

Aus dem Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie  
Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Uwe Wagner  
des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

in Zusammenarbeit mit der Klinik für Wirbelsäulenchirurgie der Kliniken des  
Landkreises Lörrach GmbH  
Chefarzt: Prof. Dr. Michael Pfeiffer

**Änderung der Gesamtstatik der Wirbelsäule nach monosegmentaler  
Cage-Implantation im Rahmen von Transforaminal Lumbar  
Interbody Fusion- oder Posterior Lumbar Interbody Fusion-  
Operationen**

**Inaugural-Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades der gesamten Humanmedizin

dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Mario Pieta

aus Lahr im Schwarzwald

Marburg, 2023

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg  
am 07.03.2023

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin

Dekanin: Frau Prof. Dr. D. Hilfiker-Kleiner

Referent: Prof. Dr. M. Pfeiffer

1. Korreferent: Prof. Dr. C. Nimsky

2. Korreferent: Prof. Dr. M. Hessmann

Inhalt	
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	5
<b>Abkürzungen</b> .....	5
<b>1. Einleitung</b> .....	7
<b>1.1. Fragestellungen</b> .....	9
<b>2. Bisheriger Kenntnisstand</b> .....	10
<b>2.1. Anatomie</b> .....	10
<b>2.1.1. Aufbau der Wirbelsäule und Krümmungen</b> .....	10
<b>2.1.2. Wirbelkörper, Bandscheibe und Bandapparat</b> .....	11
<b>2.1.3. Rückenmark und Spinalnerven</b> .....	12
<b>2.1.4. Aufbau des Beckens</b> .....	13
<b>2.2. Degenerative Wirbelsäulenveränderungen</b> .....	13
<b>2.2.1. Bandscheibenvorfall</b> .....	13
<b>2.2.2. Spinalkanalstenose</b> .....	14
<b>2.2.3. Spondylolisthesis</b> .....	15
<b>2.2.4. Osteochondrose</b> .....	16
<b>2.3. Sagittale Balance</b> .....	16
<b>2.3.1. C7-Lotwinkel (C7-LW)</b> .....	16
<b>2.3.2. Sagittal-Vertikale Achse (SVA)</b> .....	17
<b>2.3.3. Pelvic Incidence (PI)</b> .....	17
<b>2.3.4. Pelvic Tilt (PT)</b> .....	17
<b>2.3.5. Sacral Slope (SS)</b> .....	17
<b>2.3.6. Winkelmaße und Zusammenhänge</b> .....	18
<b>2.4. Operative Verfahren</b> .....	20
<b>2.4.1. Indikation</b> .....	20
<b>2.4.2. OP-Techniken</b> .....	20
<b>2.4.3. Postoperative Probleme</b> .....	23
<b>3. Material und Methodik</b> .....	23
<b>3.1. Methodische Vorbereitungen</b> .....	23
<b>3.2. Patienten - Wirbelsäulenganzaufnahmen</b> .....	24
<b>3.2.1. Patienten – LWS-Zielaufnahmen prä- und postoperativ</b> .....	25
<b>3.2.2. Gemessene Winkel und Strecken</b> .....	25
<b>3.3. Methode</b> .....	26
<b>3.4. Messung mit RadiAnt® - Wirbelsäulenganzaufnahmen</b> .....	26
<b>3.4.1. Kreiskonstruktion</b> .....	27

3.4.2. C7-Mittelpunkt .....	29
3.4.3. Eckpunktbestimmung .....	30
3.4.4. L4/L5-Fachwinkel .....	33
3.4.5. Sacral Slope.....	34
3.4.6. Lordose.....	35
3.4.7. C7-Lotabstand, SVA .....	36
3.4.8. L1-S1-Lotwinkel.....	39
3.4.9. Spinal Tilt.....	42
<b>3.5. Messung mit Vertaplan® - Wirbelsäulenganzaufnahmen .....</b>	<b>43</b>
3.5.1. Ausrichtung der Wirbelsäulenganzaufnahme.....	44
3.5.2. Wirbelkörpermarkierung.....	45
3.5.3. Wirbelkörperbegrenzungen .....	46
3.5.4. Auswertung.....	47
3.6. Planung mit Vertaplan®.....	47
3.7. Messung mit Radiant® - LWS-Zielaufnahmen.....	48
3.8. Messung mit Vertaplan® – LWS-Zielaufnahmen.....	49
<b>4. Ergebnisse .....</b>	<b>50</b>
4.1. Statistische Methoden .....	50
4.2. Alters- und Geschlechtsverteilung .....	50
4.3. Korrelation Vertaplan® mit RadiAnt® .....	52
4.4. Test-Retest-Reliabilität .....	52
4.5. Intertester-Reliabilität .....	53
4.6. Vergleich der Wirbelsäulenganzaufnahmen mit den präoperativen WS- Aufnahmen.....	53
4.7. Änderungen der Lordose nach Cage-Implantation auf Höhe L4/L5 .....	54
4.8. Zwei-Stichproben t-Test bei abhängigen Variablen (Paarvergleichstest).....	55
4.9. Korrelationen der Wirbelsäulenganzaufnahmen.....	58
<b>5. Beantwortung der Beweisfragen und Diskussion.....</b>	<b>59</b>
<b>6. Zusammenfassung.....</b>	<b>63</b>
<b>Summary.....</b>	<b>65</b>
<b>7. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>67</b>
<b>8. Anhang .....</b>	<b>0</b>

## Abbildungsverzeichnis

*Konturen werden zur besseren Darstellung z. T. händisch nachgearbeitet*

Abbildung 1: Brustwirbelkörper von lateral und cranial (aus Sobotta).....	12
Abbildung 2: Sacral Slope, Pelvic Incidence und Pelvic Tilt prä- und postoperativ .....	19
Abbildung 3: Verwendete Cageformen.....	22
Abbildung 4: Workflow der Messungen mit Test, Re-Test und Intertest .....	24
Abbildung 5: Konstruktion des rechten Winkels mit 2 gleich langen Schenkeln.....	27
Abbildung 6: Kreiskonstruktion .....	27
Abbildung 7: Eckpunkte.....	28
Abbildung 8: C7-Mittelpunkt.....	29
Abbildung 9: Einpassen der Eckpunkte.....	30
Abbildung 10: Mittelpunkte der „Eckkreise“ .....	31
Abbildung 11: Diagonalen durch den Wirbelkörper .....	32
Abbildung 12: L4/L5-Fachwinkel .....	33
Abbildung 13: Sacral Slope.....	34
Abbildung 14: Lordose-Winkel.....	35
Abbildung 15: Lot durch C7.....	36
Abbildung 16: S1-Deckplattenhinterkante .....	37
Abbildung 17: C7-Lotabstandsmessung.....	38
Abbildung 18: S1-Deckplattenmittelpunkt.....	39
Abbildung 19: L1-Deckplattenmittelpunkt .....	40
Abbildung 20: L1-S1-Lotwinkel .....	41
Abbildung 21: Spinal Tilt.....	42
Abbildung 22: Ausrichtung der Wirbelsäulenganzaufnahme .....	44
Abbildung 23: Wirbelkörpermarkierung .....	45
Abbildung 24: Wirbelkörperbegrenzungen .....	46
Abbildung 25: Auswertung .....	47
Abbildung 26: Simulation mit 15° L4/L5-Fachwinkel .....	48
Abbildung 27: LWS-Zielaufnahme präoperativ .....	49
Abbildung 28: LWS-Zielaufnahme postoperativ .....	49

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Thorakalkyphose und Lumballordose in der Literatur.....	11
Tabelle 2: PT, PI und SS in Mittelwert und Standardabweichung.....	18
Tabelle 3: Alters- und Geschlechtsverteilung der Wirbelsäulenganzaufnahmen.....	50
Tabelle 4: Alters – und Geschlechtsverteilung der LWS-Zielaufnahmen.....	51
Tabelle 5: Vergleich der Wirbelsäulenganzaufnahmen mit Vertaplan® und Radiant®.	52
Tabelle 6: Test-Retest-Reliabilität Vertaplan® und RadiAnt® .....	52
Tabelle 7: Intertester-Reliabilität Vertaplan® und Radiant® .....	53
Tabelle 8: Vergleich der Wirbelsäulenganzaufnahmen mit den präoperativen Aufnahmen der beiden Gruppen Böhm und Pfeiffer .....	54
Tabelle 9: Paarvergleichstest Böhm .....	56
Tabelle 10: Paarvergleichstest Pfeiffer .....	57
Tabelle 11: Korrelationen der Wirbelsäulenganzaufnahmen .....	58

## **Abkürzungen**

ALIF Anterior Lumbar Interbody Fusion

BWK: Brustwirbelkörper

BWS: Brustwirbelsäule

C7: 7. Halswirbelkörper

C7-PL: C7 Plumblinie

HWK: Halswirbelkörper

HWS: Halswirbelsäule

ISG: Iliosakralgelenk

Lig/Ligg.: Ligamentum / Ligamenta

LWK: Lendenwirbelkörper

LWS: Lendenwirbelsäule

L4/5 : Winkel zwischen 4. und 5. LWK

p: Irrtumswahrscheinlichkeit

pAVK: periphere arterielle Verschlusskrankheit

PI: Pelvic Incidence

PLIF: Posterior Lumbar Interbody Fusion

PT: Pelvic Tilt

r: Korrelationskoeffizient

SE: Standard Error

SS: Sacral Slope

SSA: Spino-Sacral Angle

ST: Spinal Tilt

Std. Abw.: Standardabweichung

SVA: Sagittal-Vertikale Achse

SWK: Sakralwirbelkörper

S1: 1. Sakralwirbelkörper

Th: Thorakalwirbelkörper

TLIF: Transforaminal Lumbar Interbody Fusion

## **1. Einleitung**

Rückenschmerzen stellen heutzutage einen der häufigsten Gründe für einen Arztbesuch dar (Casazza 2012; Illés 2015). Die Wahrscheinlichkeit, einmal im Leben darunter zu leiden, liegt bei 85% (Sporer und Öner 2013). Betroffen ist dabei vor allem die Lendenwirbelsäule (Hohmann et al. 2013). Eine der häufigsten Ursachen ist die degenerative Veränderung der lumbalen Bandscheiben (Suthar et al. 2015; Gregory et al. 2008; Mayer 2001). Des Weiteren zählen Wirbelgleiten (Kalichman und Hunter 2008) und/oder ein verengter Spinalkanal (Mayer 2001) zu den Schmerzauslösern.

In 80-90% der Fälle enden die Rückenschmerzen, ob mit oder ohne Therapie, innerhalb von 6 Wochen (Golob und Wipf 2014; Simon et al. 2014; Manchikanti et al. 2014). Kommt es jedoch zu neurologischen Defiziten, z.B. Conus-Cauda-Syndrom, Inkontinenz oder motorischen bzw. sensiblen Ausfällen, wird das betroffene Segment operativ saniert (Golob und Wipf 2014). Ebenso wird eine chirurgische Therapie in Erwägung gezogen, wenn die konservativen Maßnahmen wie Physiotherapie, Analgesie, Gewichtsreduktion oder Injektionsbehandlungen auf Dauer kein befriedigendes Ergebnis liefern (Patel et al. 2015; Searle et al. 2015; Wood et al. 2011). Ziel ist dann, eine optimale Wiederherstellung der physiologischen Verhältnisse, durch welche der Patient wieder beschwerdefrei wird.

