteten Ergebnisse.

Im Anschluss an die Ergebnisse der humanen Datensätze werden die Ergebnisse der Schweinewirbelsäule aufgeführt: Hier wurden ebenfalls die verschiedenen genutzten Sequenzen der MR-Tomographischen Bildgebung miteinander verglichen und zusätzlich mit den Ergebnissen der volumetomographischen Bildgebung verglichen. Auch hier folgt nach tabellarischer Darstellung der Ergebnisse eine beschreibende Zusammenfassung der beobachteten Ergebnisse.

Die nun folgenden Tabellen 4 und 5 geben eine Übersicht der durchgeführten Vergleiche mit dazugehörigen Tabellennummern.

Tabelle 4 gibt eine Übersicht der Tabellen der verschiedenen durchgeführten Vergleiche der humanen Datensätzen mit dazugehörigen Tabellennummern.

Dabei bedeutet die Abkürzung „Differenzen d. arithm. Mittelwerte“: „Differenzen der arithmetischen Mittelwerte“.

Tabelle 4 Übersicht der durchgeführten Vergleiche und die zugehörige Tabellenstruktur	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>TIRM</b>
<b>T1</b>	<b>Vergleich Mo vs. Ab für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b>  ♂ Tab. 12 bis 15 ♀ Tab. 25 bis 28 <b>Differenzen d.arithm. Mittelwerte</b> ♂ Tab. 16 bis 18 ♀ Tab. 29 bis 31	<b>Vergleich Mo vs. Mo für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 21 und 22  <b>Vergleich Ab vs. Ab für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 21 und 22	<b>Vergleich Mo vs. Mo für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 19 und 20  <b>Vergleich Ab vs. Ab für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 19 und 20.
<b>T2</b>	<b>Vergleich Mo vs. Mo für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 8 und 9  <b>Vergleich Ab vs. Ab für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 8 und 9	<b>Vergleich Mo vs. Ab für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b>  ♂ Tab. 12 bis 15 ♀ Tab. 25 bis 28 <b>Differenzen d.arithm. Mittelwerte</b> ♂ Tab. 16 bis 18 ♀ Tab. 29 bis 31	<b>Vergleich Mo vs. Mo für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 23 und 24  <b>Vergleich Ab vs. Ab für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 23 und 24.
<b>TIRM</b>	<b>Vergleich Mo vs. Mo für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 6 und 7  <b>Vergleich Ab vs. Ab für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 6 und 7	<b>Vergleich Mo vs. Mo für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 10 und 11  <b>Vergleich Ab vs. Ab für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b> Tab. 10 und 11	<b>Vergleich Mo vs. Ab für Tag 1, Tag 2 , Tag 3</b>  ♂ Tab. 12 bis 15 ♀ Tab .25 bis 28 <b>Differenzen d. arithm.Mittelwerte</b> ♂ Tab.16 bis 18 ♀ Tab. 29 bis 31

Tabelle 4: Übersichtstabelle der durchgeführten Vergleiche mit zugehörigen Tabellennummern.

--- Vergleiche unterschiedlicher Sequenzen des männlichen Probanden.

--- Vergleiche unterschiedlicher Sequenzen des weiblichen Probanden.

--- Vergleiche gleicher Sequenzen morgens versus abends durchgeführt für beide Probanden.

**Vergleich morgens (Mo) versus (vs.) Mo:** hier sind die Werte der morgendlichen Messung mit denen der morgendlichen Messung verglichen worden (z.B.: die morgendliche Messung des Tages 1 der Sequenz T1 mit der morgendlichen Messung der Sequenz TIRM).

**Vergleich abends (Ab) vs. Ab:** hier sind die Werte der abendlichen Messung mit denen der abendlichen Messung verglichen worden (z.B.: die abendliche Messung des Tages 1 der Sequenz T1 mit der abendlichen Messung der Sequenz TIRM).

**Vergleich Mo vs. Ab:** hier sind die Werte der morgendlichen Messung mit denen der abendlichen Messung innerhalb einer Sequenz des jeweiligen Tages verglichen worden.

Tabelle 5 gibt eine Übersicht der Tabellenstruktur der verschiedenen durchgeführten Vergleiche der Schweinewirbelsäule wieder.

<b>Durchgeführte Vergleiche Schweinewirbelsäule</b>				
<b>Tabelle 5</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>TIRM</b>	<b>VCT</b>
<b>T1</b>	---	Tab. 32	Tab. 32	Tab. 35
<b>T2</b>	Tab. 32	---	Tab. 34	Tab. 36
<b>TIRM</b>	Tab. 33	Tab. 34	---	Tab. 37
<b>VCT</b>	Tab. 35	Tab. 36	Tab. 37	---

**Tabelle 5: Übersichtstabelle der durchgeführten Vergleiche der Schweinewirbelsäule mit den dazu gehörigen Tabellennummern.**

In den Tabellen 6 bis 15 mit den Ergebnissen des männlichen Probanden, in den Tabellen 19 bis 28 mit den Ergebnissen des weiblichen Probanden und in den Tabellen 32 bis 37 mit den Resultaten der Schweinewirbelsäule, gilt die folgende einheitliche graphische Kodierung der Messergebnisse:

**Einzelbandscheiben:** Auflistung der einzelnen Bandscheiben jeweils zwischen den entsprechenden Wirbelkörpern z.B.: L4/L5 Bandscheibe zwischen Lendenwirbelkörper 4 und Lendenwirbelkörper 5.

In jeder Spalte wurden zudem die Differenzen der Mittelwerte (in mm) der jeweiligen Vergleiche eingefügt (z.B.: Differenz der Mittelwerte der anterioren Höhe morgens minus der Differenz der Mittelwerte der anterioren Höhe abends), dabei werden in den farbig unterlegten Spalten die signifikant unterschiedlichen Differenzen der Mittelwerte angegeben.

**Die Pfeilsymbole ↑/↓ geben das Signifikanzniveau an:**

↑ / ↓:  $p < 0,05$

↑↑ / ↓↓:  $p < 0,01$

↑↑↑ / ↓↓↓:  $p < 0,001$

### **3.1 Ergebnisse der Messungen des männlichen Probanden**

#### **3.1.1 Vergleich der Sequenzen**

In den Abschnitten 3.1.1.1 bis 3.1.1.3 wurden die Messergebnisse von jeweils zwei verschiedenen Sequenzen verglichen: T1 mit TIRM, T1 mit T2 und T2 mit TIRM.

Bei jedem Vergleich sind die Mittelwerte der einzelnen Bandscheiben für jede Messgröße („anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“, „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“ und „ap-Länge“) verglichen worden.

#### ***3.1.1.1 Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM***

Die **Tabelle 6** (Seite 33 - Messgröße „anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“) zeigt die Ergebnisse des Vergleichs der Sequenzen T1 und TIRM für alle drei Messtage. Aufgelistet sind die Ergebnisse in vier breiten Spalten, in denen die Differenzen der Mittelwerte in mm angegeben sind:

Spalte 1: „anteriore Höhe morgens T1“ minus „anteriore Höhe morgens TIRM“;

Spalte 2: „anteriore Höhe abends T1“ minus „anteriore Höhe abends TIRM“;

Spalte 3: „posteriore Höhe morgens T1“ minus „posteriore Höhe morgens TIRM“;

Spalte 4: „posteriore Höhe abends T1“ minus „posteriore Höhe abends TIRM“.

In jeder Spalte sind die Ergebnisse von Tag 1, Tag 2 und Tag 3 aufgeführt.

**Tabelle 7** (Seite 34 – Messgröße „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“, „ap-Länge“) gilt analog zu **Tabelle 6**, nur das hier die Ergebnisse der Differenzen für die „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“ und für den „ap-Länge“ gezeigt sind.

#### ***3.1.1.2 Vergleich der Sequenzen T1 und T2***

Die **Tabellen 8 und 9** (Seite 35 - Messgröße „anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“; Seite 36 – Messgröße „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“, „ap-Länge“) zeigen tabellarisch die Ergebnisse des Vergleiches der Sequenzen T1 und T2 für alle drei Messtage des männlichen Probanden. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt analog zu der formalen Struktur, die in Tabellen 6 und 7 beschrieben ist.

#### ***3.1.1.3 Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM***

Die **Tabellen 10 und 11** (Seite 37 - Messgröße „anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“; Seite 38 – Messgröße „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“, „ap-Länge“) zeigen die Ergebnisse des Vergleiches der Sequenzen T2 und TIRM für alle drei Messtage des männlichen Probanden. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt analog zu der formalen Struktur, die in Tabellen 6 und 7 beschrieben ist.

Ergebnisse

Tabelle 6 T1 vs. TIRM	anteriore Höhe morgens T1-TIRM (mm)			anteriore Höhe abends T1-TIRM (mm)			posteriore Höhe morgens T1-TIRM (mm)			posteriore Höhe abends T1-TIRM (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	-0,4	+2,3 ↑↑	-1,5	-1,4.	-1,1	0,0	-0,5	-1,4	-1,0 ↓	-0,8	-1,3 ↓	-1,7 ↓
L4/L5	-0,2	-2,5 ↓↓	-0,2	+1,4.	+0,4.	-0,9	-0,4	-0,6.	-0,4	-0,7	-0,1.	-1,4 ↓
L3/L4	-3,5 ↓↓	-4,6 ↓↓	-3,8 ↓	-5,4 ↓↓	-2,2 ↓	-4,3 ↓↓	-0,7.	-0,1	0,0	-1,5.	-0,6	+0,6
L2/L3	-2,8 ↓	-0,8	-2,7 ↓	-2,5 ↓	-2,4	+0,2	-0,2	-1,4 ↓	-0,3	-0,3	0,0	+1,0 ↑
L1/L2	-2,1 ↓↓	+0,4.	+0,4	-1,8	+1,1	-0,8	-0,5	+1,4 ↑	-0,3	-0,8 ↓	-1,0	+1,7 ↑↑
Th12/L1	-0,7	-2,5	-1,1 ↓	-0,2.	-1,3	+0,1	-0,8 ↓	-0,3	-0,1	-0,4	-0,5 ↓	-0,1
Th11/Th12	-1,6	-1,2 ↓	-0,6	-0,6	-2,6 ↓↓	+0,4	+0,7.	+0,6 ↑	+0,4	-0,8 ↓	-0,5 ↓	-0,9
Th10/Th11	-1,9 ↓	-2,4 ↓	-1,7 ↓	-0,8 ↓	-1,9 ↓	-0,5	0,0	0,0	-2,2 ↓	-1,2 ↓↓	-1,2 ↓	-0,2
Th9/Th10	-0,9 ↓	+0,2	-0,8 ↓	+0,1.	-0,6	+0,4 ↑	-1,7	-0,6	-1,1	-1,6 ↓	-1,3 ↓	-1,0
Th8/Th9	-2,2 ↓↓	-0,6.	-0,2	-1,1.	-0,2.	-0,4	-1,1 ↓	-2,9 ↓	-1,1 ↓	-1,7 ↓↓	-3,0 ↓↓	-1,4 ↓↓

Tabelle 6: Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe der T1 Sequenz gemessen, größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz TIRM.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der TIRM Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T1.

Ergebnisse

Tabelle 7 T1 vs. TIRM	Höhe Mitte morgens T1-TIRM (mm)			Höhe Mitte abends T1-TIRM (mm)			ap-Länge morgens T1-TIRM (mm)			ap-Länge abends T1-TIRM (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	-0,5	-0,4	-0,8	-0,7	-0,4	-1,1 ↓	+1,3	+0,3	-1,7 ↓	+0,5	+1,9 ↑	+0,9
L4/L5	-0,4	-0,6	-0,8	-0,7	-0,8 ↓↓	-0,8 ↓↓	+1,5	+1,9 ↑	+1,6	+1,1	+1,8 ↑	+1,4
L3/L4	-0,7	-0,4	-1,1 ↓	-1,1	-0,8	+0,1	+1,0	+1,5 ↑	+2,3 ↑↑	+1,6 ↑	+0,4	+1,3
L2/L3	-0,5	-1,2 ↓↓	-1,5 ↓	-0,2	-0,5	-0,4 ↓	+1,1 ↑	+2,1 ↑↑	+0,7	+1,4 ↑	+1,2 ↑	+1,0 ↑
L1/L2	-1,1 ↓↓	-1,0	-1,2 ↓	-0,7	-0,8 ↓↓	-1,3 ↓↓	+1,2 ↑↑	+1,6 ↑↑	+1,0 ↑	+0,8 ↑	+1,5 ↑	+1,6
Th12/L1	-1,0	-1,1 ↓	-0,8	-1,1 ↓↓	-0,9	-0,5	+0,9 ↑↑	+1,5 ↑↑	+2,0 ↑	+1,3 ↑	+1,1 ↑	+1,1 ↑
Th11/Th12	-1,2 ↓	-1,4 ↓↓↓	-0,7	-1,3 ↓	-1,0 ↓	-0,3	+0,7 ↑	+1,5 ↑	+1,0 ↑	+1,0 ↑↑	+0,9	+0,9 ↑
Th10/Th11	-0,9 ↓	-1,4 ↓↓	-1,3 ↓↓	-0,9 ↓	-1,2	-0,9 ↓	+1,4	+1,1 ↑↑	+1,4 ↑	+0,8 ↑↑	+2,1 ↑	+1,5 ↑
Th9/Th10	-1,0 ↓	-0,9	-0,7 ↓	-0,6	-1,0 ↓↓	-0,8 ↓↓	+1,6 ↑	+1,3 ↑	+2,2 ↑↑	+1,3	+1,9	+1,0
Th8/Th9	-1,1 ↓↓	-1,4 ↓↓	-0,7 ↓↓	-0,8 ↓	-1,7 ↓	-1,1 ↓↓	+1,4 ↑↑	+1,2 ↑↑	+1,5 ↑	+1,4 ↑↑	+1,9 ↑↑	+1,2 ↑↑

Tabelle 7: Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe der T1 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz TIRM.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der TIRM Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T1.

Ergebnisse

Tabelle 8 T1 vs. T2	anteriore Höhe morgens T1-T2 ( mm)			anteriore Höhe abends T1-T2 ( mm)			posteriore Höhe morgens T1-T2 ( mm)			posteriore Höhe abends T1-T2 ( mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	+0,3	+1,1	-0,5 ↓↓	0,0	-2,8 ↓	+0,5	+0,9	-0,2	-0,3	-0,2	-0,5	-0,3
L4/L5	+1,4	-1,2 ↓↓	0,0	0,0	-0,5 ↓	+0,3	+0,1	+1,9 ↑	-0,7	+0,3	+0,5	+0,3
L3/L4	+2,6 ↑	-6,2 ↓↓	-4,4 ↓↓	-1,9	+0,2	-0,5	+1,5 ↑	-0,4	-0,2	+2,0 ↑	+0,1	-0,4
L2/L3	-1,0	-0,7	-0,1	-1,0	-1,3	+0,8	0,0	+0,4	+0,7 ↑	0,0	-0,6	+1,2
L1/L2	-2,5 ↓	-0,8 ↓	-1,9 ↓↓	-2,9 ↓↓	-1,5	+0,3	+0,3	+1,4 ↑	-0,6	-0,8 ↓	+0,2	+0,8
Th12/L1	+0,8	-2,7	-0,9	-0,3	-0,2	+0,8 ↑	+0,3	+0,2	-0,1	+0,5	+0,7 ↑	+0,6
Th11/Th12	-0,1	+0,3 ↑	-1,5 ↓↓	+0,1	+0,1	-0,3	+0,5	+0,3	+0,4	+0,4	-1,5 ↓	+0,3
Th10/Th11	+0,6	+0,7	-1,2	-0,1	+0,6	-0,6 ↓	+0,9 ↑	+0,6	-0,2	+0,1	+0,4 ↑	+0,8
Th9/Th10	-0,9	+2,4 ↑↑	-0,2	-0,3	+0,2	-0,5	-0,4	+1,3	+0,5	-0,9	+0,3	-0,5
Th8/Th9	-1,1 ↓	+1,4 ↑↑↑	+0,8 ↑	+1,0	-0,4	+0,2	-0,4	0,0	0,0	-1,2 ↓	+1,4	-0,2

Tabelle 8: Vergleich der Sequenzen T1 und T2 des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe.

↑ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T1 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T2.

↓ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T2 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T1.

Ergebnisse

Tabelle 9 T1 vs. T2	Höhe Mitte morgens T1-T2 ( mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	+0,5	+0,4	+0,1
L4/L5	+0,1	+0,2	0,0
L3/L4	+0,2	+0,6	0,0
L2/L3	-0,3	-0,1	-0,1
L1/L2	0,0	0,0	-0,2
Th12/L1	0,0	-0,4 ↓	+0,1
Th11/Th12	-0,7	+0,1	0,0
Th10/Th11	+0,1	-0,4 ↓	-0,2
Th9/Th10	+0,4	+0,2	0,0
Th8/Th9	-0,8 ↓	-0,5 ↓	+0,1

Höhe Mitte abends T1-T2 ( mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-0,2	+0,1	+0,1.
+0,2	0,0	+0,3
+0,2	+0,1	+0,1
+0,7	-0,3	+0,1
+0,2	-0,2	-0,2
-0,3 ↓	+0,1	+0,1
0,0	-0,1.	-0,4 ↓
+0,3	-0,1	0,0
-0,1	+0,1	-0,3
0,0	-0,3	+0,2

ap-Länge morgens T1-T2 ( mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
0,0	+0,1	0,0
-0,4	0,0	+0,1
-0,9	-0,1	+1,1 ↑
-0,1.	+0,2	+0,6
0,0	+0,6	-0,5 ↓
0,0	+0,8 ↑↑	+1,6 ↑
+0,2	+0,7 ↑↑	+0,4
+0,7	+0,5	+0,9 ↑
+0,5	+0,6	+0,8
-0,4	+0,3	+0,4

ap-Länge abends T1-T2 ( mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-1,1	+1,1 ↑↑	-1,0 ↓↓
-1,2	-0,6 ↓	-0,3
+0,2	-0,7 ↓	-0,1
+1,1	0,0	-0,1
-0,5	0,0	+0,5
+0,7	+0,2	+0,8
+0,1	-0,3	+0,1
+0,8 ↑↑	+0,7.	+0,7 ↑
+1,2	+0,6	+1,4
-1,2	+1,3	+0,1

Tabelle 9: Vergleich der Sequenzen T1 und T2 des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge.

↑↑ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T1 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T2.

↓↓ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T2 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T1.

Tabelle 10 T2 vs. TIRM	anteriore Höhe morgens T2-TIRM (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	-0,7 ↓	-1,2	0,0
L4/L5	-1,6 ↓	-1,3 ↓↓	-0,2
L3/L4	-6,1 ↓↓	+1,1	-0,6
L2/L3	-1,2	-0,1	-2,6 ↓
L1/L2	+0,4	-1,2 ↓	-2,3 ↓↓
Th12/L1	-0,1	+0,2	-0,2
Th11/Th12	-1,7 ↓	-1,5 ↓	+0,9
Th10/Th11	-1,3 ↓	-3,1 ↓↓	-0,5
Th9/Th10	0,0	-2,2 ↓	-0,6
Th8/Th9	-1,1 ↓	+0,8	-0,6

anteriore Höhe abends T2-TIRM (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-1,4 ↓↓	+1,7 ↑↑	-0,5
-1,4	+0,9 ↑	0,6
-3,5 ↓↓	-2,4	-3,8 ↓↓
-1,5	-0,9	-0,6
-1,1	+2,6 ↑↑↑	-0,5
+0,1	-1,1 ↓	-0,7 ↓
-0,7	-2,7 ↓↓	+0,7 ↑
-0,9	-1,3 ↓↓	+0,1
+0,4	n-0,8	+0,4 ↑
-1,8	+0,2.	-0,6

posteriore Höhe morgens T2-TIRM (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-1,4 ↓	-1,2	-0,7
-0,5	-2,5 ↓	+0,3
-2,2 ↓↓	-0,5	+0,2
-0,2	-1,8 ↓↓	-1,0 ↓
-0,8	0,0	+0,3
-1,1	-0,5	0,0
+0,2	+0,3	-2,0
-0,9 ↓↓	-0,6	-2,0 ↓↓
-1,3	-1,9 ↓	-1,6 ↓
-0,7	-2,9 ↓↓	-1,1 ↓↓

posteriore Höhe abends T2-TIRM (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-0,6	-1,8 ↓	-1,4 ↓
-1,0	-0,6	-1,7 ↓↓
-3,5 ↓↓	-0,7	+1,0 ↑
-0,3	-0,6 ↓	-0,2
0,0	-0,8	+0,9.
-0,9 ↓	-1,2 ↓↓	-0,7
2-1	+1,0 ↑	-1,2
-1,3 ↓↓	-1,6 ↓	-1,0 ↓↓
-0,7	-1,0	-0,5
-0,5 ↓↓	-1,6 ↓	-1,2 ↓↓

Tabelle 10: Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T2 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz TIRM.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der TIRM Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T2.

Tabelle 11 T2 vs. TIRM	Höhe Mitte morgens T2-TIRM (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	-1,0	-0,8	-0,9
L4/L5	-0,5 ↓↓	-0,8 ↓↓	-0,8 ↓↓
L3/L4	-0,9 ↓	-1,0	-1,1 ↓
L2/L3	-0,2	-1,1 ↓↓	-1,4 ↓
L1/L2	-1,1 ↓	-1,0 ↓	-1,0
Th12/L1	-1,0	-0,7 ↓	-0,9 ↓
Th11/Th12	-0,5	-1,5 ↓	-0,7 ↓
Th10/Th11	-1,0 ↓	-1,0 ↓	-1,1 ↓↓
Th9/Th10	-0,6	-1,1 ↓↓	-0,7
Th8/Th9	-0,3	-0,9	-0,6

Höhe Mitte abends T2-TIRM (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-0,8	-0,5	-1,2 ↓↓
-0,5	-0,8 ↓	-1,1 ↓
-1,3	-0,9 ↓	0,0
-0,5	-0,2	-0,5
-0,9 ↓	-0,6	-1,1 ↓
-0,8 ↓	-1,0 ↓	-0,6 ↓
-1,3 ↓↓	-1,1 ↓	+0,1
-1,2 ↓	-1,1	-0,9
-0,5 ↓	-1,1	-0,5 ↓
-0,8	-1,4 ↓	-1,3 ↓↓

ap-Länge morgens T2-TIRM (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
+1,2	+0,2	-1,7
+1,9	+1,9 ↑↑	+1,5
+1,9	+1,6 ↑	+1,2 ↑
+1,2 ↑↑	+1,8 ↑	+0,1
+1,0	+1,0	+1,5 ↑↑
+0,9 ↑	+0,7 ↑	+0,4
+0,5	+0,8 ↑	+0,6
+0,7	0,6	+0,5 ↑
+1,1 ↑	0,7	+1,4 ↑
+1,0 ↑	+1,1 ↑	+1,1

ap-Länge abends T2-TIRM (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
+1,6	+0,8	+0,1
+5,7. ↑↑↑	+2,4 ↑↑	+1,7 ↑↑
+1,4 ↑↑	+1,1	+1,4
+0,3	+1,2	+1,1
+1,3 ↑↑	+1,5 ↑	+1,1
+0,6 ↑↑	+0,9 ↑↑	+0,3
+0,9 ↑	+1,2 ↑↑	+0,8
0,0.	+1,4 ↑↑	+0,8
+0,1	+1,3	-0,4 ↓
+0,2	+1,5	+1,1 ↑

Tabelle 11: Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T2 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz TIRM.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der TIRM Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T2.

### 3.1.2 Vergleich der morgendlichen und abendlichen Messungen der Daten des männlichen Probanden

Hier wurden die Ergebnisse der morgendlichen Messung mit denen der abendlichen Messung innerhalb einer Sequenz für die jeweilige Größe verglichen (z.B.: der Vergleich für die Bandscheibe L5/S1 der anterioren Höhe des Tages 1).

Dazu wurden die Mittelwerte der morgendlichen Messung von den Mittelwerten der abendlichen Messung subtrahiert (abends-morgens) und diese Differenz in die Tabelle (in mm) für die jeweilige Bandscheibe eingetragen. Wenn sich diese Mittelwerte signifikant voneinander unterschieden wurden die Spalten farblich unterlegt.

Die **Tabelle 12** (Seite 40) zeigt die Ergebnisse des Vergleiches der morgendlichen mit der abendlichen Messung der **anterioren Höhe** des männlichen Probanden.

Die **Tabelle 13** (Seite 41) zeigt die Ergebnisse des Vergleiches der morgendlichen mit der abendlichen Messung der **posterioren Höhe** des männlichen Probanden.

Die **Tabelle 14** (Seite 42) zeigt die Ergebnisse des Vergleiches der morgendlichen mit der abendlichen Messung der **Höhe in der Mitte der Bandscheibe** des männlichen Probanden.

Die **Tabelle 15** (Seite 43) zeigt die Ergebnisse des Vergleiches der morgendlichen mit der abendlichen Messung der **ap-Länge** der Bandscheibe des männlichen Probanden.

Tabelle 12 morgens vs. abends	Tag 1 anteriore Höhe abends-morgens (mm)			Tag 2 anteriore Höhe abends-morgens (mm)			Tag 3 anteriore Höhe abends-morgens (mm)		
	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm
	L5/S1	-0,1	-0,4	+0,6	0,0	-3,9 ↓	-0,5	-0,3	+1,7 ↑
L4/L5	+2,4 ↑	+1,0	-0,6	+0,7	+1,4 ↑	-1,5 ↓	-0,9	-1,2	-0,5 ↓
L3/L4	+3,2 ↑↑	-1,0	-0,6	-5,5 ↓	+0,9	-2,0 ↓	-5,3 ↓↓	-1,4 ↓	-0,9
L2/L3	+0,5	+0,5 ↑	+0,8	-2,0	-2,6	-1,0	-0,9	0,0	-2,9 ↓↓
L1/L2	+1,0	+0,6 ↑	+0,3	-0,2 ↓	-0,9	-1,6 ↓	-1,5	+0,7	-0,3
Th12/L1	+1,6 ↑	+0,5	+1,4	-1,4 ↓↓	+1,1	-0,6	-1,9 ↓	-0,2	-1,4 ↓↓
Th11/Th12	+0,7	+0,7	-0,3	-1,4 ↓	-1,6 ↓↓↓	-0,2	-1,8 ↓	-0,6 ↓	-1,6 ↓
Th10/Th11	+1,0	+1,7	+0,6	+0,4	-0,9	-1,4 ↓	0,0	+0,6	-0,6 ↓
Th9/Th10	0,0	+0,6	-0,4	+1,1	-1,1 ↓	-0,3	0,0	-0,3	-1,5 ↓
Th8/Th9	+0,9	+1,2 ↑	-0,2	-0,5	+0,5	+0,1	-0,2	-0,8	-0,2

Tabelle 12: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der anterioren Höhe des männlichen Probanden.

---: Der morgendliche Mittelwert war größer als der der abendlichen Messung, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin abgenommen (-).

---: Der abendliche Mittelwert war größer als der morgendliche Mittelwert, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin zugenommen (+).

Ergebnisse

Tabelle 13 morgens Vs. abends	Tag 1 posteriore Höhe abends-morgens (mm)			Tag 2 posteriore Höhe abends-morgens (mm)			Tag 3 posteriore Höhe abends-morgens (mm)		
	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm
	L5/S1	+1,4	+0,3	+0,6	-1,5	-0,8	0,9	-0,3	-0,3
L4/L5	-0,1	+0,	+0,4	-0,2 ↓	-1,6 ↓	-2,1 ↓	-1,5 ↓↓	-0,5	+0,5 ↑
L3/L4	-1,1 ↓	-0,6 ↓↓	+0,2	-1,2	-1,5 ↓↓	-1,0	-0,3	-0,1	-0,5
L2/L3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,4	-0,2	-1,6 ↓↓	-0,1	+0,6 ↑	-0,7
L1/L2	0,0	-1,1 ↓	-0,8 ↓	-0,6	-2,2 ↓	+0,2	-0,4	-1,0	-1,0 ↓
Th12/L1	-0,4	-0,2 ↓	-0,6 ↓	-0,9 ↓↓↓	-0,4	-0,2	-1,8 ↓	-1,1 ↓	-1,1.
Th11/Th12	-0,5	-0,6	+0,9 ↑↑	+0,7 ↑	-1,1 ↓	0,0	-0,8	-0,9	-0,4
Th10/Th11	0,0	-0,8 ↓	+0,4	-1,0 ↓	-1,2	0,0	-0,6	-0,4	-1,6
Th9/Th10	-0,5	0,0	-0,1	-0,5	-2,1 ↓	-1,4 ↓↓	+1,5 ↑	-0,5	+0,4
Th8/Th9	+0,8	0,0	+0,6	-0,3	-1,1 ↓	-1,0 ↓↓	-0,6 ↓↓↓	-0,4	+0,7 ↑↑

Tabelle 13: Vergleich morgentlichen und abendlichen Messergebnisse der posterioren Höhe des männlichen Probanden.

---: Der morgentliche Mittelwert war größer als der der abendlichen Messung, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin abgenommen (-).

---: Der abendliche Mittelwert war größer als der morgentliche Mittelwert, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin zugenommen (+).

Tabelle 14 morgens vs. abends	Tag 1 Höhe Mitte abends-morgens (mm)			Tag 2 Höhe Mitte abends-morgens (mm)			Tag 3 Höhe Mitte abends-morgens (mm)		
	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm
	L5/S1	+0,1	-0,3 ↓	-0,1	-0,2	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6
L4/L5	-0,1	-0,4	-0,1	-0,5 ↓	-0,7 ↓	-0,5 ↓↓	-0,6 ↓	-0,3	-0,3
L3/L4	-0,4 ↓	-0,4	0,0	-0,6 ↓	-1,1 ↓↓	-0,7	-0,2	-0,1	-1,3 ↓↓↓
L2/L3	-1,0 ↓	0,0	-0,7	-0,5	-0,7	-1,4 ↓	-0,2	0,0	-1,1 ↓↓
L1/L2	0,0	+0,2	-0,2	-0,4	-0,6 ↓	-0,8	-0,4	-0,4	-0,3
Th12/L1	+0,3	0,0	-0,1	-1,2 ↓	-0,7	-0,9	-0,2	-0,2	n-0,5
Th11/Th12	-0,2	+0,5	+0,6	-0,5 ↓	-0,5 ↓	-0,9 ↓	-0,2	-0,6	-1,0 ↓
Th10/Th11	-0,4	-0,2	-0,2 ↓	-0,6 ↓	-0,3	-0,5	-0,5 ↓↓↓	-0,3	-0,7 ↓
Th9/Th10	-0,5	-0,2	-0,6 ↓	-0,5	-0,6	-0,5	+0,2	-0,1 ↓↓↓	0,0
Th8/Th9	-0,5	+0,3	0,0	-0,3	-0,1	+0,2	-0,2	+0,1	-0,5.

Tabelle 14: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der Höhe in der Mitte der Bandscheibe des männlichen Probanden.

---: Der morgendliche Mittelwert war größer als der der abendlichen Messung, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin abgenommen (-).

---: Der abendliche Mittelwert war größer als der morgendliche Mittelwert, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin zugenommen. (+)

Ergebnisse

Tabelle 15 morgens vs. abends	Tag 1 ap-Länge morgens-abends (mm)			Tag 2 ap-Länge morgens-abends (mm)			Tag 3 ap-Länge morgens-abends (mm)		
	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm
	L5/S1	+1,1	0,0	+0,8	-0,3	+0,7	-0,9	+0,1	-0,9
L4/L5	+0,4	-0,4	0,0	-0,1	-0,7	-0,6	-0,2	-0,6	-0,4
L3/L4	-0,5	+0,6	0,0	-0,1	-0,7	-0,6	+1,0	-0,2	+0,8
L2/L3	-0,6	+0,6	+0,3	-0,5	-0,7	-0,2	-0,1	-0,8	-1,1
L1/L2	+0,6	+0,1	+0,5	-0,5	-0,1	0,0	0,0	+1,0	+0,4
Th12/L1	+0,4	+1,1	+0,7	-0,3	-0,9	-0,1	-0,1	-0,9	0,0
Th11/Th12	+0,2	+0,1	-0,2	+0,6	-0,4	-0,2	+0,2	-0,1	0,0
Th10/Th11	+0,2	+0,3	+0,9	-0,5	+0,7	-0,3	+0,4	+0,2	+0,1
Th9/Th10	-0,1	+0,6	+0,9	0,0	0,0	-0,6	-0,9	-0,3	+0,9
Th8/Th9	-1,5	-0,7	-0,7	-0,8	+0,2	-1,4	-0,4	-0,7	-0,4

Tabelle 15: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der ap-Länge des männlichen Probanden.