Von großer Bedeutung ist hierbei das sagittale Profil der Gesamtwirbelsäule (Vialle et al. 2005; Berjano et al. 2014). Auch wenn es keine verallgemeinerbaren Standardwerte für die sagittale Balance der Gesamtbevölkerung gibt (Stagnara et al. 1982), ist eine Kongruenz spinaler und pelviner Parameter für einen lotrechten Stand wichtig (Legaye et al. 1998).

Unter optimalen Bedingungen liegt ein sagittales Schwerelot (C7-PL), welches vom 7. Halswirbelkörper aus nach kaudal fällt, im Bereich der S1-Deckplattenhinterkante. Der Schwerpunkt liegt dann zwischen den Füßen und es muss kaum Kraft aufgewandt werden, um den Körper in dieser Position zu halten. Hierbei sind sowohl die einzelnen Wirbelsäulenabschnitte, als auch der spinopelvine Übergang voneinander abhängig (Dubouset 1998; Ferraris et al. 2012). Früh war klar, dass die Position des Beckens starken Einfluss auf die Wirbelsäule hat (Dubouset 1984). Daher wurde in der Literatur der Untersuchung der pelvinen Parameter mehr Bedeutung geschenkt. Es zeigte sich, dass es einen anatomisch, unveränderlichen (Pelvic Incidence, PI), sowie funktionelle Parameter (Pelvic Tilt, PT und Sacral Slope, SS) gibt, welche Einfluss auf lumbale Lordose und thorakale Kyphose haben (Dubouset 1998). Ebenso gibt es einen



geometrischen Zusammenhang zwischen Spinal Tilt (ST), Spino-Sacral-Angle (SSA) und SS:  $ST = SSA - SS$  (Roussouly et al. 2006). Im Rahmen von wirbelsäulenchirurgischen Eingriffen wird zunehmend gefordert, auf diese Werte zu achten: Eine operative Hyperlordosierung sollte ebenso vermieden werden wie ein Flachrücken („flat back“). Für die optimale Einstellung der sagittalen Balance durch Einwirkung von eingebrachten Implantaten (Schrauben, Cages etc.) werden in der Literatur diverse Ansätze und Winkelmaße verfolgt (Duval-Beaupère et al. 1992; Barrey und Darnis 2015; Berjano et al. 2014; Hempfing et al. 2011; Le Huec et al. 2015; Manwaring et al. 2014; Roussouly und Pinheiro-Franco 2011; Schwab et al. 2010; Legaye und Duval-Beaupère 2005). Allen gemeinsam ist die Notwendigkeit eines seitlich stehenden Röntgenbildes, welches die gesamte Wirbelsäule, von mindestens dem 7. Halswirbel bis zu den Femurköpfen, abbildet. Solche Bilder können durch Aneinanderheftung mehrerer Teilaufnahmen, welche mit einer hohen Strahlenbelastung verbunden sind, erstellt werden. Das EOS-Imaging® als Alternative ist strahlenärmer, steht aber bisher nur an sehr wenigen Standorten zur Verfügung (Morvan et al. 2011; Deschênes et al. 2010; Dietrich et al. 2013).

Erst ganz aktuell werden von französischen Autoren Surrogatparameter aus Ganzbeinstandaufnahmen ersatzweise für die Wirbelsäulenganzaufnahme herangezogen, welche vielleicht in Zukunft sogar das EOS-Verfahren ersetzen können (N.N., Eur Spine J, zum Zeitpunkt der Endfassung der vorliegenden Arbeit unter Peer-Review).

Die monosegmentale Spondylodese ist ein seit über 100 Jahren erprobtes Verfahren zur Therapie von degenerativen Erkrankungen und Entzündungen der Lendenwirbelsäule. Wurden zunächst Verfahren ohne metallische Osteosynthese-Verfahren eingesetzt sind in den letzten Jahrzehnten vermehrt Verfahren mit metallischen oder keramischen Zwischenwirbelaugmenten (Cages) entwickelt worden. Die neueste Entwicklung auf diesem Gebiet stellen winkeladjustierbare Cages dar, die mit Hilfe von Planungssoftware an die Anatomie des Patienten angepasst werden können. Die Auswirkungen dieser Entwicklung auf die Gesamtstatik der Wirbelsäule sind bisher nicht systematisch untersucht worden. Einigermaßen standardisierte, auch minimal invasive Operationstechniken ermöglichen heute eine gute Fusionsrate und Langzeitstabilität bei Reduktion der Rückenschmerzen und Wiederherstellung des sagittalen Profils (Fleege et al. 2015; Rickert et al. 2015; Spetzger et al. 2013; Spoor und Öner 2013). Hierbei werden

über in der Regel dorsale Zugänge Spinalkanalstenosen behoben, degenerierte Bandscheiben entfernt und durch Cages ersetzt, und der jeweils darüber liegende mit dem darunter liegenden Wirbelkörper mittels Schrauben-Stab-System sowie, ggf. in Repositionsstellung, ansonsten „in situ“ fixiert. Für die sichere Durchbauung (Spondylodese) sorgt angelagerter, meist autologer Knochen (posteromedial, posterolateral, intradiskal, im Cage).

Zur Planung einer solchen PLIF (Posterior Lumbar Intervertebral Fusion) - oder TLIF (Transforaminal Lumbar Interbody Fusion) - Operation auf Höhe L4/L5 werden im Rahmen der präoperativen Diagnostik wegen des hohen Aufwandes und fehlender allgemeiner Verfügbarkeit in der Regel nur Röntgenteilaufnahmen der Lendenwirbelsäule (LWS) im Stehen angefertigt, bei welchen auch die Femurköpfe meist nicht mit abgebildet sind. Diese Aufnahmen (im Stand) stellen nur die lumbalen segmentalen Gegebenheiten dar, nicht aber das Gesamtprofil der Wirbelsäule.

Eine Ableitung der zur Korrektur der sagittalen Balance erforderlichen Winkel aus Teilaufnahmen der unteren Wirbelsäule wäre in praxi für Patienten und Operateure sehr sinnvoll und wünschenswert. Diese bislang nur theoretische Möglichkeit soll mittels zweier Messmethoden (Vertaplan® vs. Radiant®) in vorliegender Arbeit evaluiert werden. Hierzu wurden aus einem Kollektiv von 40 Patienten, 14 operiert von Prof. Pfeiffer am KKH Lörrach / Rheinfelden und 26 von Prof. Böhm (operiert im Zentralklinikum Bad Berka) die prä- und postoperativ angefertigten Röntgenzielaufnahmen der LWS ausgesucht und vermessen.

### **1.1. Fragestellungen**

Es ergeben sich aufgrund der obengenannten Überlegungen folgende spezielle Beweisfragen:

1. Sind die Ergebnisse der Messungen des Programms Vertaplan® und die Messungen mit Radiant® signifikant korreliert und wie groß ist die Reliabilität der Methoden?
2. Welche Vorteile bietet die Anwendung des Programmes Vertaplan® gegenüber einer händischen Ausmessung mittels Radiant®?
3. Sind die bei in der Folge operierten Patienten präoperativ gemessenen Lordosewinkel signifikant von denen nicht operierter WS-

Ganzaufnahmepatienten verschieden und liegen die Werte im Bereich der in der Literatur publizierten Werte?

4. Welche Auswirkungen auf die Lordose der LWS haben Veränderungen der Winkelstellung von L4/L5 durch Implantation von Cages bei dorsoventralen monosegmentalen PLIF und TLIF Operationen und welche Korrelation mit der Gesamtstatik der Wirbelsäule hat eine Veränderung der LWS Lordose?

Sind die unter 4 gemachten Prognosen konsistent mit Aussagen in der Literatur?

## **2. Bisheriger Kenntnisstand**

### **2.1. Anatomie**

#### **2.1.1. Aufbau der Wirbelsäule und Krümmungen**

Die Wirbelsäule (Columna vertebralis) verbindet als federndes Element den Kopf mit dem Becken und stellt in ihrer Bauweise einen Kompromiss zwischen Stabilität und Flexibilität dar. Ihr zugeordnet werden Wirbelkörper, Wirbelgelenke, Bänder und Bandscheiben. Aufgebaut aus 7 Zervikal- (Vertebrae cervicales, HWK), 12 Thorakal- (Vertebrae thoracicae, BWK) und 5 Lumbalwirbeln (Vertebrae lumbales, LWK), sowie 5 Sakral- (Vertebrae sacrales, SWK) und 3-5 Coccygealwirbeln, welche miteinander verschmolzen sind und das Os sacrum bzw. das Os coccygis bilden, unterteilt sie sich beim Gesunden in der Sagittalebene in drei flexible und eine fixierte Krümmung:

Zervikallordose, Thorakalkyphose und Lumballordose: Die fixierte Sakralkyphose wird durch Kreuz- und Steißbein gebildet. In der Literatur werden verschiedene Werte angegeben, die zum Teil unterschiedliche Bezugspunkte zur Messung heranziehen. So wird die thorakale Kyphose zwischen Th1/Th3/Th4/Th5-Th12 und die lumbale Lordose von Th12/L1-S1 gemessen (Duval-Beaupère et al. 1992; Bruno et al. 2012; Dreischarf et al. 2014; González-Sánchez et al. 2014; Legaye und Duval-Beaupère 2005; Lundon et al. 1998; Mirbagheri et al. 2015; Vialle et al. 2005).

*Tabelle 1: Thorakalkyphose und Lumballordose in der Literatur*

<i>Autor</i>	<i>Thorakalkyphose</i>	<i>Lumballordose</i>
González-Sánchez 2014	38,6°±2,7°	28°±3,9°
Lundon 1998	30,4°±8,3°	30,4°±8,3°
Bruno 2012	50°	43°
Dreischarf 2014		29°-36,4°
Mirbagheri 2015		22,5°±9,9°-34,4°±12,6°
Duval-Beaupère 1992	34,3°±8,5°	59,8°±9,7°
Vialle 2005	41°±10°	60°±10°
Legaye 2005 (Roussouly et al. 2005)	45,5°±9,7°	60,9°±10,5°
Roussouly 2005	40,4°	61,4°±9,7°

*Thorakalkyphose und Lendenlordose bei verschiedenen Autoren*

### **2.1.2. Wirbelkörper, Bandscheibe und Bandapparat**

Ein Wirbel (Vertebra) besteht grundsätzlich aus mehreren Elementen:

Wirbelkörper (Corpora vertebrae): Sie tragen die Hauptlast und werden daher von kranial nach kaudal größer. Sie werden cranial begrenzt durch die Deckplatte und kaudal durch die Bodenplatte. Ventral verläuft das Ligamentum longitudinale anterius, welches mit benachbarten Wirbelkörpern fest, mit der Bandscheibe jedoch nur locker verbunden ist. Dorsal liegt das Lig. longitudinale posterius, das fest mit der Bandscheibe verwachsen ist.

Wirbelbogen (Arcus vertebrae): Er wird gebildet von der dorsolateral entspringenden Bogenwurzel (Pediculus arcus vertebrae), welche in die halbkreisförmige Lamina arcus vertebrae übergeht. Zusammen stellen sie die knöcherne dorsale und laterale Begrenzung des Spinalkanals (Canalis vertebralis) dar.