---: Der morgendliche Mittelwert war größer als der der abendlichen Messung, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin abgenommen (-).

---: Der abendliche Mittelwert war größer als der morgendliche Mittelwert, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin zugenommen (+).

### 3.1.3 Differenz der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen

Es wurde der Mittelwert der Gesamtwerte für die Tage 1 bis 3 berechnet. Dazu wurde die jeweilige Bandscheibengröße von L5/S1 bis Th8/Th9 von Tag 1 mit Tag 2 und Tag 3 addiert und der Mittelwert aus dieser Summe gebildet, sowie die Standardabweichungen errechnet. Dies wurde sowohl für die morgendlichen Messungen, wie auch für die abendlichen Messungen durchgeführt. Anschließend wurde die Differenz der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen berechnet indem der abendliche Mittelwert der Gesamtwerte von dem morgendlichen Mittelwert der Gesamtwerte subtrahiert wurde.

<b>Tabelle 16</b> <b>T1 männl.</b> <b>morgens</b>	<b>Mittelwert der</b> <b>Gesamtwerte</b> <b>Tage 1 bis 3 (in</b> <b>mm)</b>	<b>Standard-</b> <b>abweichung (in</b> <b>mm)</b>	<b>T1 männl.</b> <b>abends</b>	<b>Mittelwert der</b> <b>Gesamtwerte</b> <b>Tage 1 bis 3</b> <b>(in mm)</b>	<b>Standard-</b> <b>abweichung (in</b> <b>mm)</b>	<b>Differenzen d.arithm.</b> <b>Mittelwerte abends –</b> <b>morgens</b> <b>(in mm)</b>	
<b>ant</b>	308	33,7	<b>ant</b>	304,5	4,3	<b>ant</b>	-3,5
<b>post</b>	206,2	13,7	<b>post</b>	191,2	6,4	<b>post</b>	-15
<b>Mitte</b>	264,1	5,7	<b>Mitte</b>	255,7	2,1	<b>Mitte</b>	-8,4
<b>ap</b>	1000,7	6,1	<b>ap</b>	998,8	5,7	<b>ap</b>	-1,9

Tabelle 16: Sequenz T1, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des männlichen Probanden. Anteriore Höhe (ant); Posteriore Höhe (post); Höhe in der Mitte der Bandscheibe (Mitte); ap-Länge (ap).

Ergebnisse

<b>Tabelle 17</b> T2 männl. morgens	<b>Mittelwert der Gesamtwerte Tage 1 bis 3 (in mm)</b>	<b>Standard- abweichung (in mm)</b>
ant	328,4	31,3
post	197	7,5
Mitte	265,7	4,1
ap	991,3	4,8

T2 männl. abends	<b>Mittelwert der Gesamtwerte Tage 1 bis 3 (in mm)</b>	<b>Standard- abweichung (in mm)</b>
ant	315,9	7,7
post	189,3	1,7
Mitte	254,8	0,5
ap	991,8	5,1

<b>Differenzen d.arithm. Mittelwerte abends – morgens (in mm)</b>	
ant	-12,5
post	-7,7
Mitte	-10,9
ap	-0,5

Tabelle 17: Sequenz T2, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des männlichen Probanden. Anteriore Höhe (ant); Posteriore Höhe (post); Höhe in der Mitte der Bandscheibe (Mitte); ap-Länge (ap).

<b>Tabelle 18</b> TIRM männl. morgens	<b>Mittelwert der Gesamtwerte Tage 1 bis 3 (in mm)</b>	<b>Standard- abweichung (in mm)</b>
ant	346,5	13,2
post	223,0	13,0
Mitte	291,9	8,1
ap	962,5	4,6

TIRM männl. abends	<b>Mittelwert der Gesamtwerte Tage 1 bis 3 (in mm)</b>	<b>Standard- abweichung (in mm)</b>
ant	331,3	9,9
post	214,2	5,7
Mitte	279,1	2,5
ap	961,6	5,7

<b>Differenzen d.arithm.Mittelwerte abends – morgens (in mm)</b>	
ant	-15,2
post	-8,8
Mitte	-12,8
ap	-0,9

Tabelle 18: Sequenz TIRM, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des männlichen Probanden. Anteriore Höhe (ant); Posteriore Höhe (post); Höhe in der Mitte der Bandscheibe (Mitte); ap-Länge (ap).

## **3.2 Ergebnisse der Messungen des weiblichen Probanden**

Die formale Struktur dieses Abschnittes ist identisch mit der des zuvor auf den Seiten 31 und 32 geschilderten Struktur der Darstellung der Daten des männlichen Probanden.

### **3.2.1 Vergleich der Sequenzen**

Der Sequenzvergleich erfolgt analog der Struktur des Abschnittes 3.1.1.

#### ***3.2.1.1 Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM***

Die **Tabellen 19 und 20** (Seiten 47 und 48) zeigen die Ergebnisse des Vergleiches der Sequenzen T1 und TIRM für alle drei Messtage des weiblichen Probanden. Formal entsprechen sie den Tabellen 6 und 7 des männlichen Probanden.

#### ***3.2.1.2 Vergleich der Sequenzen T2 und T1***

Die **Tabellen 21 und 22** (Seiten 49 und 50) zeigen die Ergebnisse des Vergleiches der Sequenzen T1 und T2 für alle drei Messtage des weiblichen Probanden. Formal entsprechen sie den Tabellen 8 und 9 des männlichen Probanden.

#### ***3.2.1.3 Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM***

Die **Tabellen 23 und 24** (Seiten 51, 52) zeigen die Ergebnisse des Vergleiches der Sequenzen T2 und TIRM für alle drei Messtage des weiblichen Probanden. Formal entsprechen sie den Tabellen 10 und 11 des männlichen Probanden.

Tabelle 19 T1 vs. TIRM	anteriore Höhe morgens T1-TIRM (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	-0,6 ↓↓	-0,9 ↓	+0,6
L4/L5	-2,5	-2,0 ↓	-1,0
L3/L4	-1,8	+0,9	-0,6
L2/L3	-0,7	-0,4	-0,1
L1/L2	-0,3	-0,5	-1,1
Th12/L1	-0,5	-0,9	-0,5 ↓
Th11/Th12	-0,4 ↓↓	-1,3	0,0
Th10/Th11	-1,0 ↓↓	-0,9 ↓	-1,0
Th9/Th10	-0,4	-1,5 ↓	-0,4 ↓
Th8/Th9	+0,1	-0,8	+0,1

anteriore Höhe abends T1-TIRM (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-0,2	+0,3	0,0
-0,5	-0,8 ↓	-0,1
-0,6	+0,5	-0,9
-0,9 ↓↓	-1,6 ↓	0,0
-0,8	+0,8	-0,1
-0,5 ↓	+0,1	-1,3
-0,1	+0,1	-0,2
-2,3 ↓↓↓	+0,7	-0,4
-1,0.	-0,8	-1,6 ↓↓
-0,5 ↓↓	+0,4	+0,3

posteriore Höhe morgens T1-TIRM (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
0,0	-0,1	-1,0
-1,8	-0,7	-0,3
-1,6	-1,5 ↓	-0,6
-0,7	+0,9	-0,4
-0,5	+0,4	-1,0 ↓
-1,6	+0,4	-0,1
+0,4	-0,5	+0,2
-0,7	+0,2	-0,2
-0,1	-0,6 ↓	-0,3
-0,4 ↓	-1,1 ↓	+0,2

posteriore Höhe abends T1-TIRM (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-0,6	-0,6 ↓	+0,4
-2,8 ↓	-0,6	-2,5 ↓
-1,7 ↓	-1,9	0,0
+0,4	-0,1	+0,5
-0,1	-1,2	-1,3 ↓
-1,0 ↓	-0,4	-1,1 ↓↓
-0,5	-0,1	0,0
-0,7	-0,5 ↓	-0,2 ↓
-0,8 ↓↓	-0,5	0,0
-1,7	-0,1	+0,2

Tabelle 19: Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe.  
 Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T1 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz TIRM.  
 Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der TIRM Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T1.

Tabelle 20 T1 vs. TIRM	Höhe Mitte morgens T1-TIRM (mm)			Höhe Mitte abends T1-TIRM (mm)			ap-Länge morgens T1-TIRM (mm)			ap-Länge abends T1-TIRM (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	-0,9	-0,9 ↓	-0,5	-0,9 ↓	-0,6	-0,8	-0,1	+0,1	+0,2	+0,3	+0,9 ↑	-0,1
L4/L5	-1,4 ↓↓↓	-1,0	-0,6	-0,8 ↓↓	-1,2 ↓↓↓	-0,9 ↓	+0,9 ↑	0,0	+0,6	+0,3	+0,4	+1,0
L3/L4	-0,2	-0,3 ↓	-0,3	-0,6 ↓	-0,7	-0,3	+2,0 ↑	+0,5	+0,9	+1,5 ↑	+0,8 ↑	+1,4 ↑
L2/L3	-1,0	-0,8 ↓	-0,9 ↓	-0,8	-0,5	-0,6	+1,0	+0,6	+0,6	+1,0 ↑	+0,2	+0,4
L1/L2	-0,6 ↓↓	-0,2	-1,2 ↓	-0,7	-0,7	-0,9	+0,7	+0,7	+1,8	+1,5 ↑	+1,3	+1,7 ↑↑
Th12/L1	-0,5 ↓	-0,5 ↓↓	-0,8 ↓↓	-0,5 ↓↓	-0,2	-1,0 ↓	+1,3 ↑↑	+0,8 ↑	+0,6	+0,6	+1,4	+0,9 ↑↑
Th11/Th12	-0,6	-0,5 ↓	-0,2	-0,4	-0,3 ↓	-0,4	+1,1	+1,8 ↑	+0,9 ↑↑	+1,1	+2,5 ↑↑↑	+1,0
Th10/Th11	-0,8 ↓↓	-0,9 ↓	-0,7 ↓	-1,1 ↓↓	-0,9 ↓↓	-0,9 ↓↓	+0,7	+1,0 ↑↑	+1,0 ↑	+0,9 ↑	+1,3 ↑	+0,9 ↑
Th9/Th10	-1,0 ↓	-1,0 ↓↓	-0,6 ↓↓	-0,9 ↓	-1,4 ↓↓	-0,5	+1,3	+1,0 ↑	-0,4 ↓↓	+0,8 ↑	+0,2	+1,2 ↑↑
Th8/Th9	-1,2 ↓↓	-1,1 ↓	-1,1 ↓↓	-0,6	-0,9 ↓	-0,7	+1,1 ↑↑	+1,3	+1,7 ↑↑	+1,1 ↑	+1,6 ↑	+1,1

Tabelle 20: Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T1 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz TIRM.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der TIRM Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T1.

Tabelle 21 T1 vs. T2	anteriore Höhe morgens T1-T2 (mm)			anteriore Höhe abends T1-T2 (mm)			posteriore Höhe morgens T1-T2 (mm)			posteriore Höhe abends T1-T2 (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	-0,8	+0,9	+0,2	+0,1	+0,8	-0,6	-1,4 ↓	-0,4	-1,6 ↓	-2,0 ↓	-1,5 ↓	-0,6 ↓
L4/L5	-2,3	-1,3 ↓	-0,5	+1,8 ↑	-0,8	-0,7	+0,7	-0,5	-0,6	-1,2	-0,2	-1,1
L3/L4	-0,6	+0,3	0,0	+0,6 ↑↑	+1,1	+0,3	-0,8	0,0	+1,8 ↑	-0,1	+2,0	+0,8
L2/L3	-0,2	+0,8 ↑	+0,1	-1,3 ↓↓↓	-0,3	+1,0	+1,4	+3,0 ↑	+0,3	+1,9 ↑	0,0	+0,9
L1/L2	-0,1	-1,3 ↓↓	-0,1	+0,3	+0,8	+0,1	+0,4	-0,1	+0,8 ↑	-0,3 ↓↓	+1,5 ↑↑	+0,3
Th12/L1	+0,9	-0,3	+0,6	-0,5	-0,1	-0,4	+1,0 ↑↑	-0,6	+0,6	-0,9	+0,5	+0,2
Th11/Th12	-1,0 ↓	-0,9	-1,0 ↓	-0,9	-1,0 ↓	-0,1	+1,1 ↑	+0,5	+1,6	+1,0 ↑	+0,6 ↑	+1,6 ↑↑
Th10/Th11	0,0	-0,2	-1,2 ↓	-0,3	+0,7	+0,2	+0,5	-0,8	+0,2	+0,8 ↑	+0,4	+0,4
Th9/Th10	-0,1	-1,0 ↓	-0,4	+0,1	-0,6	-0,2	+1,0	-0,4	+0,4	0,0	+0,8 ↑↑	+0,4
Th8/Th9	+0,1	-0,1	-0,1	+0,8 ↑	-0,9	+0,6	-0,2	-0,4	+0,7	-0,1	-0,3	+0,2

Tabelle 21: Vergleich der Sequenzen T1 und T2 des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe.  
  Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T1 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T2.  
  Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T2 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T1.

Ergebnisse

Tabelle 22 T1 vs. T2	Höhe Mitte morgens T1-T2 (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	-0,2 ↓	+0,1	-0,1
L4/L5	-0,4 ↓↓	-0,1	+0,4
L3/L4	+0,2	0,0	-0,2 ↓
L2/L3	0,0	-0,3	-0,2 ↓
L1/L2	-0,1 ↓↓↓	+0,4	-0,3
Th12/L1	0,0	-0,1	-0,2
Th11/Th12	0,0	+0,1 ↑↑↑	0,0
Th10/Th11	0,0	-0,1	-0,1
Th9/Th10	-0,3 ↓	+0,1	+0,4 ↑
Th8/Th9	-0,2	-0,1	-0,2

Höhe Mitte abends T1-T2 (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
0,0	+0,1	-0,2
+0,1	-0,3	+0,2 ↑
-0,1	+0,2	+0,2
+0,1	+0,1	-0,1
-0,3	-0,3	0,0
+0,1	+0,1	-0,2
0,0	0,0	+0,2
-0,1	-0,1	+0,1
0,0	+0,1	+0,1
+0,1	0,0	+0,3 ↑

ap-Länge morgens T1-T2 (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-1,4	-1,0 ↓↓	-0,8
+0,1	-0,4	+0,2
+1,2	-0,2	+0,6 ↑
+0,1	-0,4	+0,6
0,0	-0,1	+0,7
+0,7 ↑	+0,1	+0,2
+1,1 ↑↑	+1,0 ↑↑	+0,7 ↑↑
0,0	+0,7	+0,6 ↑↑
+0,5 ↑	+0,1	+1,0 ↑↑
+0,2	+0,1	+0,3

ap-Länge abends T1-T2 (mm)		
Tag 1	Tag 2	Tag 3
-0,9	-0,1	-0,2
-0,5	+0,1	-0,2
+0,8	+0,1	+0,3
+0,2	-0,4	-0,6
+0,9 ↑	+0,5	+0,8
+0,4	+1,0	+0,9 ↑↑
+0,8 ↑	+1,1 ↑↑	+1,0
+0,6 ↑↑	+0,8 ↑	+0,3
+0,3	0,0	+0,3
+0,2	+0,9 ↑	+0,3

Tabelle 22: Vergleich der Sequenzen T1 und T2 des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T1 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T2.

■ Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T2 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T1.