Wirbelbogenfortsatz (Processus arcus vertebrae): Dorsal medial entspringt der Lamina der Dornfortsatz (Processus spinosus). Er ist auf dem Rücken sicht- und tastbar, v.a. der 7. HWK (gelegentlich der 1. BWK) wird im Rahmen der Topographie auch als Vertebra

prominens bezeichnet. Auf den Dornfortsätzen verläuft das Lig. supraspinale, dazwischen das Lig. interspinale. Die Lig. flava setzen zwischen den Wirbelbögen an, verlaufen in kraniokaudaler Richtung und begrenzen den Spinalkanal nach dorsal und lateral. Seitlich des Wirbelbogens entspringt beidseits je ein Querfortsatz (Processus transversus), welcher in Längsrichtung durch die Lig. intertransversaria mit den benachbarten Querfortsätzen verbunden ist.

Untere und obere Gelenkfortsätze (Processus articulares inferiores et superiores): Sie entspringen dorsal der Bogenwurzel und bilden die Wirbelbogengelenke (Articulationes zygapophysiales, „Facettengelenke“).

Bandscheibe (Discus intervertebralis): Sie besteht aus einem inneren Gallertkern (Nucleus pulposus) und dem äußeren Faserring (Anulus fibrosus), welcher mit der knöchernen Randleiste (Epiphysis anularis) des Wirbelkörpers verwachsen ist (Anatomie des Menschen 1987; Aumüller 2007; Drake und Gray 2014; Lippert 1993; Netter 2014; Schünke et al. 2007; Sobotta 2006).

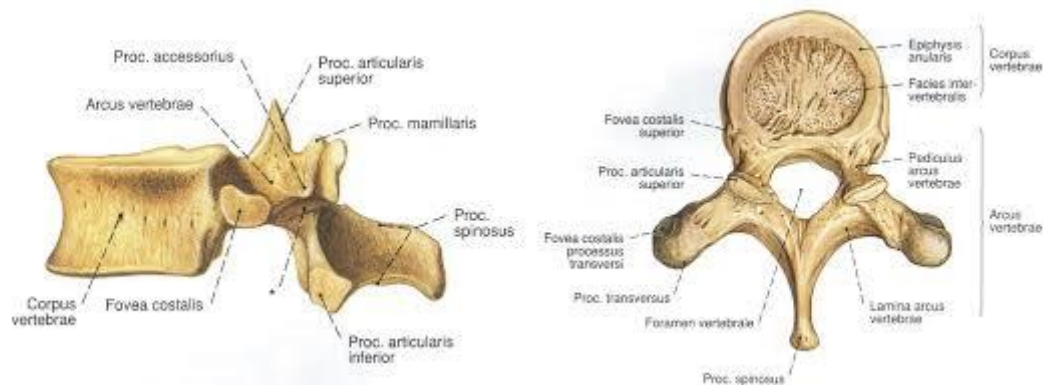


Abbildung 1: Brustwirbelkörper von lateral und cranial (aus Sobotta)

### 2.1.3. Rückenmark und Spinalnerven

Das Rückenmark (Medulla spinalis) reicht beim Erwachsenen vom Foramen magnum bis zum 1./2. Lendenwirbelkörper und verläuft im Spinalkanal. Entsprechend den Austrittspunkten der Spinalnerven kann es in Zervikal-, Thorakal-, Lumbal- und Sakralmark unterteilt werden (das Coccygealmark wird hier aufgrund der untergeordneten Rolle vernachlässigt). Weiterhin wird es in Segmente unterteilt, wobei jedem Spinalnervenpaar ein Segment zugeordnet wird. Unterhalb des 1. LWK, wo das

Rückenmark im Conus medullaris endet, verlaufen nur noch die Fasern der distal davon gelegenen Spinalnerven und werden als Cauda equina bezeichnet.

Die Spinalnerven werden gebildet aus der Vorderwurzel (Radix anterior) und der Hinterwurzel (Radix posterior) und verlassen paarig (rechts und links) den Wirbelkanal durch die Foramina intervertebralia unterhalb der Bogenwurzeln. Ab dem Thorakalmark wird die Nervenwurzel nach dem darüber liegenden Wirbelkörper benannt (seitlich austretender Spinalnerv zwischen L4/L5 = Wurzel L4), im Zervikalmark nach dem darunter liegenden (Kahle und Frotscher 2013; Schünke et al. 2009; Trepel 2009).

#### **2.1.4. Aufbau des Beckens**

Die paarig angelegten Hüftbeine (Ossa coxae), welche aus den drei Anteilen Os ilium, Os ischii und Os pubis zusammengesetzt sind und in der Hüftpfanne (Acetabulum) zusammenlaufen, werden über die Iliosakralgelenke mit dem Kreuzbein (Os sacrum) verbunden. Zusammen mit der knorpeligen Schambeinfuge (Syphysis pubica) wird so der Beckenring gebildet.

Über das Lumbosakralgelenk zwischen dem 5. Lendenwirbelkörper und dem Sakrum wird das Becken mit der Wirbelsäule verbunden.

## **2.2. Degenerative Wirbelsäulenveränderungen**

### **2.2.1. Bandscheibenvorfall**

Die Lordose der Lendenwirbelsäule ist notwendig für den aufrechten Gang (Sparrey et al. 2014). Hierbei wirken auf Wirbelkörper, Bandscheiben und Gelenke im Laufe des Lebens erhebliche Kräfte ein. Auch die Wasserbindungsfähigkeit der Proteoglykane im Nucleus pulposus nimmt um 13-36% ab (Brötz und Weller 2004).

Die Druckverteilung ändert sich mit der Position; während im Stehen der Druck eher zentral über den Bandscheiben lokalisiert ist, verschiebt er sich im Sitzen nach ventral und erhöht sich um bis zu 40%, beim Nach-vorne-Lehnen sogar um bis zu 100% (Nachemson 1975). Dadurch entsteht zum einen eine erhöhte Zugspannung am hinteren Bereich des Anulus fibrosus, wodurch dieser einreißen kann, zum anderen führt es zu einer Verlagerung des Nucleus pulposus nach dorsal. Kommt es in der Folge zur Protrusion oder gar zum Kollaps dieses Gallertkerngewebes, werden die im Spinalkanal

dahinter verlaufenden Nervenfasern (medialer Bandscheibenvorfall) oder die seitlich austretenden Nervenwurzeln (lateral Bandscheibenvorfall) komprimiert. Da vor allem der seitliche Teil der Bandscheibe kaum vom Lig. longitudinale posterius bedeckt wird, kann sich dort am ehesten eine Bruchlücke bilden, durch die es zum Vorfall kommt (Schünke et al. 2007).

Neben Degenerationen werden auch entzündliche Prozesse (Molinos et al. 2015) und eine im Alter herabgesetzte Mikrozirkulation der Lendenwirbelkörper und konsekutive Malnutrition der Bandscheibe diskutiert (Ou-Yang und Lu 2015).

### **2.2.2. Spinalkanalstenose**

Unter den Erkrankungen der Wirbelsäule, stellt die Spinalkanalstenose eine der häufigsten Diagnosen dar. Klinisch wurde sie erstmals 1954 beschrieben (Verbiest 1954). Es wird zwischen angeborenen und erworbenen Formen unterschieden. Unter den erworbenen Formen der Spinalkanalstenose ist es vor allem die degenerative Variante, die gehäuft bei älteren Menschen auftritt (Abbas et al. 2010).

Die Einengung des Spinalkanals oder auch der Foramina intervertebralia kann durch dorsale Spondylophyten, arthrotisch veränderte Facettengelenke aber auch durch aufgrund von mechanischem Stress hypertrophierte und metaplastische Bänder (z.B. Ligg. flava oder Lig. longitudinale posterius) entstehen (Genevay und Atlas 2010; Schünke et al. 2007).

Klinisch fallen an der LWS eine Claudicatio spinalis und oder neurologische Ausfallserscheinungen durch Kompression der entsprechenden Nervenfasern auf (Kalff et al. 2013). Schmerzen werden dabei hauptsächlich in den Beinen oder dem Gesäß angegeben. Auch Muskelschwäche, nächtliche Krämpfe, Schweregefühl und Störungen der Blasenkontrolle können auftreten (Inui et al. 2004; Matsumoto et al. 2009). Die Enge, welche radiologisch gemessen werden kann, korreliert hierbei nicht immer mit der klinischen Symptomatik (Amundsen et al. 1995).

In Abgrenzung zur „echten“ Schaufensterkrankheit (Claudicatio intermittens), welche bei der peripheren arteriellen Verschlusskrankheit (pAVK) entsteht, bessern sich die Schmerzen bei Patienten mit spinaler Enge typischerweise in vornüber geneigter Position, z.B. beim Bergaufgehen und Fahrrad- oder Motorradfahren (Inufusa et al. 1996). Die Patienten bleiben oft lange undiagnostiziert, dekomensieren u.U. plötzlich.

Therapeutisch wird - neben der chirurgischen Versorgung - konservativ mit Physiotherapie, Analgesie sowie Injektion von Kortikosteroiden und Lokalanästhetika gearbeitet (Parr et al. 2009; Rittenberg und Ross 2003; Ammendolia et al. 2013). Für sämtliche konservative Methoden gibt es keine Evidenz für dauerhaft durch sie herbeizuführende Besserung.

### **2.2.3. Spondylolisthesis**

Als Wirbelgleiten (Spondylolisthesis) wird eine Translationsbewegung eines Wirbels gegenüber dem darunter liegenden Wirbelkörper bezeichnet. Diese kann sich nach vorne (Anterolisthesis) oder hinten (Retrolisthesis) richten.

Erstmals beschrieben wurde sie deutlich vor dem Krankheitsbild der Spinalkanalstenose (Junghans 1930). Sie tritt überwiegend (90%) im L4/L5- und L5/S1- Segment auf, wobei Frauen etwa viermal häufiger betroffen sind als Männer (Bolesta und Bohlman 1989; Imhof und Halpern 2006; O'Rourke und Grobler 1998; Rosenberg 1976). Während die Spondylolisthesis vera hauptsächlich bei Jugendlichen den Sonderfall einer pseudarthrotisch ausheilenden Ermüdungs-, selten einer akut traumatischen Fraktur (Pfeiffer et al. 1992) der Pars interarticularis zwischen kranialem und kaudalem Gelenkfortsatz darstellt, ist die sogenannte Pseudospondylolisthesis eine degenerative Erkrankung des älteren Erwachsenen ( Imhof und Halpern 2006; Leonidou et al. 2015; O'Rourke und Grobler 1998).

Die Pseudospondylolisthesis hat ihre Ursache in degenerativen Veränderungen der Facettengelenke oder Bandscheiben (Bolesta und Bohlman 1989; Imhof und Halpern 2006;). Bis zu 65% der Patienten zeigen eine Hypermobilität in den Gelenken, verursacht durch fehlende Straffheit des Bandapparates (Matsunaga et al. 1990).

Die Einteilung beider Formen erfolgt in vier Grade nach Meyerding und bezieht sich auf das prozentuale ventrale Abgleiten im Verhältnis zum darunter liegenden Wirbelkörper:  $1^\circ = 0-25\%$ ,  $2^\circ = 25-50\%$ ,  $3^\circ = 50-75\%$ ,  $4^\circ = > 75\%$ .

Klinisch präsentieren sich die Patienten, bedingt durch einen eingengten Spinalkanal mit intermittierender Claudicatio spinalis (s.o.), oder entsprechenden radikulären Schmerzen (Bolesta und Bohlman 1989; Denard et al. 2010; O'Sullivan 2000).