Tabelle 23 T2 vs. TIRM	anteriore Höhe morgens T2-TIRM (mm)			anteriore Höhe abends T2-TIRM (mm)			posteriore Höhe morgens T2-TIRM (mm)			posteriore Höhe abends T2-TIRM (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	+0,2	-1,8 ↓↓	+0,4	+0,3	-0,5	+0,6	+1,4 ↑	+0,3 ↑	+0,6	+1,4 ↑	+0,9 ↑	+1,0 ↑
L4/L5	0,2	-0,7	-0,5	-2,3 ↓	0,0	-0,8	-2,5 ↓	-0,2	0,0	-1,6 ↓	-1,7 ↓	-1,4 ↓↓
L3/L4	-1,2	-0,6	-0,6 ↓	-1,2 ↓	-0,6	-0,6	-0,8 ↓	+1,5 ↑↑	-2,4 ↓	-1,6 ↓↓	-2,1 ↓↓	-0,8
L2/L3	-0,5 ↓	-1,2 ↓	-0,2	+0,4 ↑	-1,3 ↓	-1,0 ↓	-2,1 ↓	-2,1 ↓	-0,7	-1,5	-1,2	-0,4 ↓
L1/L2	-0,2	+0,8 ↑	-1,0 ↓	+0,5	0,0	-0,2	+0,1	+0,5	-1,8 ↓↓	+0,2	-1,9	-1,6
Th12/L1	-0,4	-0,6	-1,1 ↓	0,0	-0,2	-0,9	-2,6 ↓	-0,2	-0,7 ↓	-0,1	-0,6 ↓↓	-0,9 ↓
Th11/Th12	+0,6	-0,4 ↓	+1,0 ↑↑	-0,8	-1,1 ↓↓	+0,3	-0,7	-1,0	-1,4 ↓	-1,5	-0,8 ↓	-0,4 ↓
Th10/Th11	-1,0 ↓	-0,7	-0,2	-2,0 ↓	0,0	-0,6	-1,2	-0,6 ↓	-0,4	-1,5 ↓	-0,9 ↓↓	-0,6
Th9/Th10	0,0	-0,5 ↓	0,0	-1,1 ↓↓	-0,2	-1,4 ↓↓↓	-1,1	-1,0 ↓↓	-0,7 ↓	-0,8	-0,3	-0,4
Th8/Th9	0,0	-0,7	+0,2	-1,3 ↓	+1,3 ↑↑	-0,3	-0,2	-1,5 ↓	-0,5 ↓↓	-1,6	-0,2	0,0

Tabelle 23: Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe.  
  Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T2 Sequenz gemessen, größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz TIRM.  
  Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der TIRM Sequenz gemessen, größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T2.

Tabelle 24 T2 vs. TIRM	Höhe Mitte morgens T2-TIRM (mm)			Höhe Mitte abends T2-TIRM (mm)			ap-Länge morgens T2-TIRM (mm)			ap-Länge abends T2-TIRM (mm)		
	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 1	Tag 2	Tag 3
L5/S1	-0,7	-1,0 ↓↓	-0,4	-0,9 ↓	-0,7 ↓	-0,6 ↓	+1,3	+1,1 ↑↑	+1,2	+0,6	+1,0 ↑	+0,1
L4/L5	-1,0 ↓↓	-0,9	-1,0 ↓	-0,9 ↓	-1,5 ↓↓	-1,1 ↓↓	+0,8 ↑↑	+0,4	+0,8 ↑	+0,8 ↑	+0,3	+1,2 ↑
L3/L4	-0,4	-0,3 ↓	-0,1	-0,7	-0,9 ↓	-0,5 ↓	+0,8	+0,7 ↑	+0,3 ↑	+0,7 ↑↑	+0,7	+1,1 ↑↑
L2/L3	-1,0	-0,5 ↓↓	-0,7 ↓	-0,9 ↓↓	-0,6 ↓	-0,7 ↓	+0,9 ↑↑	+1,0	0,0	+0,8 ↑	+0,2	+1,0 ↑↑
L1/L2	-0,5 ↓	-0,6 ↓↓	-0,9 ↓	-0,4	-0,4	-0,9 ↓	+0,7	+0,8 ↑	+1,1	+0,6	+0,8	-0,1
Th12/L1	-0,5	-0,6 ↓↓	-0,6 ↓	-0,6 ↓↓	-0,3	-0,8	+0,6	+0,7 ↑↑	+0,4	+0,2	+0,4	0,0
Th11/Th12	-0,6 ↓	-0,6 ↓	-0,2	-0,4 ↓	-0,3	-0,6 ↓	+0,6	+0,8	+0,2	+0,3	+1,4 ↑↑↑	0,0
Th10/Th11	-0,8 ↓	-0,8 ↓	-0,6 ↓	-1,0 ↓	-0,8 ↓↓	-1,0 ↓	+0,7	+0,3	+0,4	+0,3	+0,7 ↑	+0,6
Th9/Th10	-0,7	-1,1 ↓↓	-1,0 ↓↓	-0,9 ↓↓	-1,5 ↓↓	-0,6	+0,8	+0,9 ↑	+0,6 ↑↑	+0,5 ↑	+0,2	+0,9 ↑
Th8/Th9	-1,0 ↓↓	-1,0 ↓↓	-0,9 ↓↓	-0,7	-0,9 ↓	-1,0 ↓	+0,9 ↑	+1,2	+1,4 ↑	+0,9 ↑↑	+0,7 ↑↑	+1,8

Tabelle 24: Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge.

--- Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der T2 Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz TIRM.

--- Hier war die Messgröße der Bandscheibe in der TIRM Sequenz gemessen größer als die Messgröße gemessen in der Sequenz T2.

### 3.2.2 Vergleich der morgendlichen und abendlichen Messungen der Daten des weiblichen Probanden

Formal entspricht die Struktur dem Abschnitt 3.1.2 – nur dass die Daten des weiblichen Probanden gezeigt werden.

Die **Tabelle 25** (Seite 54) zeigt die Ergebnisse des Vergleiches der morgendlichen mit der abendlichen Messung der **anterioren Höhe** des weiblichen Probanden.

Die **Tabelle 26** (Seite 55) zeigt die Ergebnisse des Vergleiches der morgendlichen mit der abendlichen Messung der **posterioren Höhe** des weiblichen Probanden.

Die **Tabelle 27** (Seite 56) zeigt die Ergebnisse des Vergleiches der morgendlichen mit der abendlichen Messung der **Höhe in der Mitte der Bandscheibe** des weiblichen Probanden.

Die **Tabelle 28** (Seite 57) zeigt die Ergebnisse des Vergleiches der morgendlichen mit der abendlichen Messung der **ap-Länge** der Bandscheibe des weiblichen Probanden.

Tabelle 25 ab vs. mo	Tag 1 anteriore Höhe abends- morgens (mm)			Tag 2 anteriore Höhe abends- morgens (mm)			Tag 3 anteriore Höhe abends- morgens (mm)		
	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm
	L5/S1	-0,4	+0,5	+0,1	+1,0 ↑	+0,9 ↑	-0,3	+0,5 ↑↑	-0,3
L4/L5	-3,8 ↓↓	+0,3	-1,7 ↓	-0,5	0,0	-1,2 ↓↓	-2,0 ↓	-0,8 ↓	-1,7 ↓
L3/L4	-0,4	+0,8	-0,4	-0,8 ↓↓	0,0	+0,4	-0,8 ↓	-1,1	-0,8
L2/L3	-0,1	-1,2	-1,0 ↓↓	-0,3	-1,4 ↑↑	-0,2	-2,1 ↓↓	-1,2	-1,3 ↓
L1/L2	+0,3	+0,7	-0,3	-1,6 ↓	+0,5	-0,8 ↓	-0,4	-0,2	-1,2 ↓
Th12/L1	+0,1	-1,3	+0,8	0,0	+0,2	-0,8	-0,6	-1,6 ↓↓	-0,8
Th11/Th12	-0,6	+1,3 ↑	+0,8 ↑	-0,1	-0,2	-1,6 ↓↓	-0,7 ↓	+0,2	0,0
Th10/Th11	-0,2	-0,5 ↓	+0,8 ↑	+0,4	+1,3	-0,3	-1,4 ↓	0,0	-0,6
Th9/Th10	-0,7 ↓↓	-0,5	+0,4 ↑	-0,5	-0,1	-0,8 ↓↓	-0,4	-0,2	+1,0 ↑↑
Th8/Th9	-0,5	+0,2	+1,2	+0,6 ↑	-0,2	-1,4 ↓	-0,3	+0,4	+0,2

Tabelle 25: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der anterioren Höhe des weiblichen Probanden.

---: Der morgendliche Mittelwert war größer als der der abendlichen Messung, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin abgenommen (-).

---: Der abendliche Mittelwert war größer als der morgendliche Mittelwert, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin zugenommen (+).

Tabelle 26 ab vs. mo	Tag 1 posteriore Höhe abends- morgens (mm)			Tag 2 posteriore Höhe abends- morgens (mm)			Tag 3 posteriore Höhe abends- morgens (mm)		
	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm	t2	t1	tirm
	L5/S1	+0,1	-0,5	+0,1	+0,4	-0,7 ↓	-0,2	-0,9 ↓	+0,1
L4/L5	0,0	-1,9	-0,9 ↓	-0,7	-0,4	+0,8	-0,6 ↓	-1,4	+0,8 ↑
L3/L4	-0,9 ↓	-0,2	-0,1	-4,1 ↓↓↓	-2,1	-0,5	-0,6 ↓	-1,6	-2,2 ↓↓
L2/L3	-0,2	+0,3	-0,8	+0,8	-2,2	-0,1	-0,9 ↓	-0,3	-1,2 ↓
L1/L2	+0,6 ↑	-0,1	+0,5	-3,8 ↓↓	-1,7 ↓	-0,9	-1,1 ↓	-1,6 ↓↓	-1,3 ↓
Th12/L1	+1,0	-0,9	+1,5 ↑	-1,9 ↓	-2,0	-1,5 ↓↓	-0,3	-1,1	-0,1
Th11/Th12	-0,5	-0,6 ↓	+0,3	-1,0	-0,9	-1,2	-0,6	-0,6	-0,4
Th10/Th11	-0,5	-0,2	-0,2	-0,5	-0,9 ↓	-0,2	-0,6 ↓	-0,4	-0,4
Th9/Th10	+0,6	-0,4	+0,3	-0,6 ↓	-0,2	-1,3 ↓	-0,5	-0,5	-0,8 ↓↓
Th8/Th9	-0,4 ↓	-0,3	+1,0	-0,7 ↓	0,0	-1,0 ↓↓	0,0	-0,5	-0,5

Tabelle 26: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der posterioren Höhe des weiblichen Probanden.

---: Der morgendliche Mittelwert war größer als der der abendlichen Messung, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin abgenommen (-).

---: Der abendliche Mittelwert war größer als der morgendliche Mittelwert, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin zugenommen (+).

Ergebnisse

Tabelle 27 ab vs. mo	Tag 1 Höhe Mitte			Tag 2 Höhe Mitte			Tag 3 Höhe Mitte		
	abends- morgens (mm)		tirm	abends- morgens (mm)		tirm	abends- morgens (mm)		tirm
	t2	t1		t2	t1		t2	t1	
L5/S1	-0,4	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,6	-0,5	-0,6	-0,3
					↓	↓	↓↓		
L4/L5	-1,0	-0,5	-1,1	-0,6	-0,2	0,0	-0,3	-0,5	-0,2
	↓↓	↓↓↓	↓↓					↓	
L3/L4	-0,5	-0,6	-0,2	-0,9	-0,7	-0,3	-0,7	-0,3	-0,3
		↓		↓	↓		↓↓		
L2/L3	-0,6	-0,5	-0,7	-0,6	-0,2	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8
	↓↓			↓↓		↓↓	↓	↓	↓↓
L1/L2	-0,3	-0,5	-0,4	0,0	-0,7	-0,2	-0,7	-0,4	-0,7
	↓						↓↓		↓
Th12/L1	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-0,6	-0,4
				↓		↓	↓	↓	↓
Th11/Th12	-0,2	-0,2	-0,4	-0,2	-0,3	-0,5	-0,6	-0,4	-0,2
						↓	↓	↓	
Th10/Th11	-0,2	-0,3	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,6	-0,4	-0,2
		↓					↓↓	↓	↓↓↓
Th9/Th10	-0,1	-0,2	+0,1	-0,4	-0,4	0,0	-0,2	-0,5	-0,6
		↓						↓	↓
Th8/Th9	-0,4	-0,1	-0,7	-0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,1	-0,3
	↓						↓↓		

Tabelle 27: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der Höhe in der Mitte der Bandscheibe des weiblichen Probanden.

---: Der morgendliche Mittelwert war größer als der der abendlichen Messung, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin abgenommen (-).

---: Der abendliche Mittelwert war größer als der morgendliche Mittelwert, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin zugenommen (+).

Ergebnisse

Tabelle 28 ab vs. mo	Tag 1 ap-Länge			Tag 2 ap-Länge			Tag 3 ap-Länge		
	abends- morgens (mm)		tirm	abends- morgens (mm)		tirm	abends- morgens (mm)		tirm
	t2	t1		t2	t1		t2	t1	
L5/S1	-0,4	+0,1	+0,3	-0,3	+0,6	-0,2	-0,4	+0,2	+0,7
L4/L5	0,0	-0,6	0,0	-0,4	-0,1	-0,3	+0,4	+0,4	0,0
L3/L4	+0,1	-0,3	+0,2	+0,4	+0,7	+0,4	+0,7	+0,4	-0,1
L2/L3	+0,2	+0,3	+0,3	+0,1	+0,1	+0,9	+0,8	-0,4	-0,2
L1/L2	-0,3	+0,6	-0,2	+0,2	+0,8	+0,2	-0,7	+0,4	+0,5
Th12/L1	+0,2	-0,1	+0,6	-0,3	+0,6	0,0	-0,6	+0,1	+0,2
Th11/Th12	-0,1	-0,4	-0,4	-0,1	0,0	-0,7	-0,4	-0,1	-0,2
Th10/Th11	-0,3	+0,3	+0,1	+0,1	+0,2	-0,	-0,1	-0,4	-0,3
Th9/Th10	-0,1	+0,3	+0,2	-0,1	-0,2	+0,6	-0,3	-1,0	-0,6
Th8/Th9	+0,2	+0,2	+0,2	-0,6	+0,2	-0,1	+1,2	0,2	+0,8

Tabelle 28: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der Höhe in der Mitte der Bandscheibe des weiblichen Probanden.

—: Der morgendliche Mittelwert war größer als der der abendlichen Messung, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin abgenommen (-).

—: Der abendliche Mittelwert war größer als der morgendliche Mittelwert, die Bandscheibengröße hat zum Abend hin zugenommen (+).

### 3.2.3 Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen

Es wurde der Mittelwert der Gesamtwerte für die Tage 1 bis 3 berechnet. Dazu wurde die jeweilige Bandscheibengröße von L5/S1 bis Th8/Th9 von Tag 1 mit Tag 2 und Tag 3 addiert und der Mittelwert aus dieser Summe gebildet, sowie die Standardabweichungen errechnet. Dies wurde sowohl für die morgendlichen Messungen, wie auch für die abendlichen Messungen durchgeführt. Anschließend wurde die Differenz der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen berechnet indem der abendliche Mittelwert der Gesamtwerte von dem morgendlichen Mittelwert der Gesamtwerte subtrahiert wurde.

<b>Tabelle 29</b> <b>T1 weibl.</b> <b>morgens</b>	<b>Mittelwert der Gesamtwerte</b> <b>Tag 1 bis 3</b> <b>(in mm)</b>	<b>Standard-</b> <b>abweichung (in</b> <b>mm)</b>
<b>ant</b>	248,7	6,3
<b>post</b>	208,9	12,1
<b>Mitte</b>	245,0	1,2
<b>ap</b>	847,9	4,9

<b>T1 weibl.</b> <b>abends</b>	<b>Mittelwert der Gesamtwerte</b> <b>Tag 1 bis 3</b> <b>(in mm)</b>	<b>Standard-</b> <b>abweichung</b> <b>(in mm)</b>
<b>ant</b>	244,9	10,3
<b>post</b>	185,1	4,1
<b>Mitte</b>	234,7	3,3
<b>ap</b>	850,6	0,8

<b>Differenzen d. arithm.</b> <b>Mittelwerte abends –</b> <b>morgens</b> <b>(in mm)</b>	
<b>ant</b>	-3,8
<b>post</b>	-23,8
<b>Mitte</b>	-10,3
<b>ap</b>	2,7

Tabelle 29: Sequenz T1, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des weiblichen Probanden. Anteriore Höhe (ant); Posteriore Höhe (post); Höhe in der Mitte der Bandscheibe (Mitte); ap-Länge (ap).