Neben Physiotherapie, Analgesie und Injektionsbehandlungen steht die operative Stabilisierung des hypermobilen Segmentes mittels Fusion und Dekompression neuraler Strukturen zur Wahl (O'Rourke und Grobler 1998).

#### **2.2.4. Osteochondrose**

Als Osteochondrose wird (nicht nur an der Wirbelsäule) eine degenerative Veränderung von Knochen und Knorpel bezeichnet. Ursachen hierfür können ein Trauma, chronische Belastung oder durch Minderdurchblutung abgelöste Knorpelstücke sein, welche bei Bewegung zu Schmerzen führen. Auch eine Reduktion der Bandscheibenhöhe kann zu einer Belastungsreaktion führen, wodurch es zur Spondylophytenbildung kommt.

#### **2.3. Sagittale Balance**

Als spinale sagittale Balance wird die Fähigkeit der Wirbelsäule beschrieben, sich unter minimalst möglichem Muskeleinsatz optimal im Schwerpunkt zu halten (Dubousset 1998; Pellet et al. 2011).

Die für den aufrechten Gang notwendigen Krümmungen (Lordose und Kyphose) wurden bereits vor 2500 Jahren von Hippokrates beschrieben (Marketos und Skiadas 1999), wobei die Ausprägung dieser Kurven in der Bevölkerung unterschiedlich ist (Duval-Beaupère et al. 1992; Roussouly et al. 2005; Legaye und Duval-Beaupère 2005; Vaz et al. 2002; Vialle et al. 2005).

Da die Stellung des Beckens einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirbelsäule hat, etablierte Dubousset bereits 1984 den Begriff des „pelvic Vertebra“ (Dubousset 1984; Roussouly und Pinheiro-Franco 2011).

Gemessen werden für die Bestimmung der sagittalen Balance mehrere spinale und pelvine Parameter:

##### **2.3.1. C7-Lotwinkel (C7-LW)**

Das C7-Lot verläuft vom Mittelpunkt des 7. Halswirbelkörpers nach kaudal, physiologisch durch die S1-Deckplatte (Roussouly et al. 2006; Schwab et al. 2006).

### **2.3.2. Sagittal-Vertikale Achse (SVA)**

Die Sagittal-Vertikale Achse beschreibt den horizontalen Abstand vom C7-Lot zur S1-Deckplattenhinterkante; sie wird in cm oder mm angegeben und sollte  $\pm 2,5$  cm betragen (Lafage et al. 2008). Fällt die SVA größer aus, liegt also der Schwerpunkt weiter vorne oder hinten, müssen verschiedene Kompensationsmechanismen, welche im Verlauf noch beschrieben werden, dies korrigieren

### **2.3.3. Pelvic Incidence (PI)**

Die Verbindung zwischen dem Hüftkopfmittelpunkt (Hip Axis) und S1-Deckplattenmitte bildet mit der auf den S1-Deckplattenmittelpunkt stehenden Senkrechten die PI. Da die PI aus den ersten drei sakralen Wirbeln, dem Iliosakralgelenk (ISG) und dem Os ilium gebildet wird, kann nach Wachstumsabschluss davon ausgegangen werden, dass sich dieser Winkel nicht mehr ändert. Die geringe Nutationsbewegung im ISG kann vernachlässigt werden (Legaye et al. 1998) (Abb. 2).

### **2.3.4. Pelvic Tilt (PT)**

Der Pelvic Tilt wird gebildet aus einer Vertikalen die den Hüftkopfmittelpunkt schneidet und dem S1-Deckplattenmittelpunkt. Sind im Röntgenbild beide Hüftköpfe überlagert zu sehen, so wird der Mittelpunkt zwischen beiden Hüftköpfen gewählt (Hip-Axis). Anhand des PT kann die Rotation des Beckens abgelesen werden. Große Werte deuten auf eine Reklination des Beckens hin, wodurch die S1-Deckplatte horizontaler steht (Le Huec et al. 2011) (Abb. 2).

### **2.3.5. Sacral Slope (SS)**

Als Sacral Slope wird der Winkel bezeichnet, welcher sich aus einer an die S1-Deckplatte angelegten Tangente und der Horizontalen bildet (Legaye et al. 1998). Ist dieser Winkel groß, steht das Becken in Inklination, während bei kleinem SS das Becken rekliniert ist (Abb.2).

### 2.3.6. Winkelmaße und Zusammenhänge

Die verschiedenen Winkelmaße für PT, PI und SS wurden von mehreren Autoren bereits vermessen und veröffentlicht (Duval-Beaupère et al. 1992; Legaye und Duval-Beaupère 2005; Roussouly et al. 2005; Vaz et al. 2002; Vialle et al. 2005).

*Tabelle 2: PT, PI und SS in Mittelwert und Standardabweichung*

<i>Autor</i>	<i>PT</i>	<i>PI</i>	<i>SS</i>
Vialle 2005	13,2°±6,2°	54,7°±10,6°	41,2°±8,4°
Legaye 2005	12°±6,7°	53,4°±11°	41,7°±8,2°
Roussouly 2005	11,2°±6,5°	51,9°±10,7°	39,9°±8,2°
Duval-Beaupère 1992	10,7°±5,9°	51,8°±9,4°	40,9°±7°
Vaz 2002	12,3°±5,9°	51,7°±11,5°	39,4°±9,3°

*Pelvic Tilt (PT), Pelvic Incidence (PI) und Sacral Slope (SS) in Mittelwert und Standardabweichung*

Der anatomische nicht veränderliche Parameter Pelvic Incidence setzt sich geometrisch zusammen aus Pelvic Tilt und Sacral Slope:

$$PI = PT + SS$$

Daraus resultiert, dass auch die Summe aus PT und SS gleich bleiben muss. Wird SS also größer, muss PT entsprechend kleiner werden und vice versa (Legaye et al. 1998; Le Huec et al. 2011) (Abb. 2).

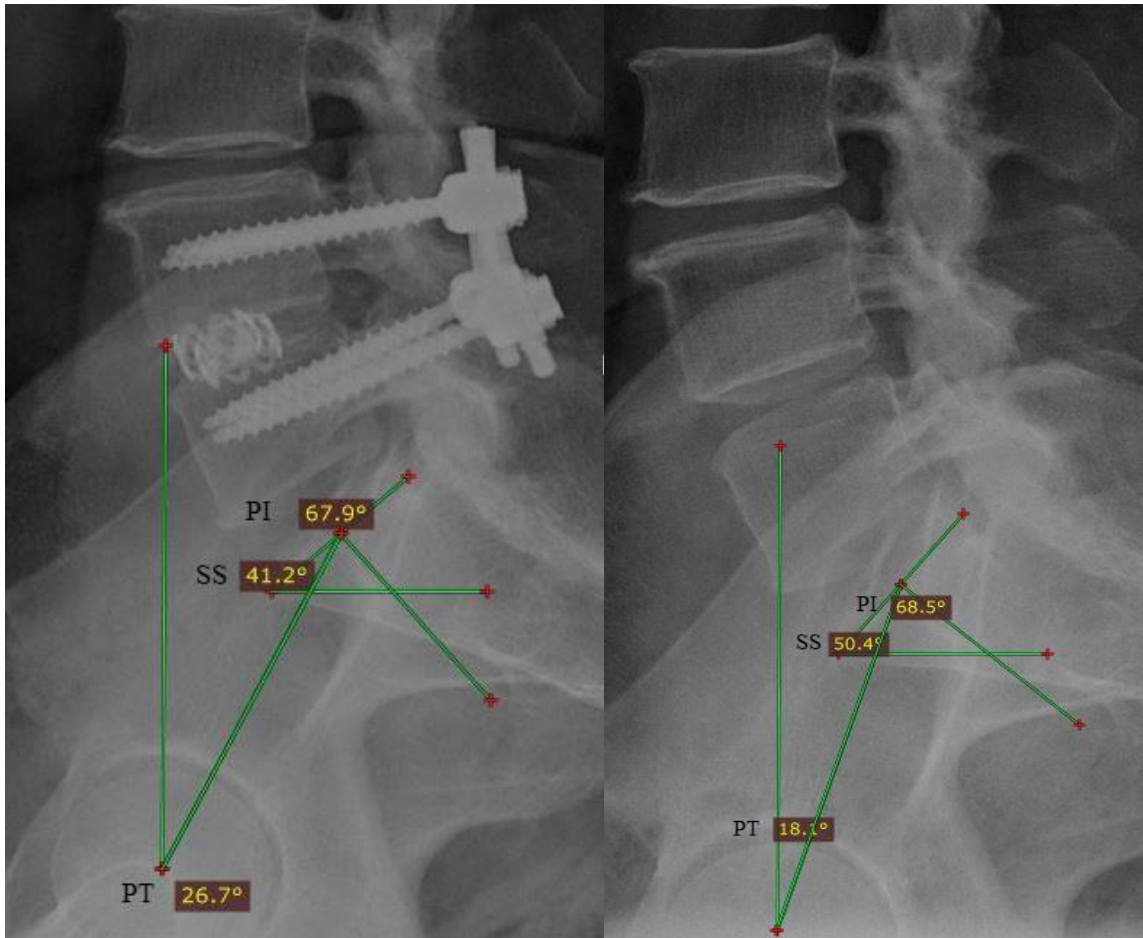


Abbildung 2: Sacral Slope, Pelvic Incidence und Pelvic Tilt prä- und postoperativ

Der PI steht als Maß für die Tiefe des Beckens und kann nach der Formel

$$PI = \text{lumbale Lordose} \pm 9^\circ$$

näherungsweise bestimmt werden (Roussouly et al. 2005) (Abb. 2).

In vorherigen Studien konnte gezeigt werden, dass eine hohe Korrelation zwischen Pelvic Incidence und lumbaler Lordose, zwischen Sacral Slope und lumbaler Lordose sowie zwischen Pelvic Incidence und Sacral Slope besteht (Legaye et al. 1998; Legaye und Duval-Beaupère 2005; Vaz et al. 2002).

Außerdem stellten Legaye und Duval-Beaupère Formeln zur Berechnung von Sacral Slope und der lumbalen Lordose auf (Legaye und Duval-Beaupère 2005):

$$\text{Sacral Slope} = (0,5481 \times PI) + 12,7^\circ (\pm 6,39^\circ)$$

$$\text{Lumbale Lordose} = (1,087 \times \text{Sacral Slope}) + 21,61^\circ (\pm 4,16^\circ)$$

Ein Verlust der lumbalen Lordose trägt stark zur Imbalance bei (Gelb et al. 1995). Hierdurch wandert die Sagittal-Vertikale Achse nach vorne, wodurch sich auch das Schwerelot nach ventral bewegt (Barrey et al. 2007). Um dies auszugleichen, kann es zu einer teilweisen Aufhebung der thorakalen Kyphose kommen. Ebenso wird das Becken zunehmend rekliniert, um den Schwerpunkt wieder nach dorsal zu verlagern. Dadurch wird die S1-Deckplatte in eine zunehmend horizontale Position gebracht. Hüfte und Knie müssen, um diese Position zu halten, teilweise gebeugt werden. Nicht streckbare Kniegelenke, z.B. bei Arthrose, wirken ihrerseits entsprechend auf die Wirbelsäule ein, wohingegen nach neuesten noch unpublizierten Daten eine Beugekontraktur der Hüften hierfür vernachlässigbar sein soll.

## **2.4. Operative Verfahren**

### **2.4.1. Indikation**

Konsens besteht in der Fachwelt darüber, dass nach Ausschöpfung konservativer Behandlungsmöglichkeiten Patienten operativ behandelt werden können, welche unter folgenden Erkrankungen leiden:

*Degenerative Spondylolisthesis, Osteochondrose, Diskusprolaps, Spinalkanalstenose*

Eine notfallmäßige operative Versorgung wird nur bei manifesten und frischen Lähmungen empfohlen. Eine genaue Analyse der diskutierten Entscheidungsalgorithmen soll hier ausdrücklich nicht versucht werden.

### **2.4.2. OP-Techniken**

In der Behandlung der degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen stehen mehrere operative Verfahren zur Verfügung; einen weltweit unumstrittenen differenzialtherapeutischen Konsens gibt es bisher nicht (Gu et al. 2014; Rickert et al. 2015; Ye et al. 2013; Zhang et al. 2014).

Am häufigsten empfohlen werden dabei PLIF (Posterior Lumbar Interbody Fusion) sowie TLIF Transforaminal Lumbar Interbody Fusion (Zhang et al. 2014). Zunehmend haben diese beiden dorsal zugehenden Verfahren in verschiedenen Varianten insbesondere in Bezug auf die ventrale Implantatwahl die klassische retro- oder transperitoneale ALIF

(Anterior Lumbar Interbody Fusion) und ihre neueren minimal invasiven „Verwandten“ („XLIF“) verdrängt.

PLIF wurde erstmals von Cloward beschrieben und im Verlauf modifiziert (CLOWARD 1953; Lin 1977). PLIF ermöglicht über den dorsalen Zugang eine 360° Stabilisierung und Fusion (Fraser 1995). Unilaterale Modifikationen mit schräg („oblique“) eingebrachten Cages sind gegenwärtig am weitesten verbreitet.

Die von Harms und Rolinger erstbeschriebene TLIF-Technik bietet die Möglichkeit der Fusion mittels eines unilateralen transforaminalen Zugangsweges (Harms und Rolinger 1982).

Zur Stabilisierung der Segmente, zwischen denen ein Cage eingebracht ist wird fast obligat ein Stabsystem verbaut, welches durch Pedikelschrauben fixiert wird. Dies zusammen mit Entknorpelung der Facettengelenke und Knochentransplantation führt zur Versteifung der entsprechenden Wirbelsäulensegmente (Spondylodese). Die hier eingesetzten Verfahren sind in Abb. 3 dargestellt:

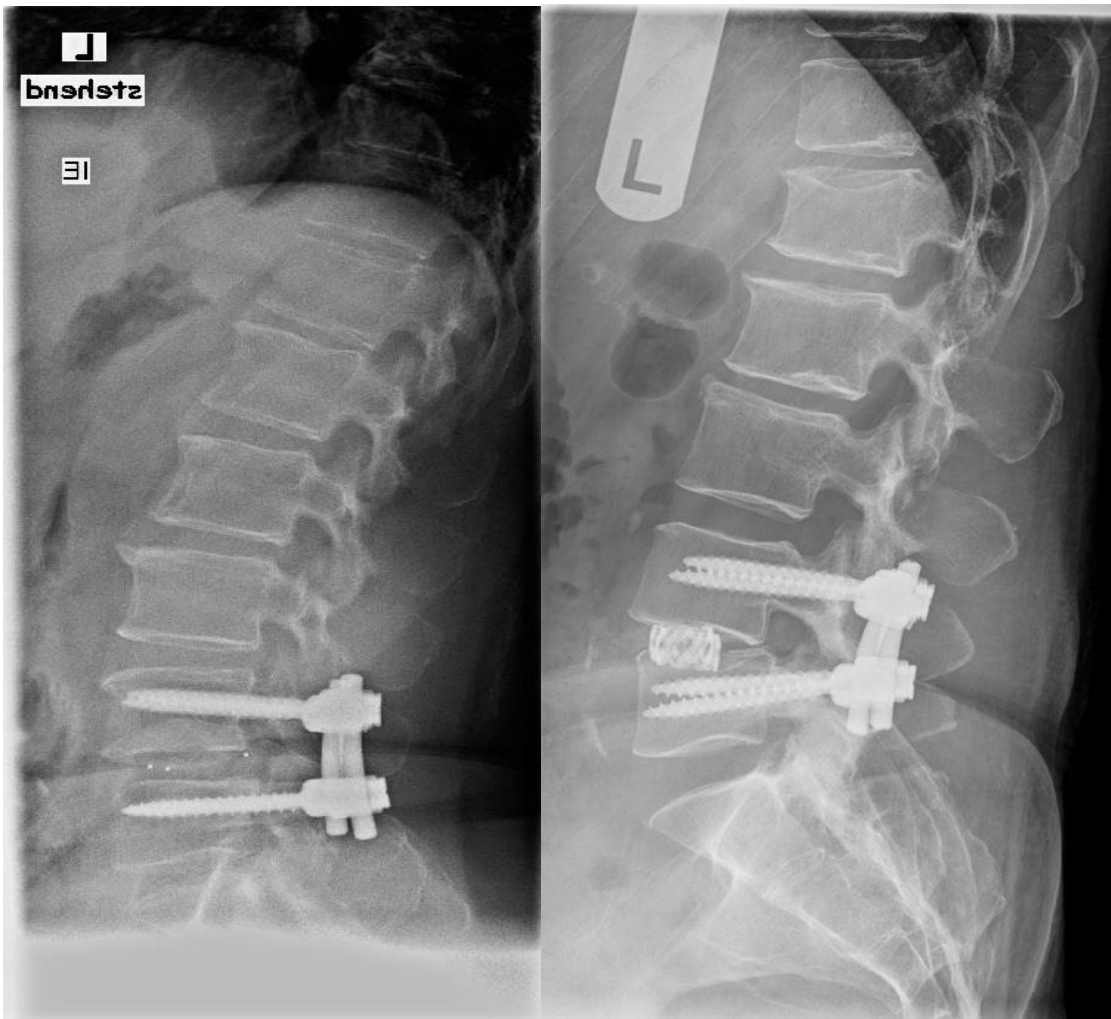


Abbildung 3: Verwendete Cageformen

*Links ein „oblique“ eingebrachter Cage aus nicht röntgendichtem Polyether-Etherketon (PEEK)-Material mit 4° konstruktivem Lordosewinkel, dessen vordere und hintere Begrenzung mit Tantalmarkern abgegrenzt ist. Trotz seiner ventral im Vergleich zu dorsal etwas höheren Bauform resultiert zumindest in diesem Fall keine Segmentlordose. Rechts ein „Harms-Cage“ aus Titanmaterial, welcher mit Drahtschneidern intraoperativ in Höhe und Randform angepasst werden kann. Beide Cages sind mit (kaum sichtbarem) Knochentransplantatmaterial befüllt.*

Eine sogenannte Standalone Technik mit ventralem Cage ist nur noch selten anzutreffen und eine alleinige Instrumentation ohne Zerspannung von kleinen Wirbelgelenken und/oder Knochenanlagerung ist zwar radiologisch primär nur schwer von einer Spondylodese zu unterscheiden, aber technisch nicht zureichend, weil ein mittel- bis langfristiges Materialversagen so nicht ausgeschlossen werden kann.

Minimalisierte Zugangswege haben zur Evolution der herkömmlichen Techniken beigetragen welche durch große Wundfläche und Muskelablösung häufiger zu relevanten Blutverlusten und stärkeren postoperativen Schmerzen führte.

### **2.4.3. Postoperative Probleme**

Flat-back-Deformität, obere/untere Anschlussinstabilität, Materialversagen, Fehlende Fusion, Durafistel, epidurale Vernarbung, chronische Wurzelreizung und Wurzelverletzung sind die häufigsten Probleme, die im Rahmen einer Segmentfusion im Bereich der Wirbelsäule entstehen können. Sie werden häufig mit dem unspezifischen Begriff „failed back“ bezeichnet.

## **3. Material und Methodik**

### **3.1. Methodische Vorbereitungen**

Zunächst wurden Wirbelsäulenganzaufnahmen von 25 Patienten mit Hilfe der Planungssoftware Vertaplan®, sowie der Freeware Radiant® vermessen.

Messgrößen waren hierbei: C7-S1-Lotabstand (= Sagittal Vertical Axis, SVA), L1-S1-Lotwinkel, Lordose, Sacral Slope (SS) sowie der L4/L5-Fachwinkel. Bei der Vermessung mit Radiant® wurde zusätzlich der Winkel der Verbindung vom C7-Mittelpunkt zur S1-Deckplattenmitte mit der Horizontalen gemessen (Spinal Tilt = ST).

In der Kontrollgruppe wurden bei 40 Patienten, welche seit 2012 an den Kliniken für Wirbelsäulen Chirurgie am Klinikum Lörrach sowie am Zentralklinikum Bad Berka auf Höhe L4/L5 mittels Cage versorgt wurden, folgende Parameter bestimmt: L1-S1-Lotwinkel, Lordose, SS sowie L4/L5-Fachwinkel. Diese Messungen wurden sowohl bei präoperativ als auch bei postoperativ erstellten Röntgenzielaufnahmen der LWS durchgeführt.



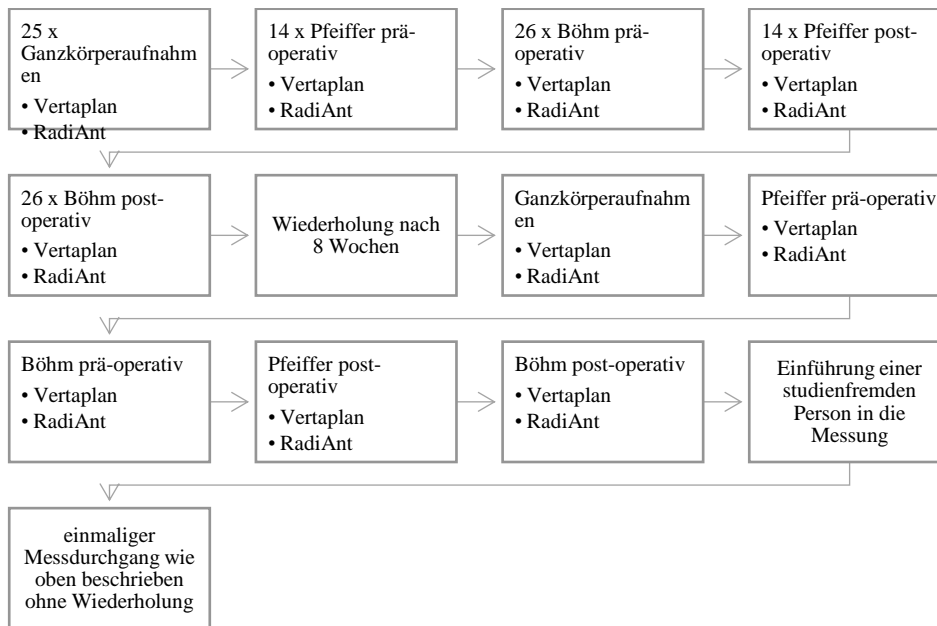


Abbildung 4: Workflow der Messungen mit Test, Re-Test und Intertest

Alle Messungen wurden zur Bestimmung der Test-Retest-Reliabilität jeweils zwei Mal durchgeführt. Zur Bestimmung der Inter-Tester-Reliabilität wurden die Messungen nach vorheriger Einführung durch eine studienfremde Person durchgeführt. Außerdem wurden die Werte des Vertaplan®- mit denen des Radiant®-Programmes korreliert.