Ergebnisse

<b>Tabelle 30</b>	<b>Mittelwert der Gesamtwerte Tage 1 bis 3 (in mm)</b>	<b>Standardabweichung (in mm)</b>
<b>T2 weibl. morgens</b>		
<b>ant</b>	258	4,3
<b>post</b>	196	10,5
<b>Mitte</b>	246,2	2
<b>ap</b>	842,1	2

<b>T2 weibl. abends</b>	<b>Mittelwert der Gesamtwerte Tage 1 bis 3 (in mm)</b>	<b>Standardabweichung (in mm)</b>
<b>ant</b>	241,7	13,1
<b>post</b>	179,5	7,6
<b>Mitte</b>	233,2	4,1
<b>ap</b>	841,1	1,3

<b>Differenzen d.arithm.Mittelwerte abends – morgens (in mm)</b>	
<b>ant</b>	-16,3
<b>post</b>	-16,5
<b>Mitte</b>	-13
<b>ap</b>	-1

Tabelle 30: Sequenz T2, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des weiblichen Probanden. Anteriore Höhe (ant); Posteriore Höhe (post); Höhe in der Mitte der Bandscheibe (Mitte); ap-Länge (ap).

<b>Tabelle 31</b>	<b>Mittelwert der Gesamtwerte Tage 1 bis 3 (in mm)</b>	<b>Standardabweichung (in mm)</b>
<b>TIRM weibl. morgens</b>		
<b>ant</b>	267,8	8,8
<b>post</b>	218,5	3,2
<b>Mitte</b>	267,6	2,8
<b>ap</b>	820	1

<b>TIRM weibl. abends</b>	<b>Mittelwert der Gesamtwerte Tage 1 bis 3 (in mm)</b>	<b>Standardabweichung (in mm)</b>
<b>ant</b>	254,9	6,1
<b>post</b>	203,4	10,3
<b>Mitte</b>	256	3,5
<b>ap</b>	822,4	1,8

<b>Differenzen d.arithm. Mittelwerte abends – morgens (in mm)</b>	
<b>ant</b>	-12,9
<b>post</b>	-15,1
<b>Mitte</b>	-11,6
<b>ap</b>	2,4

Tabelle 31: Sequenz TIRM, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des weiblichen Probanden. Anteriore Höhe (ant); Posteriore Höhe (post); Höhe in der Mitte der Bandscheibe (Mitte); ap-Länge (ap).

### **3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der humanen Datensätze**

#### **3.3.1 Vergleich der Messungen der Sequenzen T1 und TIRM**

Vergleicht man die Sequenzen T1 und TIRM (männliche Daten Tabellen 6 und 7, weibliche Daten Tabellen 19 und 20), so beobachtet man, dass bei den vorliegenden signifikant unterschiedlichen Ergebnissen bei den gemessenen Größen „anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“, „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“ diese Größen in der TIRM-Sequenz stets größer sind, als die gemessene Größe in der T1-Sequenz. Jedoch beobachtete man, dass sich die ap-Länge in der T1-Sequenz größer darstellt als in der Sequenz TIRM.

#### **3.3.2 Vergleich der Messungen der Sequenzen T2 und T1**

Betrachtet man die Ergebnisse des Vergleiches der Sequenzen T2 und T1 in den Tabellen 8 und 9 für die Daten des männlichen Probanden und in den Tabellen 21 und 22 für die Daten des weiblichen Probanden, so fällt auf, dass es hier am wenigsten signifikant unterschiedliche Ereignisse gibt.

#### **3.3.3 Vergleich der Messungen der Sequenzen T2 und TIRM**

Auch hier beobachtet man bei dem Auswerten der Tabellen 10 und 11 (Daten des männlichen Probanden) und der Tabellen 23 und 24 (Daten des weiblichen Probanden), dass die gemessenen Größen „anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“ und „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“, bei den signifikant unterschiedlichen Mittelwerten bei dem Vergleich der Sequenz T2 und TIRM, in der TIRM-Sequenz größer sind als in der T2-Sequenz.

Jedoch ist auch hier die ap-Länge, gemessen in Aufnahmen der T2-Sequenz größer, als die ap-Länge gemessen bei Aufnahmen der TIRM-Sequenz.

#### **3.3.4 Vergleich der Daten der morgendlichen und abendlichen Messungen.**

Bei dem Vergleich der Ergebnisse der morgendlichen und abendlichen Messungen, beobachtet man bei den Messungen tendenziell, dass diejenigen Bandscheiben, die einen signifikanten Unterschied beim Vergleich der morgendlichen und abendlichen Messung aufweisen, abends kleiner sind als morgens (Siehe hierzu Tabellen 12 bis 15

für die Daten des männlichen Probanden und die Tabellen 25 bis 28 für die Daten des weiblichen Probanden).

Bei zwei Ausmessungen findet sich ein Ergebnis, bei der die Höhe der Bandscheiben abends größer ist als morgens (Tabelle 12, Tag 1, Daten männlich, anteriore Höhe der Sequenzen T1 und T2). Vergleicht man diese Daten der morgendlichen und abendlichen Messungen mit den dazugehörigen Differenzen der arithmetischen Mittelwerte (Tabelle 16) der Daten des männlichen Probanden, anteriore Höhe der Sequenzen T1 und T2, so findet man jedoch auch hier, dass im Durchschnitt die Bandscheiben abends kleiner sind als morgens.

Auch bei den anderen Daten der Differenzen der arithmetischen Mittelwerte (Tabellen 16 bis 18 der Daten des männlichen Probanden, Tabellen 29 bis 31 des weiblichen Probanden) findet sich, dass die Bandscheibenhöhe von morgens nach abends hin abnimmt.

### **3.4 Ergebnisse der Messungen der Schweinewirbelsäule**

Bei der Schweinewirbelsäule konnten mittels VCT vier Bandscheiben so dargestellt werden, dass an ihnen Messungen der Bandscheiben vorgenommen werden konnten. Jedoch ließen sich lediglich drei Bandscheiben so in den MRT-Messungen abbilden, dass sie adäquat vermessen werden konnten.

#### **3.4.1 Vergleich der MRT-Sequenzen**

Auch hier wurden die MRT-Sequenzen miteinander verglichen indem die Differenz von den Mittelwerten (in mm) gebildet wird (z.B. T1 - TIRM).

Es folgen nun die Ergebnistabellen der Vergleiche der Sequenzen der Schweinewirbelsäule.

Vergleich Sequenz T1 und TIRM T1 - TIRM (in mm)				
Tabelle 32	Höhe ant	Höhe post	Höhe Mitte	ap-Länge
Bandscheibe 1	-0,8	-0,8	-1,9 ↓↓	+2,0 ↑↑
Bandscheibe 2	-1,4	-0,8 ↓	-1,4 ↓	-0,9
Bandscheibe 3	-1,2 ↓	-0,4	-1,4 ↓	+0,4 ↑↑↑

Tabelle 32: Schweinewirbelsäule Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM.

Die Messgröße in der Sequenz TIRM war größer als die der Sequenz T1.

Die Messgröße in der Sequenz T1 war größer als die der Sequenz TIRM.

Vergleich Sequenz T1 und T2 T1 - T2 (in mm)				
Tabelle 33	Höhe ant	Höhe post	Höhe Mitte	ap-Länge
Bandscheibe 1	-0,7	+0,4 ↓↓	-0,1	+0,6
Bandscheibe 2	-1,0	-0,3	-0,1	-1,0
Bandscheibe 3	+0,4	+0,6	+0,1	-2,1 ↓↓

Tabelle 33: Schweinewirbelsäule Vergleich der Sequenzen T1 und T2.

Die Messgröße in der Sequenz T2 war größer als die der Sequenz T1.

Die Messgröße in der Sequenz T2 war größer als die der Sequenz T1.

Vergleich Sequenz T2 und TIRM T2 - TIRM (in mm)				
Tabelle 34	Höhe ant	Höhe post	Höhe Mitte	ap-Länge
Bandscheibe 1	-0,1	-1,2 ↓	-1,8 ↓↓	+1,4 ↓↓
Bandscheibe 2	-0,4	-0,5	-1,3 ↓↓	+0,1
Bandscheibe 3	-0,8	-1,0	-1,5 ↓	+2,4 ↓↓

Tabelle 34: Schweinewirbelsäule Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM.

Die Messgröße in der Sequenz TIRM war größer als die der Sequenz T2.

Die Messgröße in der Sequenz T2 war größer als die der Sequenz TIRM.

### 3.4.2 Vergleich der MRT-Sequenzen mit den Aufnahmen des VCTs

Die Messgrößen der verschiedenen MRT-Sequenzen wurden mit den Messgrößen, die mit dem VCT gewonnen worden sind, verglichen und in den folgenden Tabellen aufgelistet.

Vergleich Sequenz T1 und VCT T1- VCT (in mm)				
Tabelle 35	Höhe ant	Höhe post	Höhe Mitte	ap-Länge
Bandscheibe 1	+0,4	+0,6 ↓↓↓	+0,9 ↓	+4,1 ↓↓
Bandscheibe 2	+0,5	+0,1	+0,8 ↓	+0,8
Bandscheibe 3	+0,3	+1,1	+1,2 ↓↓	+0,7

Tabelle 35: Schweinewirbelsäule, Vergleich der MRT-Sequenz T1 mit dem VCT.

--- Messwerte der Sequenz T1 waren größer als die Messgrößen im VCT.

Vergleich Sequenz T2 und VCT T2- VCT (in mm)				
Tabelle 36	Höhe ant	Höhe post	Höhe Mitte	ap-Länge
Bandscheibe 1	+1,1	+0,2 ↓	+1,0 ↓↓	+3,5 ↓↓
Bandscheibe 2	+1,5	+0,2	+0,9	+0,8
Bandscheibe 3	+0,7 ↓	0,5	+1,1 ↓↓	+2,8 ↓

Tabelle 36: Schweinewirbelsäule, Vergleich der MRT-Sequenz T2 mit dem VCT.

--- Messwerte der Sequenz T2 waren größer als die Messgrößen im VCT.

Vergleich Sequenz TIRM und VCT TIRM- VCT (in mm)				
Tabelle 37	Höhe ant	Höhe post	Höhe Mitte	ap-Länge
Bandscheibe 1	+1,2 ↓	+1,4 ↓	+2,8 ↓↓	+2,1 ↓↓
Bandscheibe 2	+1,9 ↓	+0,7	+2,2 ↓↓	+1,7
Bandscheibe 3	+1,5	+1,5	+2,6 ↓↓	+0,3

Tabelle 37: Schweinewirbelsäule, Vergleich der MRT-Sequenz TIRM mit dem VCT.

--- Messwerte der Sequenz TIRM waren größer als die Messgrößen im VCT.

### **3.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Schweinewirbelsäule**

Vergleicht man die Messungen die mittels MRT durchgeführt worden sind mit denen des VCTs, so beobachtet man, dass die erhobenen Daten der MRT-Messungen tendenziell größer sind, als die der VCT-Messungen. Vergleicht man die MRT-Sequenzen untereinander sind die erhobenen Werte der TIRM-Sequenz größer als die der Sequenzen T1 und T2.

Die Werte der ap-Länge in den Sequenzen T1 und T2 sind tendenziell größer als bei der Sequenz TIRM.

## **4 Diskussion**

Gegenstand dieser Studie war es erstens Landmarken an der menschlichen Wirbelsäule in MRT Aufnahmen zu definieren, die eine standardisierte Analyse von Bandscheibenhöhen und gegebenenfalls auch in einem weiteren Schritt Volumina, möglich machen. Zweitens sollten unter Anwendung dieser Landmarken morphometrische Bandscheibenparameter evaluiert werden. Hierzu sollte das Verhalten verschiedener Größen („anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“, „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“ und „ap-Länge“) der ausgemessenen Bandscheiben innerhalb bestimmter MRT-Sequenzen (T1, T2 und TIRM) evaluiert und miteinander verglichen werden. Das bedeutete konkret sehr detailliert und möglichst exakt Bandscheiben manuell zu vermessen und die Vermessungen ebenso detailliert zu dokumentieren. Die Messergebnisse sollen dann für ein folgendes Projekt zur vollautomatischen, computergesteuerten, auf Algorithmen basierenden Vermessung von Bandscheiben zur Qualitätskontrolle genutzt werden. Ein ausführlicher Literaturüberblick wurde bereits in der Einleitung gegeben. Damit sollte ein besseres Allgemeinverständnis für diese Arbeit bereits in der Einleitung der Arbeit ermöglicht werden. In der Diskussion werden deshalb nur Literaturbefunde genannt, die direkt mit den hier vorliegenden Ergebnissen verglichen werden können.

### **4.1 Diskussion von Versuchsablauf und Messmethoden**

Die zu entwickelnde Software soll Daten von in der Routine gemachten Wirbelsäulenaufnahmen auswerten. Deshalb wurden die hier ausgewerteten Wirbelsäulenaufnahmen gemäß den Routine Anforderungen für Wirbelsäulen im UKGM durchgeführt.

Dazu gehörte die Lagerung, bei der neben der visuellen Kontrolle der MTRA, wie der Patient auf dem MR-Tomographen-Tisch liegt, eine Kontrolle mittels Localizers, ob alle zu untersuchenden Strukturen in den Bildern dargestellt werden, sowie die Zeitpunkte der durchgeführten Messungen: morgens kommen die Patienten nach dem Aufstehen oder im Extremfall erst nach einem normalen (Arbeits-)Tag.

Bei dieser jedoch aus oben genanntem Grund bewusst gewählten Versuchsdurchführung können Fehler entstanden sein. Da lediglich ein Localizer genutzt worden ist, um die Position der Probanden am MR-Tomographen-Tisch einzustellen, kann messtechnisch kaum weiter sichergestellt werden, dass der Proband bei allen sechs durchgeführten Messungen exakt in derselben Position lag, sodass gegebenenfalls die Bilder der Schnittebenen variierten. Dies könnte mit neuen Gerätesoftware Entwicklungen für das MRT (z.B. Dot-engine von Siemens) optimiert werden (Moeninghoff et al., 2013).

Mittels manueller Ausmessung wurden in dieser hier zugrunde liegenden Studie wichtige Daten gewonnen, um Eckdaten zur Entwicklung einer Software zur automatischen Ausmessung der Bandscheiben zu erhalten. Es wurde nicht nur eine „maximale Höhe der Bandscheibe“ definiert, welche in den meisten Studien beobachtet wurde, sondern es wurde eine „anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“, die „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“ und die „ap-Länge“ der Bandscheibe definiert und in den durchgeführten Messungen beobachtet. Somit können detaillierte Aussagen zu dem Verhalten von bestimmten Regionen der Bandscheiben gemacht werden.

Zusätzlich wurde das Verhalten dieser Messgrößen bei verschiedenen MRT-Sequenzen untersucht. Damit ergibt sich die Möglichkeit, Abweichungen in den Messergebnissen aufzuspüren, die durch die Sequenz selbst bedingt sind. So zeigte sich, dass die Messgrößen „anteriore“ und „posteriore Höhe“, sowie „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“ in der TIRM Sequenz größer erscheinen, als in den Sequenzen T1 und T2, jedoch verhielt es sich mit der gemessenen „ap-Länge“ gegensinnig. Verglich man die Ergebnisse des MRTs und die des VCTs der Schweinewirbelsäule, zeigte sich, dass die gemessenen Größen im VCT kleiner waren als die der MRT Messungen. Ein Nachteil der manuellen Ausmessung der Bandscheiben ist sicher, dass die Messungen nur von einer Person durchgeführt worden sind, sodass die Definition, was bei einer bestimmten Bandscheibe als die Grenze des jeweiligen Landmarken angesehen wird, rein subjektiv erfolgt ist und somit notwendig mit einem subjektiven Fehler behaftet ist. Jedoch war es nicht das Ziel dieser Arbeit die Interobserver Variabilität zu untersuchen. Auch der Vorgang der notwendigen Fensterung erfolgte rein subjektiv. Dabei wurde die

Fensterung so gewählt, dass subjektiv der beste Kontrast für eine Sequenz gefunden wurde. Diese gewählte Fensterung wurde dann innerhalb einer Sequenz bei dem jeweiligen Probanden beibehalten. Je nach gewählter Fensterung werden sich die Ergebnisse bezüglich der Größendifferenz sicherlich nochmals unterscheiden. So kann es sein, dass Bilddaten „weggefenstert“ werden und so wichtige Bildinformationen bezüglich der Landmarkensetzung verloren gehen. Man sollte sich jedoch bewusst machen, dass dieser Vorgang der Fensterung in der Routine der Bildauswertung stets angewandt wird.

## **4.2 Diskussion der statistischen Auswertung**

Der Stichprobenumfang und die Stichprobengröße der durchgeführten Studie sind mit zwei Probanden und drei wiederholten Messungen einer Bandscheibengröße, als relativ gering anzusehen. Dennoch wurde die statistische Auswertung mittels parametrischen t-Test durchgeführt, da nach Bland und Altman (2009) auch ein parametrisches Testverfahren bei kleinen Stichproben angewandt werden kann und nutzbare Aussagen bezüglich der Signifikanz erbringen kann, wenn keine außergewöhnlich großen Ausreißer vorliegen. Die Testvoraussetzung Normalverteilung kann demnach aus der Erfahrung heraus angenommen werden, wenn dies bereits für größere Stichproben mit dem zu untersuchenden Merkmal erfolgt war (Bland und Altman, 2009). Da die Körpergröße normalverteilt ist und sich die Körpergröße über die Größenvariabilität der Bandscheiben ändert, können wir diese Testvoraussetzungen auf unsere statistischen Auswertungen übertragen

Die Größe der Stichprobe war auch als solche gewählt worden, da in dieser Studie mit einem vertretbaren Zeitaufwand zunächst erst einmal ein Überblick gewonnen werden sollte, wie sich die einzelnen Messgrößen im Tagesverlauf, sowie in den verschiedenen genutzten Sequenzen, verhalten. Ferner sollten Daten an absolut identisch vorliegenden Probandendatensätzen vermessen werden, die auch zur später angedachten Softwareentwicklung genutzt werden können. Es sollten Daten gewonnen werden, die mit Daten aus einem Computer-Programm verglichen werden können, dass die Segmentierung der Bandscheiben automatisiert vornimmt. Mittels vollautomatischer Vermessung der Bandscheiben können dann wesentlich größere Stichproben von Patientendaten ausgemessen und genauere Angaben zum Verhalten der Bandscheibengrößen innerhalb einer Population gemacht werden.

### **4.3 Diskussion der Ergebnisse der humanen Datensätze**

#### **4.3.1 Vergleich der Sequenzen**

Bei dem Vergleich der Sequenzen ( Tabellen 6 bis 11 bei dem männlichen Probanden, Tabellen 19 bis 24 bei dem weiblichen Probanden) zeigte sich tendenziell, dass die „anteriore Höhe“, die „posteriore Höhe“ und die „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“ gemessen in der Sequenz TIRM größer waren als diese Messgrößen gemessen in den Sequenzen T1 und T2. Jedoch stellte sich die ap-Länge tendenziell in den Sequenzen T1 und T2 größer dar als in der Sequenz TIRM.

Dieses Phänomen wird in den Eigenschaften der unterschiedlichen Darstellbarkeit von den einzelnen Gewebeanteilen der Bandscheiben und den angrenzenden Wirbelkörpern mit Deckplatten in der MRT-Bildgebung vermutet; z.B. wird bei der genutzten TIRM-Sequenz Fett nicht dargestellt, was sich z.B. im Wirbelkörper befindet (Reiser et. al., 2008), die genutzten T1 und T2 Sequenzen hingegen unterdrücken nicht das Signal, das von Fett in der MR-Bildgebung ausgesendet wird.

Ein Vergleich der verschiedenen benutzen Sequenzen trägt zum besseren Verständnis von MR-tomographischen Bildern bei und sichert die Bildinterpretation ab.

#### **4.3.2 Vergleich der Daten der morgendlichen und abendlichen Messungen.**

Trotz dessen, dass erst zwei bis vier Stunden nach dem Aufstehen der Probanden die MR-tomographischen morgendlichen Untersuchungen erfolgten, beobachtet man bei den Messungen tendenziell, dass diejenigen Bandscheiben, die einen signifikanten Unterschied beim Vergleich der morgendlichen und abendlichen Messung aufweisen, abends kleiner sind als morgens. Siehe hierzu Tabellen 12 bis 18 für die Daten des männlichen Probanden und die Tabellen 25 bis 31 für die Daten des weiblichen Probanden.

Bei dem Vergleich der morgendlichen und abendlichen Höhe der einzelnen Bandscheiben kann man nur tendenziell sagen, dass die morgendlich gemessene Bandscheibenhöhe größer ist als die abendliche, da es Ausnahmen gibt (siehe Tabellen 12 bis 15 und 25 bis 28).

Betrachtet man jedoch die Differenz der arithmetischen Mittelwerte der Tage 1 bis 3, siehe Tabellen 16 bis 18 und 29 bis 31, so zeigt sich, dass die „anteriore“ und

„posteriore Höhe“, sowie die „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“ immer morgens größer war als abends.

Die Abnahme der Bandscheibenhöhen auch noch 2 bis 4 Stunden nach dem Aufstehen lässt sich damit erklären, dass die Bandscheiben unter Belastung (in diesem Fall die Belastung durch das eigene Körpergewicht, bzw. durch den hydrostatischen Druck) nicht sofort auf eine minimale Höhe schrumpfen, sondern ihre Höhe langsam kleiner wird.

Dies beobachten Reilly und Mitarbeiter (Reilly et al., 1984) in der in der Einleitung beschriebenen Studie. Es fand sich, dass im Durchschnitt 54% der Körpergrößenabnahme in der ersten Stunde nach dem Aufstehen auftritt, 80% innerhalb der ersten drei Stunden nach dem Aufstehen. Krag und seine Mitarbeiter (Krag et al., 1990) machten ähnliche Beobachtungen bei seiner Studie von 1990. Bei 10 Probanden wurde, nachdem sie 8 bis 10 Stunden eine liegende Position eingenommen hatten, während der folgenden 8-stündigen sitzenden oder stehenden Tätigkeit, in festen Intervallen in einer bestimmten Messvorrichtung die Körpergröße bestimmt. Krag und Kollegen fanden bei ihren Untersuchungen, dass die Körpergröße nach 1h in aufrechter Körperposition um 26%; nach 2 Stunden um 63% und nach 4 Stunden um 75% abgenommen hatte.

Bei dem Vergleich der morgendlichen und abendlichen ap-Länge finden sich tendenziell keine Unterschiede. Bei den signifikant unterschiedlichen Mittelwerten der ap-Länge beobachtet man, dass es hier im Gegensatz zu den anderen gemessenen Größen, viele Bandscheiben gibt, bei denen die ap-Länge abends größer ist als morgens. Zu hinterfragen sind die Ergebnisse von Bandscheiben bei denen sich die ap-Länge signifikant verändert hat. Die ap-Länge wurde definiert als Strecke zwischen dem vorderen Pol der Bandscheibe (definiert, als die Strecke zwischen der vorderen oberen Kante des obenliegenden Wirbelkörpers und der unteren vorderen Kante des tieferliegenden Wirbelkörpers) und hinteren Pol der Bandscheibe (definiert analog zum vorderen Pol an der Wirbelkörperhinterkante, siehe auch Abbildung 8). Die ap-Länge ist über knöchernen Landmarken der Wirbelkörper definiert worden, die sich im Tagesverlauf nicht ändern können. Zu erwarten wäre also eine stets gleich bleibende ap-Länge für die jeweilige Bandscheibe.

Deshalb wird die hier gefundene Variation als Maß für die Messgenauigkeit angesehen. Da sich die ap-Länge über den Tagesverlauf nicht ändern kann, müssen eventuell auftretende Abweichungen in anderen Ursachen begründet sein. Zum einen kann die

Messungenauigkeit durch die manuellen Ausmessmethode bedingt sein, aber auch durch die Liegeposition der Probanden, die bewusst wie in der Routine üblich gelagert wurden, kann ein Grund für die auftretende Messungenauigkeit sein: Die Bilder wurden in 15 bzw. 17 Schichten angefertigt. Je nach Lage des Localizers kann es sein, dass die sagittalste Mittelschicht nicht immer exakt an der gleichen „Mittelposition“ liegt, sondern im Extremfall um eine Schichtbreite variiert.

Vergleicht man die Bilder der Schweinewirbelsäule die im MRT gemacht worden sind, mit denen des VCTs, beobachtet man, dass sich die knöchernen Strukturen im VCT wesentlich besser und klarer abgrenzen lassen, als im MRT. Diese Messunschärfe bedingt durch die MR-Bildgebung kann ein weiterer Grund sein, warum es zu den erwähnten Messungenauigkeiten kommt und sich die ap-Länge heterogen darstellt. Die Messungenauigkeiten in der MRT-Bildgebung lassen sich gut dadurch erklären, dass im Knochengewebe ein „Protonenmangel“ herrscht, der zu einer schlechteren Bildgebung führt, was sich in einer größeren Messvariabilität ausdrückt.

Auch kann der Messfehler der manuellen Ausmessung der Bandscheiben, bei dem die gewählten Landmarken zur Ausmessung der anterioren und posterioren Höhe ungenügend gut reproduzierbar abgrenzbar sind, Messungenauigkeiten auslösen. Bei dem Betrachten der Standardabweichungen (Tabellen 16 bis 18 der Daten des männlichen Probanden, Tabellen 29 bis 31 der Daten des weiblichen Probanden) fällt tendenziell auf, dass die Standardabweichungen für die Höhe in der Mitte der Bandscheibe und der ap-Länge am geringsten sind, die Standardabweichungen für die anteriore und posteriore Höhe jedoch stärker streuen. Dies kann unterschiedliche Ursachen haben, die man jedoch nicht einfach unterscheiden kann. Zum einen können die gewählten Landmarken für die anteriore und posteriore Höhe nicht im selben Umfang reproduzierbar gut abgrenzbar sein, wie die Landmarken für die Höhe in der Mitte der Bandscheibe. An der Hinterkante der Wirbelkörper bildet sich eine Grenzfläche zwischen dem fetthaltigen Fettmark der Wirbelkörper und dem wasserhaltigen Liquor (Beyer, 2003). Aufgrund der unterschiedlichen Frequenzen der Protonen, die an Wasser gebunden sind und der Protonen, die an Fett gebunden sind, kommt es zu Artefaken, die man als „Chemical shift“ Artefakte bezeichnet (Beyer, 2003). „Chemical shift“ Artefakte können eine mögliche Ursache darstellen, warum die Landmarken an der Hinterkante nicht genügend reproduzierbar darstellbar sind. Die Abweichung von der Bildschicht kann sich gegebenenfalls mehr an der Wirbelkörpervorder- und -hinterkante bemerkbar machen, als in der Mitte der

Bandscheibe, wodurch sich ebenfalls die höhere Standardabweichung erklären ließe. Ein anderer Grund kann darin liegen, dass die gemessenen Daten der anterioren und posterioren Höhe eben tatsächlich stärker streuen als die Längenmaße vermessen als „Höhe in der Mitte einer Bandscheibe“ bzw. vermessen als „ap-Länge“. Boos und seine Mitarbeiter (Boos et al., 1996) geben die Messgenauigkeit der Methode nach Dabbs mit einer Standardabweichung von 0,7mm an. Lewis und Fowler (Lewis und Fowler, 2008) geben den mittleren Fehler mit 0,4mm bei der Methode nach Dabbs an. Diese Erkenntnis lässt sich auf unsere Ergebnisse nicht ohne weiteres übertragen, da zum einen andere Landmarken definiert wurden, um die anteriore und posteriore Höhe zu bestimmen. Zum anderen auch weil Dabbs nur die Höhe der Bandscheibe als Ergebnis von  $(\text{anteriore Höhe} + \text{posteriore Höhe}) / 2$  angibt. Weiterhin muss bei einem eventuellen Vergleich der Messgenauigkeit auf Parameter der MRT Einstellung geachtet werden, wie Pixelgröße oder Fensterung der Bilder. Ein direkter Vergleich ist nicht möglich, da in der Boos-Studie andere Messparameter genutzt worden sind.

In der hier durchgeführten Studie wurden weit mehr Parameter einer möglichen Vermessung der Bandscheiben betrachtet („anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“, „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“, „ap-Länge“), die dabei helfen sollen ein Computerprogramm zu entwickeln, um eine solche Ausmessung automatisch vorzunehmen. Diese Software soll auch, wie in dieser Studie, die verschiedenen Größen einer Bandscheibe automatisch vermessen und nicht, wie z.B. die Software die Roberts mit seinen Mitarbeitern bereits 1997 (Roberts et al., 1997) entwickelt haben, nur die maximale Höhe der Bandscheibe.

Damit wären dann auch ein größer Stichprobenumfang, sowie eine Ausmessung der gesamten Wirbelsäule möglich. Auch können dann diese Ergebnisse mit den Ergebnissen der hier vorliegenden Studie verglichen werden, da die technischen Einstellungen identisch sind.

#### **4.4 Diskussion der Ergebnisse der Schweinewirbelsäule**

Die ex vivo Schweinewirbelsäule dient als Phantom für die durchgeführten Messungen, da es hier zu keinen tageszeitlichen Veränderungen kommen konnte und man bei der Schweinewirbelsäule sowohl die MRT- als auch die VCT-Bildgebung durchführen konnte.

Nur drei Bandscheiben der Schweinewirbelsäule waren in den MR-tomographischen Aufnahmen so abgrenzbar, dass sich die Landmarken zur Ausmessung der einzelnen Größen bestimmen ließen. Vergleicht man die MRT-Sequenzen untereinander (Tabellen 32 bis 34) sind die erhobenen Werte der TIRM-Sequenz für die Größen „anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“ und „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“, wie auch bei den menschlichen Wirbelsäulen, größer als die der Sequenzen T1 und T2. Auch scheinen die Werte der ap-Länge in den Sequenzen T1 und T2 tendenziell größer zu sein als bei der Sequenz TIRM.

Vergleicht man die Messungen, die mittels MRT durchgeführt worden sind, mit denen des VCTs (Tabellen 35 bis 37), beobachtet man tendenziell, dass die erhobenen Daten der MRT-Messungen größer sind, als die der VCT-Messungen.

Bei den Aufnahmen des VCTs sind die knöchernen Strukturen klarer abgebildet und konnten somit besser abgegrenzt werden, als die knöchernen Strukturen bei den MR-tomographischen Bildern. Die bessere Abgrenzbarkeit kann eine Erklärung sein, warum die gemessenen Größen in den Aufnahmen des VCTs kleiner sind als die der MR-tomographischen Aufnahmen. Auf Grund der besseren Abgrenzbarkeit der Strukturen im VCT kann man die gewonnenen Daten des VCTs als Goldstandard für die Größen der Bandscheiben ansehen. Dies würde mit einer Dissertation von Herrn Höhler übereinstimmen, der die Messgenauigkeit an VCT-Datensätzen des menschlichen Schädels evaluiert hat (Höhler 2008). Die „wahren“ Größen der Bandscheiben werden vermutlich kleiner sein, als sie in den MR-Messungen gefunden wurden. Dabei scheint die genutzte TIRM-Sequenz die wahre Bandscheibengrößen am schlechtesten widerzugeben, die Bandscheibengrößen vermessen in den Sequenzen T1 und T2 unterschieden sich, wie auch bei den Humanendatensätzen am wenigsten und scheinen so die wahre Bandscheibengröße innerhalb der hier genutzten Sequenzen am ehesten widerzugeben.

Jedoch muss berücksichtigt werden, dass es sich bei der Schweinewirbelsäule um ein ex vivo Phantom gehandelt hat. Es könnte sein, dass sich der Wassergehalt der Bandscheiben postmortal änderte und somit auf die Darstellbarkeit der Bandscheiben in der MR- Bildgebung Einfluss genommen haben kann.