### 3.2. Patienten - Wirbelsäulenganzaufnahmen

Für die Kontrollgruppe wurden Wirbelsäulenganzaufnahmen von 26 Patienten ausgewertet. Davon gingen 25 Bilder in die Berechnung mit ein, eines musste aufgrund zu schlechter Beurteilbarkeit ausgeschlossen werden. Die Aufnahmen wurden mit dem EOS-Imaging®-System erstellt. Dabei befanden sich die Patienten in stehender Position mit den Händen an einer Haltestange auf Brusthöhe.

Hierbei handelte es sich um 13 weibliche (52 %) und 12 männliche (48 %) Patienten. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen lag der Median der Gesamtgruppe bei  $71 \pm 15,3$  Jahren. 1 Patient war zwischen 20-39 Jahre (4 %), 6 Patienten zwischen 40 -59 Jahre (24 %), 16 Patienten zwischen 60-79 Jahre (64 %) und 2 Patienten über 80 Jahre (8 %) alt. Der jüngste Patient war 18 Jahre, der älteste 83 Jahre alt.

Die Röntgenaufnahmen wurden jeweils zwei Mal im Abstand von 8 Wochen mit der Planungssoftware Vertaplan® und dem als Freeware erhältlichen DICOM-Viewer Radiant® ausgemessen. Außerdem wurden zur Berechnung der Intertester-Reliabilität

die Aufnahmen durch eine studienfremde Person jeweils einmal mit Vertaplan® und Radiant® vermessen.

### **3.2.1. Patienten – LWS-Zielaufnahmen prä- und postoperativ**

In der Untersuchungsgruppe wurden Wirbelsäulenzielaufnahmen der LWS von 51 Patienten ausgewertet, welche sowohl präoperativ als auch postoperativ im Zeitraum von 2012 bis 2015 an der Klinik für Wirbelsäulen Chirurgie Lörrach sowie am Zentralklinikum Bad Berka erstellt wurden. Dabei handelte es sich um Patienten, welche aufgrund von Instabilität mit oder ohne Spinalkanaleinengung auf Höhe L4/L5 monosegmental in PLIF- oder TLIF-Technik mit einem Cage und dorsalem Schrauben-Stab-System stabilisiert wurden. Es gingen 40 Bilder in die Berechnung mit ein, 14 von Prof. Pfeiffer und 26 von Prof. Böhm, 11 mussten aufgrund zu schlechter Beurteilbarkeit ausgeschlossen werden. Die Aufnahmen wurden im lateralen Strahlengang, mit Zentralstrahl auf etwa dem 3. Lendenwirbel erstellt. Dabei befanden sich die Patienten in habitueller stehender Neutral-Null Position.

Hierbei handelte es sich um 23 weibliche (57,5 %) und 17 männliche (42,5 %) Patienten. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen lag der Median der Gesamtgruppe bei  $60,5 \pm 11,5$  Jahren. 2 Patienten waren zwischen 20-39 Jahre (5 %), 17 Patienten zwischen 40 -59 Jahre (42,5 %), 21 Patienten zwischen 60-79 Jahre (52,5 %) und kein Patient über 80 Jahre alt. Der jüngste Patient war 23 Jahre, der älteste 77 Jahre alt.

### **3.2.2. Gemessene Winkel und Strecken**

Folgende Winkel und Strecken wurden mit RadiAnt® und Vertaplan® ausgemessen:

#### **- L4/L5-Fachwinkel**

Dieser Winkel besteht zwischen Bodenplatte von LWK 4 sowie Deckplatte von LWK 5.

#### **- Sacral Slope**

Der Sacral Slope ist der Winkel zwischen der S1-Deckplatte und der Horizontalen.

#### **- Lordose**

Der Lordosewinkel wird hier zwischen der Th12-Bodenplatte und der S1-Deckplatte gemessen.

### **- Sagittal-Vertikale Achse**

Hier wird eine Strecke gemessen, welche orthogonal zu einem durch den Mittelpunkt des 7. HWK gelegten Lot verläuft und den Abstand vom diesem Lot zur S1-Deckplattenhinterkante misst.

### **- L1-S1-Lotwinkel**

Dieser Winkel wird zwischen einem Schenkel, der durch den L1-Deckplattenmittelpunkt und den S1-Deckplattenmittelpunkt geht und der Vertikalen gemessen.

### **- Spinal Tilt**

Als Spinal Tilt wird der Winkel berechnet, welcher sich zwischen der Strecke von C7-Mittelpunkt und S1-Deckplattenmittelpunkt zur Horizontalen ergibt. Dieser Winkel war im seinerzeitigen Repertoire von Vertaplan® nicht enthalten und wurde nur mit RadiAnt® gemessen.

## **3.3. Methode**

Die Wirbelsäulenganzaufnahmen wurden von der Firma Spontech® zur Verfügung gestellt. Dabei handelte es sich um Stehendaufnahmen von Patienten mit chronischen Rückenschmerzen, welche mit dem EOS-Imaging® erstellt wurden.

Von den 40 Patienten in der Untersuchungsgruppe wurden 14 im KKH Lörrach und 26 am Zentralklinikum Bad Berka operiert.

## **3.4. Messung mit RadiAnt® - Wirbelsäulenganzaufnahmen**

Die Software RadiAnt® ist ein PACS-DICOM Viewer für medizinische Bilder und kann über das Internet geladen werden.

Nach dem Starten des Programmes und dem Laden der einzelnen Bilder kann in einem hierfür vorgesehenen Fenster mit der Messung begonnen werden.

Entsprechend der Vergleichssoftware Vertaplan® wird das Bild nun mit der ventralen Seite zum linken Bildschirmrand hin ausgerichtet. Die annäherungsweise Bestimmung der Eckpunkte erfolgt bei dieser Methode mit Hilfe jeweils eines Kreises pro Ecke. Damit die Messungen vergleichbar sind, wird zu Beginn immer der gleiche Kreis wie folgt konstruiert:

### 3.4.1. Kreiskonstruktion

Um das Arbeitsfenster befindet sich ein rechteckiges Maß, welches benutzt wird, um zwei Strecken von je 6 mm im 90° Winkel aneinander zu legen (Abb. 3). Anschließend wird mit dem Ellipse-Werkzeug ein Kreis konstruiert, welcher mit den „Steuerkreuzen“ (rote Kreuze an allen 4 Ecken des Kreises) in den vorgefertigten Winkel passt und mit diesem deckungsgleich abschließt. Dadurch entsteht ein Kreis mit einem Durchmesser von 6 mm (Abb. 4). Dies entspricht etwa 1/6 des Wirbelkörpers in dorso-ventraler Ausdehnung und hat sich im Verlauf der Messungen als bestes Größenverhältnis zur Annäherung der Eckpunkte bewährt. Daher wird dieses Maß für die Auswertung aller Wirbelsäulenganzaufnahmen gewählt.

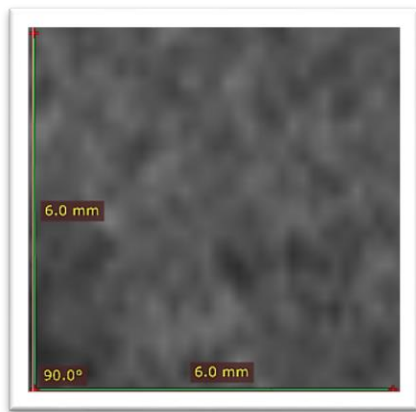


Abbildung 5: Konstruktion des rechten Winkels mit 2 gleich langen Schenkeln

Zwei Strecken (grün) mit je 6 mm Länge werden an den roten Hilfsrahmen im 90° Winkel angelegt

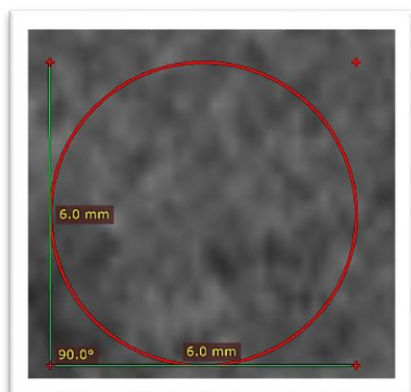
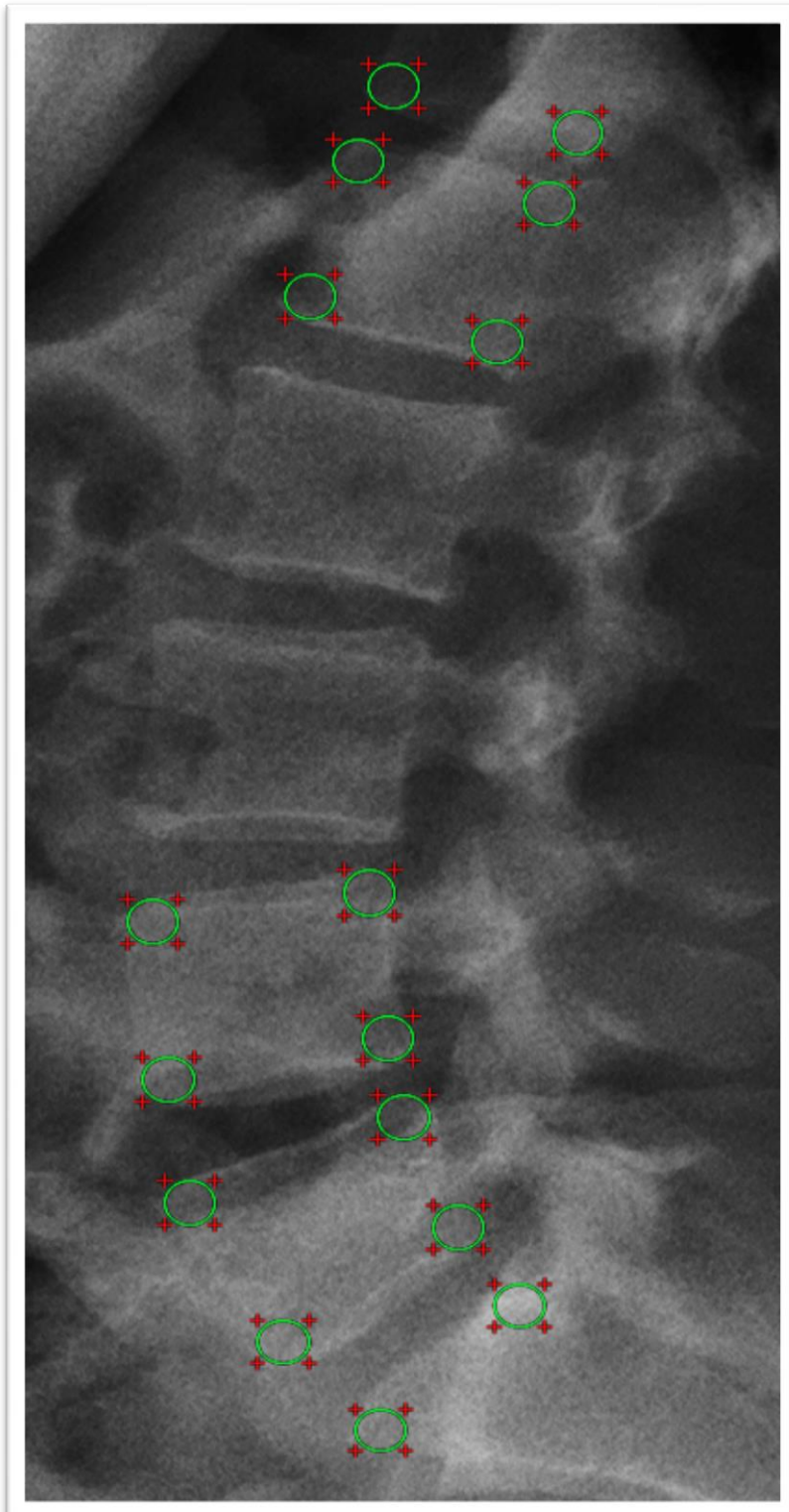


Abbildung 6: Kreiskonstruktion

Ein konstruierter Kreis (rot) wird in den vorgefertigten Winkel (grün) gelegt, so dass die „Steuerkreuze“ deckungsgleich übereinander liegen.

Diese Kreise werden nun kopiert und in alle 4 Ecken der Wirbelkörper von L1, L4 und L5 sowie den Ecken der Grundplatte von Th12 und Deckplatte von S1 eingepasst (Abb.



5)

Abbildung 7: Eckpunkte

Markierung der Eckpunkte der Th12-Grundplatte, S1-Deckplatte sowie allen 4 Ecken von L1, L4 und L5

### 3.4.2. C7-Mittelpunkt

Da für die späteren Messungen auch der Mittelpunkt von C7 benötigt wird, werden zwei Diagonalen (von apikal-ventral nach basal-dorsal und von apikal-dorsal nach basal-ventral) durch den 7. Halswirbelkörper gelegt und der Schnittpunkt als näherungsweise Mittelpunkt M1 bestimmt (Abb. 6)

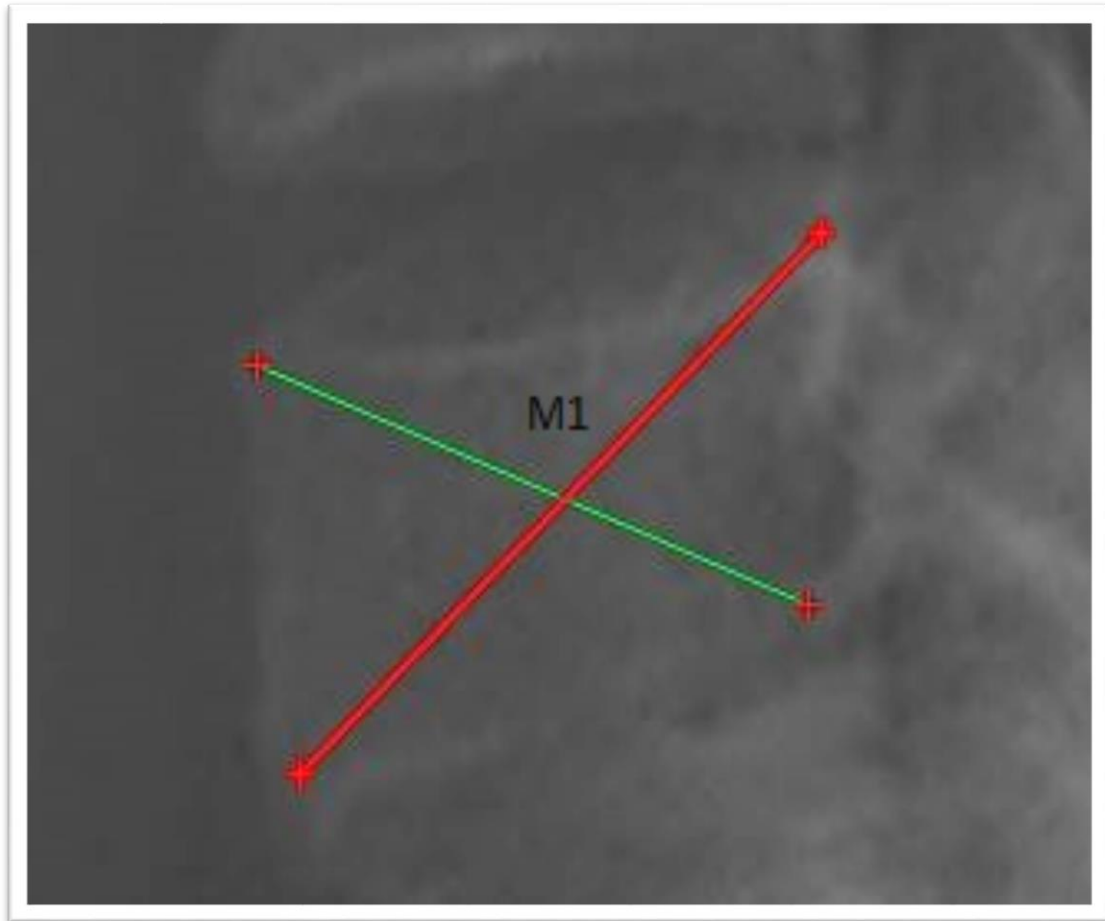


Abbildung 8: C7-Mittelpunkt

Die Diagonalen durch den 7. Halswirbel schneiden sich im Mittelpunkt M1.

### 3.4.3. Eckpunktbestimmung

Die Kreise werden nun, unter Zuhilfenahme verstärkter Kontrastierung, Helligkeitsanpassung und unter starker Vergrößerung so in die Ecken eingepasst, dass diese mit der Deckplatte und einer ventralen oder dorsalen Kante, oder mit der Grundplatte und einer ventralen oder dorsalen Kante abschließen (Abb. 7)

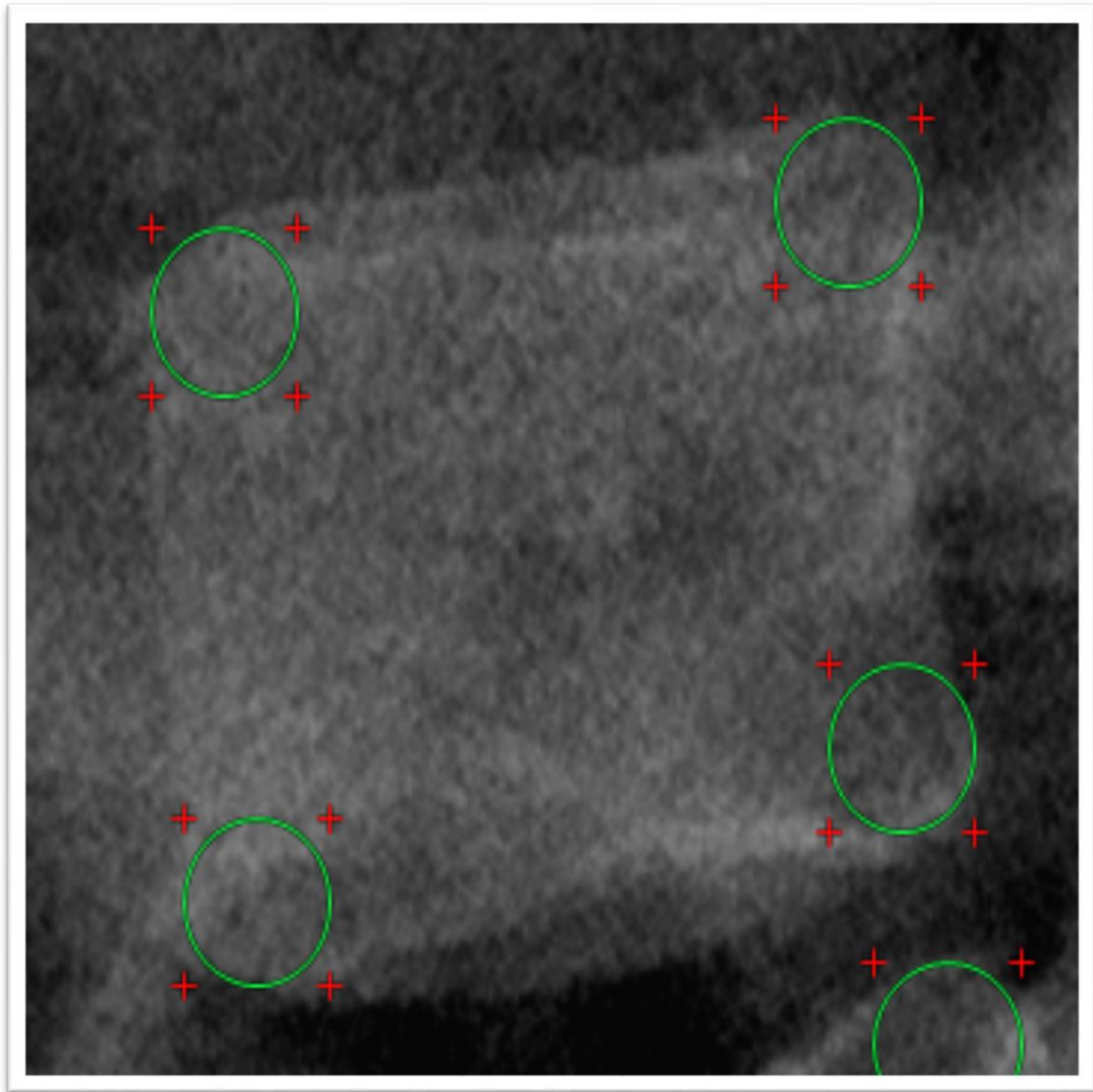


Abbildung 9: Einpassen der Eckpunkte

*Die kranialen Kreise liegen an Deckplatte und dorsaler oder ventraler Kante an, die basalen Kreise liegen an der Grundplatte und dorsaler oder ventraler Kante an.*

Um den Mittelpunkt  $M_k$  jedes Kreises zu bestimmen, werden je zwei, im rechten Winkel zueinander stehende, Strecken durch die „Steuerkreuze“ gelegt (Abb. 8).