Bei bereits veröffentlichten Studien, die eine automatische Segmentation von Bandscheiben vorgenommen haben wurden über Rechenschritte die Eigenschaften der anatomischen Darstellbarkeiten von Landmarken aus unterschiedlich gewichteten MR-Sequenzen genutzt. So nutzten Bhole et al. (Bhole et al, 2009) Informationen, die aus

T1 und den T2 gewichteten Aufnahmen resultieren, Hoad und Martel (Hoad und Martel 2002) verwendeten T1-gewichtete Bilder mit unterschiedlichen Echozeiten und Roberts und seine Mitarbeiter (Roberts et al., 1997) nutzten Eigenschaften von T2 gewichteten und von Protonendichte (PD)-gewichteten Bilddaten um Bandscheiben automatisch zu segmentieren.

Da wir zusätzlich eine TIRM gewichtete Sequenz verwendet haben, bleibt abzuwarten ob und in welchem Maß diese dazu beitragen kann anatomische Strukturen für eine automatische Segmentation besser darzustellen.

Eine Festlegung welche der genutzten MR-Sequenzen die Realität der Bandscheibengrößen am ehesten wiedergibt, konnten wir so nicht treffen.

Man hätte das Stück Schweinewirbelsäule midsagittal durchtrennen müssen und die Größen der Bandscheiben mittels Schieblehre (mit auftretenden Messungenauigkeiten) vermessen müssen. Allerdings befürchteten wir bei der mechanischen Zerteilung mit einer Säge, das Knochen- und Bandscheibenmaterial so zu schädigen, dass eine zuverlässige Schieblehren-Vermessung der Bandscheibengrößen nicht möglich ist.

#### **4.5 Ausblick**

Bei einer Entwicklung einer Software, die mehrere Größen der Bandscheiben automatisch bestimmt und nicht nur die maximale Höhe der Bandscheibe, wie zum Beispiel in der Arbeit von Roberts und seinen Mitarbeitern (Roberts et al., 1997), wären dann auch detaillierte Ergebnisse bezüglich des Verhaltens der verschiedenen Bandscheibenhöhen zu erhalten.

Park (Park, 1997) beobachtete das Verhalten von Bandscheiben bezüglich des Größenverlusts und Veränderungen der Signalintensität über den Tagesverlauf. Dabei maß er eine anteriore Höhe, eine posteriore Höhe und eine Höhe mitten in der Bandscheibe. Allerdings beschreibt er nicht, welche Landmarken er definierte, um diese Größen zu bestimmen. Bei seinen Vermessungen fand er, dass die posteriore Höhe im Tagesverlauf am meisten abnahm. Diese Messungen wurden jedoch nur an Bandscheiben der LWS durchgeführt. Mittels einer automatischen, computergestützten Auswertung, könnten komplette Wirbelsäulen mit weniger Zeitaufwand ausgemessen werden, um Daten darüber zu erlangen, wie sich bestimmte Größen der Bandscheiben an den Bandscheiben der HWS oder BWS oder LWS verändern, oder ob sich alle

Größen gleichermaßen in den verschiedenen Abschnitten der Wirbelsäule, die alle andere physiologische Eigenschaften haben, verändern.

Fehler, die mit dem subjektiven Einschätzen von Landmarken entstanden sind, können gegebenenfalls nur bedingt vermieden werden. Hier bleibt abzuwarten, ob es möglich ist, eine Software zu entwickeln, die immer garantiert die Landmarken klar abgrenzen kann, oder ob man gegebenenfalls manuell bei manchen Bandscheiben nachjustieren muss, weil z.B. Bewegungsartefakte auftraten, oder eine optimale Darstellung einer Bandscheibe mittels MRT nicht möglich war. Auch die Notwendigkeit der Fensterung der Bilddaten kann gegebenenfalls ebenfalls wieder zu einem Abweichen der Messergebnisse von dem „wahren“ Wert der Bandscheibe beitragen.

Die Messgenauigkeit der manuell ausgemessenen Bandscheiben dieser Studie könnte mit einer solchen Software präzise angegeben werden, da es sich um dieselben Bilddaten handelt und die Parameter der MRT- Untersuchung identisch sind.

Ein weiterer Gewinn einer automatischen Vermessung der Bandscheiben kann darin bestehen, dass mittels einer Software bestimmte Eigenschaften der Bandscheiben schon untersucht werden können, ehe eigentliche Beschwerden auftreten. Damit könnte man eine Risikoabschätzung durchführen bezüglich einer Erkrankung. Eine vollautomatische Vermessung von Bandscheiben ist kostengünstig, da kaum Personalkosten entstehen. Somit wäre es mit einer Software ökonomisch möglich, eine große Datenmenge von in der Routine aufgenommenen MRT-Aufnahmen der Wirbelsäule auszuwerten, um das Verhalten von Bandscheiben in einer Population zu untersuchen, basierend auf einer wesentlich größeren Stichprobe. Gegebenenfalls kann die Software auch dahingehend (weiter-) entwickelt werden, einen Beitrag zu computer-assistierten Untersuchungen der Bandscheiben oder im Bereich der Skoliosediagnostik zu leisten.

Würde man die Software weiter modifizieren, könnten gegebenenfalls auch Volumenmessungen anhand von 3D Aufnahmen erfolgen und man könnte so automatisch eventuell auftretende morgendlich und abendlich Volumenänderungen bei identischen Personen untersuchen. Man könnte diese Ergebnisse mit den Ergebnissen dieser Untersuchung vergleichen. Ferner könnte man die normale, gesunde Volumen-Variabilität von Bandscheiben bestimmen und mit der - eventuell geringeren - Volumen-Variabilität von veränderten Bandscheiben vergleichen, was eventuell mit Rückenschmerzen von Patienten korrelierbar ist. Mit einer 3D-Software könnte man ferner z.B. das Volumen von Wirbelkörpermetastasen berechnen und damit den Therapieerfolg z.B. einer Bestrahlung oder Chemotherapie beurteilen.

## 5 Zusammenfassung

Zielsetzung dieser Studie war die Definition von Landmarken an der menschlichen Wirbelsäule bei MRT Bildern, mittels derer verschiedene Größen der Bandscheiben manuell vermessen werden konnten, so konnte auch untersucht werden, wie sich diese gemessenen Größen im Tagesverlauf und in Abhängigkeit von den genutzten MRT-Sequenzen unterschieden. Die gewonnenen Daten sollen zur Entwicklung einer Software gestützten Vermessung von Bandscheiben, die in einem späteren Projekt erfolgen soll, beitragen.

Es wurden die Wirbelsäulen eines männlichen und weiblichen Probanden an drei Tagen jeweils morgens und abends mittels einer MR-tomographischen Untersuchung bildmorphologisch dargestellt. Dabei wurde ein 1,5 Tesla starker Magnetom „Avanto“ der Firma Siemens, Erlangen, Deutschland benutzt. In diesen jeweils sechs durchgeführten Messungen sind an 10 Bandscheiben vier Größen („anteriore Höhe“, „posteriore Höhe“, „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“, „ap-Länge“) jeweils dreimal wiederholt gemessen worden.

Ein ex vivo Präparat einer Schweinewirbelsäule diente als Phantom bezüglich der Tagesvariabilität und der Reliabilität der MRT Darstellung und wurde sowohl mittels MR-Bildgebung mit dem oben genannten Magnetom, sowie mittels Bildgebung durch einen Volumen Computer Tomographen, dem eXplore Locus Ultra der Firma GE Health Care, London, Ontario, Kanada, untersucht. Die so gewonnenen Bilddaten wurden verglichen.

Es wurden Vergleiche der Sequenzen untereinander angefertigt, sowie die Ergebnisse der morgendlichen und abendlichen Messung verglichen und mittels gepaarten t-Tests statistisch ausgewertet.

Es zeigte sich tendenziell, dass sich die erhobenen Werte der „anterioren“ und „posterioren Höhe“ und der „Höhe in der Mitte der Bandscheibe“ in den Sequenzen T1 und T2 signifikant kleiner darstellten als in der Sequenz TIRM; die ap-Länge jedoch stellte sich in der TIRM-Sequenz kleiner dar als in den Sequenzen T1 und T2, was sich sowohl bei den Vermessungen der menschlichen Wirbelsäule, als auch bei der Vermessung der Schweinewirbelsäule im MR-Tomographen zeigte.

Man beobachtete eine signifikante Größendifferenz der gemessenen Größen der Bandscheiben über den Tagesverlauf, bei der die Messergebnisse der morgendlichen Messungen größer sind als die der abendlichen Messungen, obwohl die MR-

tomographischen Aufnahmen erst 2 bis 4 Stunden nach dem Aufstehen angefertigt worden sind. Vergleicht man die Daten der Schweinewirbelsäule, gewonnen in der MR-Tomographie mit denen der Computertomografie, so sind die Bandscheibengrößen, gewonnen in der MR-Tomographie, größer als die der Computertomographie. Da bei den VCT Bildern die knöchernen Strukturen klarer abgrenzbar waren, liegt die „wahre“ Größe der Bandscheibe wahrscheinlich näher an diesem ermittelten Messwert, als bei den als größer gemessenen Messwerten der MRT Bildgebung, auch wenn als Einflussfaktor bei der Schweinewirbelsäule die ex-vivo Messung und damit ein möglicherweise niedrigerer Wassergehalt der Bandscheibe hinzukommt.

## 6 Summary

The purpose of this study was to define landmarks of the human spine of MR images, such that different heights of the intervertebral discs could be measured manually. Another question was how the different measured heights of the discs differ by the time the MR-images were taken and how they differ, if different MRI sequences are used. The different sequences used were compared with each other. Furthermore, the examinations of this investigation will serve as test data for the development of a computer program in a future study that is able to perform the different morphological size- and length-measurements automatically, based on numerical defined algorithms. The measurements that were performed manually in this study will serve as reference data for debug purposes during the development of the software program.

In this investigation the spines of a male and a female subject underwent MR-imaging on three days in the morning and in the evening. For this investigation, a 1,5 Tesla magnetom “Avanto”, produced by Siemens, Erlangen, Germany, was used. In each investigation, images of ten intervertebral discs were measured, based on four differently defined disc heights (“anterior height”, “posterior height”, “height in the middle of the disc” and “ap-diameter”). These manually performed measurements of the different intervertebral disc heights were repeated three times. In addition, a piece of a spine of a pig underwent MR-imaging and was additionally radiologically examined with a volumetric computer tomography system (VCT), the eXplore Locus Ultra, produced by GE-HealthCare, London, Ontario, Canada. Images of both systems were compared.

The statistical analysis was performed using paired t-tests. Comparison of different MRI-sequences used and a comparison of the heights between the measurements taken at morning and at evening, within the various MRI-sequences, was carried out.

Studying the measured heights of the “anterior” and “posterior height”, and of the “height in the middle of the disc”, it was found that the heights measured on data taken by T1 and T2 sequences were significant smaller compared to height measurements based on the TIRM-sequence. On the other hand, the “ap-diameter” was larger when measurements were performed on images based on T1 and T2 sequences, compared to measurements based on a TIRM-sequence. This result was found by the measurements of the human spines and of the measurements of the pig’s spine. A significant height difference is found during the course of a day, it can be seen in a trend that the results of the morning measurement are larger than the results of the evening measurements. These results were found although the MR-images were taken 2 to 4 hours after arising in the morning.

Comparing MRI and VCT data, it is found that MRI based size estimates are slightly larger. The bony structures were easier to define on VCT images, such that the true height of the intervertebral discs will be closer to the heights estimates based on VCT imaging, although it must be considered that the ex vivo pig spine may have a lower water content, which may have an influence on the MRI images.

## 7 **Abbildungsverzeichnis**

<i>Abbildung 1: Lumbales Bewegungssegment, Medianschnitt aus Paulsen und Waschke 2010, Atlas der Anatomie des Menschen Sobotta, 23. Auflage, mit freundlicher Genehmigung des Elsevier GmbH, Urban &amp; Fischer Verlages .....</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 3: T1- gewichtete Aufnahme der Schweinewirbelsäule. Messanordnung Gewebe eingelagert in Wasser.....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 2: T1- gewichtete Aufnahme der Schweinewirbelsäule. Messanordnung Gewebe gegen Luft.....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 5: Beispielabbildung der benutzten Fensterung der T1-Sequenz.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 6: Beispielabbildung der benutzten Fensterung der T2-Sequenz.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 4: Beispielabbildung der benutzten Fensterung der TIRM- Sequenz.....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 7: Einzeichnung der anterioren und posterioren Höhe der Bandscheibe .....</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 8: Vermessung des ap-Länge der Bandscheibe.....</i>	<i>23</i>

<i>Abbildung 9: Einzeichnung einer Hilfslinie an dem unteren Messpunkt der anterioren und posterioren Messlinie. Rechtwinklig dazu wurde eine weitere Messlinie auf halber ap-Länge eingezeichnet.....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 10: Einkürzung der Messlinie auf Höhe in der Mitte der Bandscheibe .....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 11: Beispielaufnahme der Sequenz TIRM, Bestimmung der Bandscheibengrößen .....</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 12: Beispielaufnahme der Sequenz TIRM, Bestimmung der Bandscheibengrößen .....</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 13: Beispielaufnahme Schweinewirbelsäule, Sequenz T2, Bestimmung der Bandscheibengrößen .....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 14: Beispielaufnahme Schweinewirbelsäule, Sequenz T1, Bestimmung der Bandscheibengrößen .....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 15: Beispielaufnahme Schweinewirbelsäule, Sequenz T1, Bestimmung der Bandscheibengrößen .....</i>	<i>27</i>

## 8 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Die wichtigsten genutzten Parameter, der in den Messungen genutzten Protokolle für die menschliche Wirbelsäule. Die Schweinewirbelsäule wurde mit denselben MR-Parametern gemessen, lediglich das FOV ist auf 230mm verringert worden.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 2: Verwendete Fensterungen zur Ausmessung der Bilddaten der menschlichen Wirbelsäule.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabelle 3: Verwendete Fensterung zur Ausmessung der Bilddaten der Schweinewirbelsäule.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 4: Übersichtstabelle der durchgeführten Vergleiche mit zugehörigen Tabellennummern.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 5: Übersichtstabelle der durchgeführten Vergleiche der Schweinewirbelsäule mit den dazu gehörigen Tabellennummern.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 6: Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 7: Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge.....</i>	<i>34</i>

*Tabelle 8: Vergleich der Sequenzen T1 und T2 des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe. ....35*

*Tabelle 9: Vergleich der Sequenzen T1 und T2 des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge. .... 36*

*Tabelle 10: Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe. ....37*

*Tabelle 11: Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM des männlichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge. .... 38*

*Tabelle 12: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der anterioren Höhe des männlichen Probanden. .... 40*

*Tabelle 13: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der posterioren Höhe des männlichen Probanden. ....41*

*Tabelle 14: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der Höhe in der Mitte der Bandscheibe des männlichen Probanden. .... 42*

*Tabelle 15: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der ap-Länge des männlichen Probanden. .... 43*

*Tabelle 16: Sequenz T1, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des männlichen Probanden..... 44*

*Tabelle 17: Sequenz T2, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des männlichen Probanden..... 45*

*Tabelle 18: Sequenz TIRM, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des männlichen Probanden. .... 45*

*Tabelle 19: Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe. .... 47*

*Tabelle 20: Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge..... 48*

*Tabelle 21: Vergleich der Sequenzen T1 und T2 des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe. .... 49*

*Tabelle 22: Vergleich der Sequenzen T1 und T2 des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge.....50*

*Tabelle 23: Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, anteriore und posteriore Höhe. .... 51*

<i>Tabelle 24: Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM des weiblichen Probanden für die Tage 1 bis 3, Höhe in der Mitte der Bandscheibe, ap-Länge.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabelle 25: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der anterioren Höhe des weiblichen Probanden.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabelle 26: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der posterioren Höhe des weiblichen Probanden.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabelle 27: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der Höhe in der Mitte der Bandscheibe des weiblichen Probanden.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabelle 28: Vergleich morgendlichen und abendlichen Messergebnisse der Höhe in der Mitte der Bandscheibe des weiblichen Probanden.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabelle 29: Sequenz T1, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des weiblichen Probanden.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabelle 30: Sequenz T2, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des weiblichen Probanden.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabelle 31: Sequenz TIRM, Differenzen der arithmetischen Mittelwerte der morgendlichen und abendlichen Messungen der Tage 1 bis 3 des weiblichen Probanden.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabelle 32: Schweinewirbelsäule Vergleich der Sequenzen T1 und TIRM.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabelle 33: Schweinewirbelsäule Vergleich der Sequenzen T1 und T2.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabelle 34: Schweinewirbelsäule Vergleich der Sequenzen T2 und TIRM.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabelle 35: Schweinewirbelsäule, Vergleich der MRT-Sequenz T1 mit dem VCT.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 36: Schweinewirbelsäule, Vergleich der MRT-Sequenz T2 mit dem VCT.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 37: Schweinewirbelsäule, Vergleich der MRT-Sequenz TIRM mit dem VCT....</i>	<i>63</i>

## 9 Literaturverzeichnis

(Adams und Roughley, 2006) Adams M.A., Roughley P.J. *What is Intervertebral Disc Degeneration, and What Causes It?* Spine, 2006;31:2151-2161

(Althoff et al., 1992) Althoff I., Brinckmann P., Frobin W., Sandover J., Burton K. *An improved method of stature measurement for qualitative determination of spinal loading-application to sitting posture and whole body vibration.* Spine, 1992;17:682-693

- (Antoniou et al., 1996) Antoniou J., Steffen T., Nelson F., Winterbottom N., Hollander A.P., Poole R.A., Aebi M., Alini M. *The human lumbar intervertebral disc: evidence for changes in the biosynthesis and denaturation of the extracellular matrix with growth, maturation, ageing, and degeneration.* J.Clin Invest, 1996;98:996-1003
- (Beichelt und Montgomery, 2003) Beichelt F.E., Montgomery D.C. Teubner Taschenbuch der Stochastik: *Wahrscheinlichkeitstheorie, Stochastische Prozesse, Mathematische Statistik.* Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2003
- (Benneker et al., 2003) Benneker L.M., Heini P.F., Anderson S.E, Alini M., Ito K. *Correlation of radiographic and MRI parameters to morphological and biochemical assessment of intervertebral disc degeneration.* Eur Spine J, 2005;14:27–35
- (Benninghoff und Drenckhahn,2003) Benninghoff A., Drenckhahn D. *Anatomie, Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie, Band 1*,16. Auflage, Urban & Fischer, 2003:412-442
- (Bernick und Cailliet, 1982) Bernick S., Cailliet R. *Vertebral end-plate changes with ageing of human vertebrae.* Spine, 1982;7:97-102. Zitiert nach (Urban und Winlove, 2007)
- (Bhole et al., 2009) Bhole C., Kompalli S., Chaudhary V. *Context Sensitive Labeling of Spinal Structure in MR Images.* Pro.of spie, 726072603P-2
- (Bland und Altman, 2009) Bland M., Altman D.G., *Analysis of continuous data from small samples.* BMJ, 2009;338:a3166
- (Boos et al., 1996) Boos N., Wallin A., Aebi M., Boesch C. *A new magnetic resonance imaging analysis method for the measurement of disc height variations.* Spine, 1996;21:563-570
- (Botsfort et al., 1994) Botsford D.J., Esses S.I, Ogilvie-Harris D.J. *In Vivo Diurnal Variation in Intervertebral Disc Volume and Morphology.* Spine, 1994;19:935-940

(Bushberg et al., 2012) Bushberg J.T., Seibert J.A., Leidhold Jr., E.M., Boone J.M. *The essential physics of medical imaging*, third edition, 2012, Wolters Kluwer, Lippincott, Williams & Wilkins

(Beyer H.-K., 2003) Beyer H.-K. *MRT der Gelenke und der Wirbelsäule*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2003

(Dabbs, 1990) Dabbs V.M., Dabbs L.G. *Correlation Between Disc Height Narrowing and Low-Back Pain*. *Spine*, 1990;15:1366-1369

(De Puky, 1935) De Puky P. *The Physiological Oscillation of the length of the body*. *Acta Orthop scand*, 1935;6:338-348, zitiert nach (Krag et al., 1990)

(Eklund und Corett, 1984) Eklund J.A.E., Niegel Corett E. *Shrinkage as a measure of the effect of load of the spine*. *Spine*, 1984;9:189-194

(Fitzgerald, 1972) Fitzgerald L.G. *Changes in spinal stature following brief periods of static shoulder loading*. Royal Air Force Institute of Aviation Medicine, IAM Report, 1972; #514. Zitiert nach (Krag et al, 1990)

(Frobin et al., 2001) Frobin W., Brinckmann P., Kramer M., Hartwig E. *Height of lumbar discs measured from radiographs compared with degeneration and height classified from MR images*. *Eur. Radiol.*, 2001;11:263-269

(Grah, 2011) Grah J. *Segmentierung von 2D-Graustufenbildern mit Hilfe von homologischer Persistenz: Verschieden Methoden*, Bachelorarbeit, Westfälische Wilhelms- Universität, Münster, Institut für numerische und angewandte Mathematik, 2011

(Hoad und Martel, 2002) Hoad C.L., Martel A.L. *Segmentation of MR images for computer-assisted surgery of the lumbar spine*. *Phys.Med. Biol.*, 2002;47:3503-3517

(Höhler, 2008) Höhler T. *Metrische Genauigkeit der flat panel volumetric computed tomography und verschiedener Orthopantomographien in der präimplantologischen Diagnostik. Med. Dissertation.* Justus Liebig Universität Giessen, 2008

(Inoue, 1981) Inoue H. *Three-dimensional architecture of lumbar intervertebral discs.* Spine, 1981;6:139-145

(Internetseiten der Universität Gießen 2011) <http://www.uni-giessen.De/cms/fbz/fb11/institute/klinik/radiologie/neurorad/forschung/vtc>, zitiert am 7.1.2012, 08:38 Uhr

(Johnstone und Bayliss, 1995) Johnstone B., Bayliss M.T. *The large proteoglycans of the human intervertebral disc changes in their biosynthesis and structure with age, topography, and pathology.* Spine, 1995;20:674-684

(Kalender, 2000) Kalender W.A. *Computertomographie Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen.* Publicis MCD Verlag, 2000

(Karakida et al., 2003) Karakida O., Ueda H., Ueda M., Miyasaka T. *Diurnal T2 value changes in the lumbar intervertebral discs.* Clinical Radiology, 2003;58:389-392

(Keller et al., 1990) Keller T.S., Holm S.H., Hansson T.H., Sprengler D.M. *The dependence of intervertebral disc mechanical properties on physiologic conditions.* Spine, 1990;15:751-761, zitiert nach (Botsford et al., 1994)

(Koes et al., 2006) Koes B.W., Tulder M.W., Thomas S. *Diagnosis and treatment of low back pain.* BMJ, 2006;332:1430–1434

(Krämer, 1981) Krämer J. *Intervertebral disk diseases: Causes, Diagnosis, Treatment and Prophylaxis.* Auflage 3, Thieme Verlag, 2008

(Krag et al., 1990) Krag M.H., Cohen M.C., Haugh L.D., Pope M.H. *Body height change during upright and recumbent posture.* Spine, 1990;15:202-207

(Lewis und Fowler, 2009) Lewis S.E., Fowler N.E. *Changes in Intervertebral Disk Dimensions After a Loading Task and the Relationship with Stature Change Measurements*. Arch Phys Med Rehabil, 2009;90:1795-1799

(Lüllmann-Rauch, 2006), Lüllmann-Rauch R., Taschenlehrbuch Histologie, 2.komplett überarbeitete Auflage, Thieme Verlag, 2006, siehe Seiten 113-140

(Malko et al., 1996) Malko J.A., Hutton W.C., Giacometti A.R., Kater G., Greenfield P., Boden S.D., Silcox D.H. *Do diurnal changes in loading affect the interpretation of MRI Scans of the lumbar spine*. Journal of Spinal Disorders, 1996;9:129-135

(McGill et al., 1996) McGill S.M, van Wijk M.J., Axler C.T., Gletsu M *Studies of spinal shrinkage to evaluate low back loading in the workplace*. Ergonomics, 1996;39:92-102

(Meindl et al., 2009) Meindl T.,Wirth S., Weckbach S., Dietrich O., Reiser M., Schoenberg S.O. *Magnetic resonance imaging of the cervical spine: comparison of 2D T2-weighted turbo spin echo, 2D T2\* weighted gradient-recalled echo and 3D T2-weighted variable flip-angle turbo spin echo sequences*. Eur Radiol, 2009;19:713-721

(Modic und Jeffery, 2007) Modic M.T., Jeffery S.R., *Lumbar degenerative disk disease*. Radiology, 2007;245,1:43-61

(Moennighoff et al., 2013) Moennighoff C., Umuthu L., Kloeters C., Ringelstein A., Ladd M.E., Sombetzki A., Lauenstein T.C., Forsting M., Schlamann M. *Workflow efficiency of two 1.5 T MR scanners with and without an automated user interface for head examinations*. Academic Radiologie, 2013;20:721-730

(Park, 1997) Park C.O. *Diurnal variation in lumbar MRI. Correlation between signal intensity, disc height, and disc bulge*. Yonsei Med J, 1997;38:8-18

(Pham et al., 2000) Pham D.L., Chenyang X., Prince J.L. *Current methods in medical image segmentation*. Annu. Rev. Biomed. Eng., 2000;02:315-337

(Paulsen und Waschke, 2010) Paulsen F., Waschke J. *Atlas der Anatomie des Menschen Sobotta.*, 23. Auflage, Urban und Fischer, München, Jena, 2010

(Raj, 2008) Raj P.P. *Intervertebral disc: Anatomy-physiology-pathophysiology-Treatment.* Pain Practice, 2008;8:18-44

(Rasch et al., 2006) Rasch B., Frieze M., Hofmann W.J., Naumann E. *Qualitative Methoden 1, Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*, 2. Auflage, Springer Verlag, 2006. <http://www.quantitative-methoden.de/Dateien/Auflage2/leseprobe.pdf>. Heruntergeladen am 09.01.2013 um 7:46 Uhr

(Reilly et al., 1984) Reilly T., Tyrrell A., Troup J.D.G. *Circadian Variation in Human Stature.* Chronobiology International, 1984;1:121-126

(Reiser et al., 2008) Reiser M.F., Hricak H., Semmler W. *Magnetic resonance tomography*, Springer Verlag, 2008

(Roberts et al., 1998) Roberts N., Hogg D., Whitehouse G.H., Dangerfield P. *Quantitative Analysis of Diurnal Variation in Volume and Water Content of Lumbar Intervertebral Discs.* Clin. Anat., 1998;11:1-8

(Roberts et al. 1997) Roberts N., Gratin C., Whitehouse G. *MRI analysis of lumbar intervertebral disc height in young and older population.* JMRI, 1997;7:880-886

(Rubin, 2007) Rubin D.I. *Epidemiology and risk factors for spine pain.* Neurol Clin., 2007; 25:353-71

(Tyrrell et al, 1985) Tyrrell A.R., Reilly T., Troup J.D.G. *Circadian Variation in stature and the effects of spinal loading.* Spine, 1985;10:161-164

(Schiebler, 2005) Schiebler T.H. *Schiebler Anatomie.* 9. Auflage, Springer Medizin Verlag, 2005

(Schmidt et al., 2007) Schmidt C.O., Raspe H., Pfungsten M., Hasenbring M., Basler H.-D., Eich W., Kohlmann T. *Back Pain in the German Adult Population: Prevalence, Severity, and Sociodemographic Correlates in a Multiregional Survey*. Spine, 2007;32:2005-2011

(Sharma und Aggarwal, 2010) Sharma N., Aggarwal L.M. *Automated medical segmentation techniques*. J Med Phys, 2010;35:3-14

(Urban und Winlove, 2007) Urban J.P.G, Winlove C.P. *Pathophysiology of the intervertebral disc and the challenges for MRI*. Journal of magnetic resonance imaging 2007;25:419-432

(Videmann et al., 2003) Videmann T., Battié M.C., Gibbons L.E. *Associations between back pain history and lumbar mri findings*. Spine, 2003;28:582-588

(Weber, 2005) Weber J. *Hochauflösende Bildgebung und Volumetrie: Vergleich des Prototypen eines Volumencomputertomographen mit Flachbilddetektoren mit einem klinischen CT-System*. Med. Dissertation Gießen, 2005

(Weishaupt et al., 2009) Weishaupt D., Koechli V.D., Marincek B. *Wie funktioniert MRI*, 6. Auflage, Springer Verlag, 2009

(Wikipedia 2013) zitiert nach [de.wikipedia.org/wiki/Bin%C3a4rbild](http://de.wikipedia.org/wiki/Bin%C3a4rbild), 10.1.2013, 7:24 Uhr

## 10 Anhang

### Benutzte Abkürzungen:

Höhe ant. = anteriore Höhe

Höhe post. = posteriore Höhe

Höhe Mitte = Höhe in der Mitte der Bandscheibe

Ap-Länge = ap- Abstand

## **11 Ehrenwörtliche Erklärung**

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

---

Freudenberg, den 09.06.2013

## 12 Danksagung

Danken möchte ich Frau Prof. Dr. med. Elke R. Gizewski; Direktorin der Abteilung Neuroradiologie des Universitätsklinikums Gießen-Marburg, Standort Gießen, für die Vertretung des Themas vor dem Fachbereich und vor dem Dekanat, sowie für die Weiterbetreuung dieser Arbeit.

Dr. rer. nat. Martin Obert gilt mein ganz besonderer herzlicher Dank für die Chance unter seiner Betreuung diese Arbeit durchzuführen, für die gemeinsame Erarbeitung des Themas und den erbauenden Diskussionen zur Durchführung der zugrundeliegenden Studie, für seine außerordentlich engagierte Betreuung meiner Dissertation, seinen steten Ermutigungen und seiner kompetenten Hilfestellung beim Verfassen der hier vorliegenden Arbeit. Sowohl fachlich als auch menschlich hatte er stets ein offenes Ohr für die auftretenden Probleme und nahm sich die Zeit, um diese gemeinsam aus dem Weg zu räumen, was das Verfassen der Dissertation enorm bereichert hat. Vielen herzlichen Dank Herr Obert.

Ein herzlicher Dank geht auch an Dr. rer. nat. Benjamin Dassinger und Nina Scislak für die kompetente Hilfe bei allen technischen und physikalischen Fragen zur Funktionsweise der Magnetresonanztomographie, sowie für die Mithilfe bei der Durchführung der Messungen der Schweinewirbelsäule im MRT.

Danken möchte ich ganz besonders auch Carolin Kubelt für ihr besonderes Engagement beim Durchführen der Messungen der Probanden im MRT.

Dr. med. Astrid E. Grams, Oberärztin und Fachärztin für Radiologie, Universitätsklinikum Gießen und Dr. med. Joanna Iwinska-Zelder möchte ich für die Mithilfe bei der Auswahl der Sequenzen und der Hilfe bei der anatomischen Benennung der Wirbelsäulenstrukturen in den MR-tomographischen Bildern danken.

Herrn Dr. Johannes Herrmann möchte ich herzlich für hilfreiche Diskussionen aus der Statistik danken, die er mit Herrn Dr. Obert geführt hat.

Meinem Bruder Frederik Picker möchte ich herzlich dafür danken, dass er sich als Proband für die zugrundeliegende Studie zur Verfügung gestellt hat, sowie für seine Unterstützung bei den so oft aufgetretenen Problemen mit meinem PC. Danke für deine Mithilfe!

Frau Lydia Kohl danke ich für das Beschaffen der Schweinewirbelsäule.

Meinem Mann Daniel und meinen Eltern danke ich für ihre immer währende Unterstützung während meines Studiums und beim Schreiben meiner Dissertation.

Meinem Vater Dipl. Ing. Wilhelm Picker danke ich für das Geben eines entscheidenden mathematischen Tipps.

Danken möchte ich auch der Elsevier GmbH, Urban & Fischer Verlag für die Genehmigung die Abbildung „Lumbales Bewegungssegment, Medianschnitt“ in dieser Dissertation (Abbildung 1) verwenden zu dürfen.