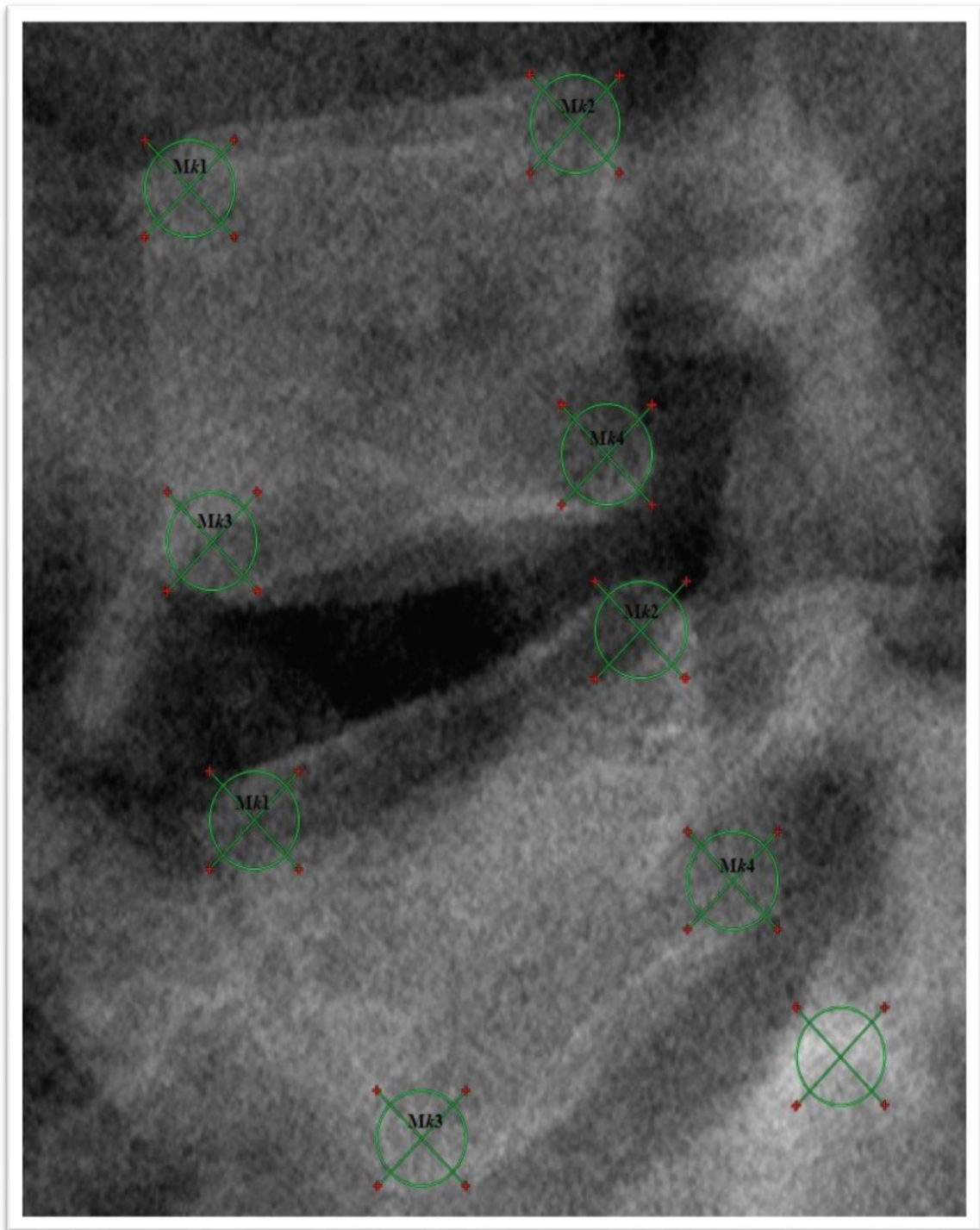


Abbildung 10: Mittelpunkte der „Eckkreise“

Die Mittelpunkt  $M_{k1} - M_{k4}$  werden durch je zwei, aufeinander senkrecht stehende Diagonalen bestimmt.



Es werden nun zwei Diagonalen durch den Wirbelkörper gelegt. Die erste schneidet  $Mk1$  und  $Mk4$ , die zweite schneidet  $Mk2$  und  $Mk3$ . Die äußeren Schnittpunkte mit den Kreisen werden als  $S1-S4$  bezeichnet (Abb. 9).

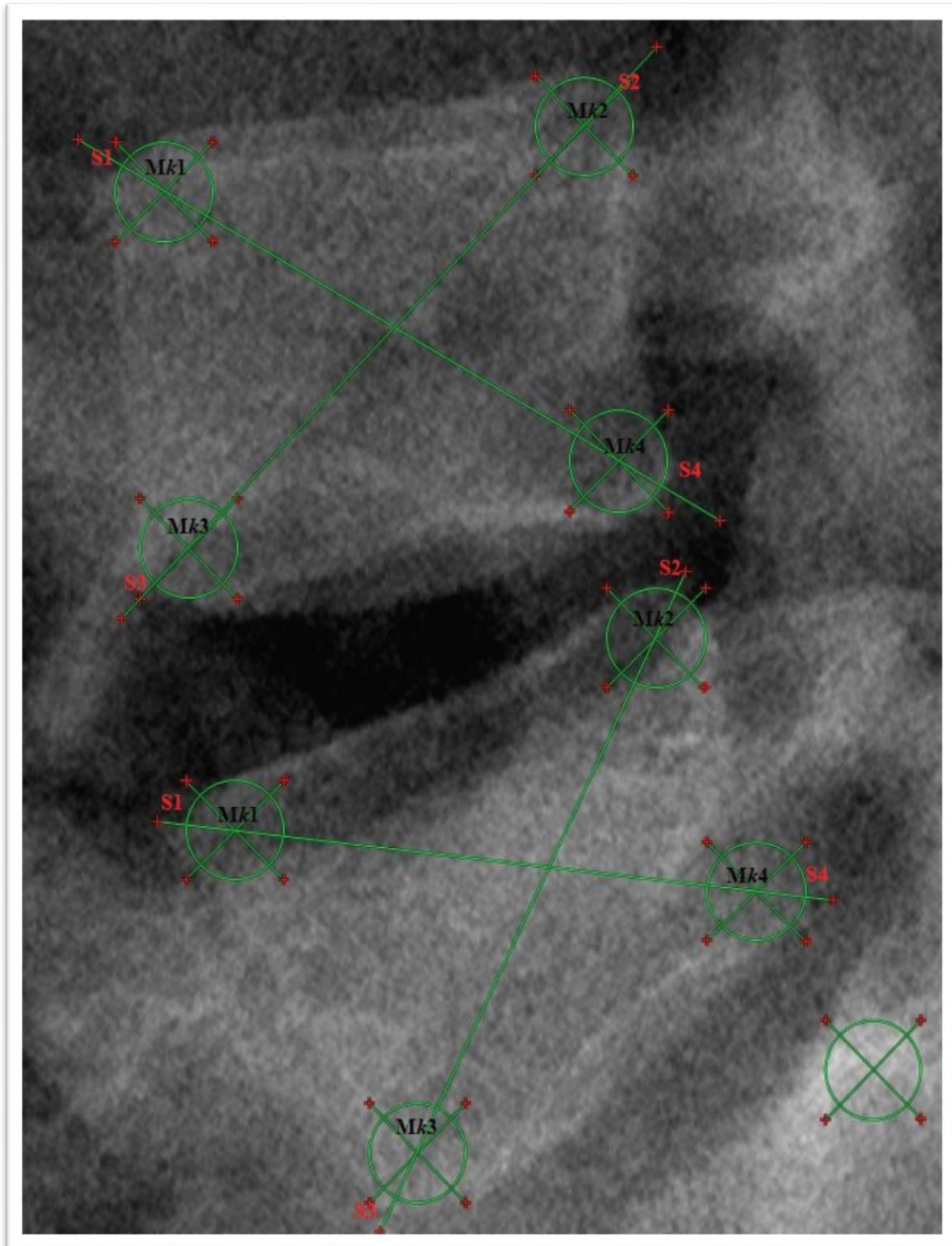


Abbildung 11: Diagonalen durch den Wirbelkörper

1. Diagonale durch Mk1 und Mk4 mit den Kreis-Schnittpunkten S1 und S4, die 2. Diagonale durch Mk2 und Mk3 mit den Kreis-Schnittpunkten S2 und S3

#### 3.4.4. L4/L5-Fachwinkel

Zur Bestimmung des Fachwinkels L4/L5 wird nun mit Hilfe des Cobb-Winkel-Werkzeugs eine Strecke a durch S3 und S4 des oberen Wirbelkörpers (L4) und eine Strecke b durch S1 und S2 des darunter liegenden Wirbelkörpers (L5) gezogen und der Winkel  $\alpha$  abgelesen (Abb. 10).

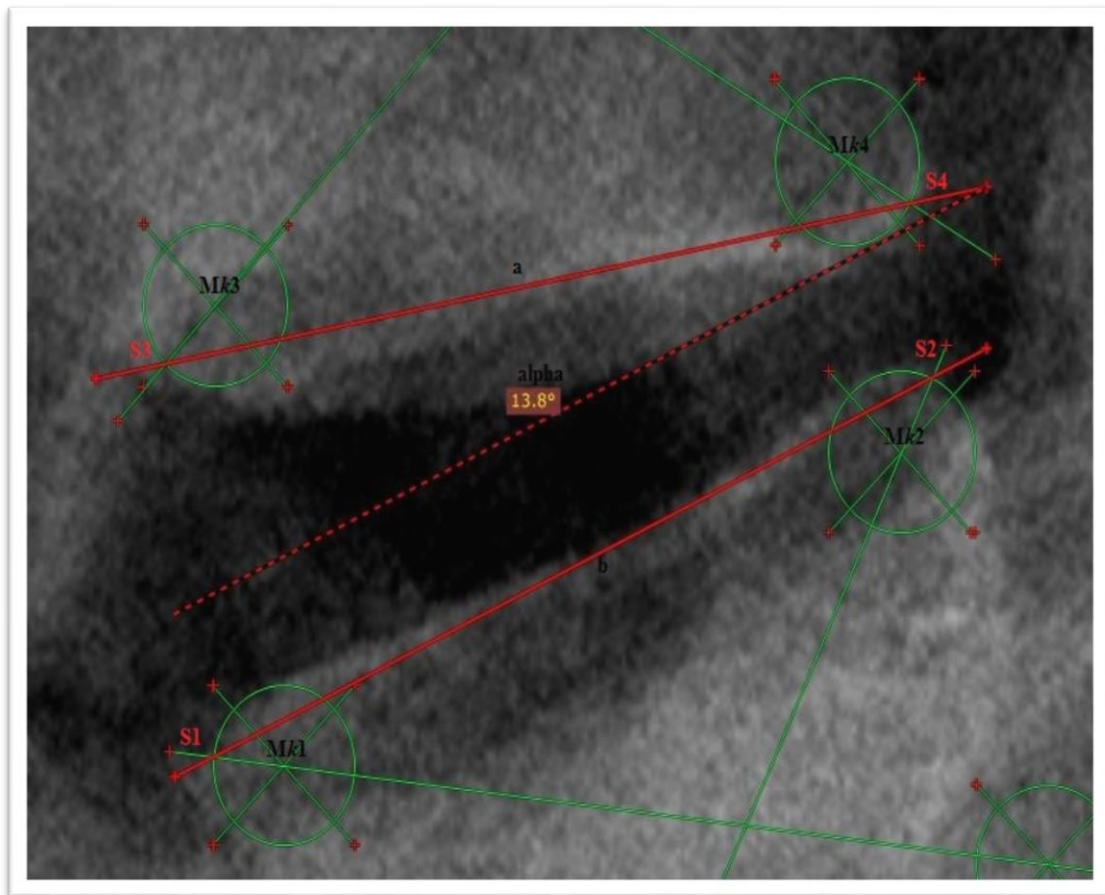


Abbildung 12: L4/L5-Fachwinkel

Die Strecken a (durch S3 und S4), sowie b (durch S1 und S2) bilden den L4/L5-Winkel  $\alpha$  13,8°.

### 3.4.5. Sacral Slope

Für den Sacral Slope (SS) wird mit dem Cobb-Winkel-Werkzeug eine Strecke  $e$  tangential an  $K1$  und  $K2$  angelegt. Der zweite Schenkel  $d$  wird deckungsgleich auf den horizontalen Hilfsrahmen gelegt und der Winkel  $\gamma$  kann abgelesen werden (Abb. 11).

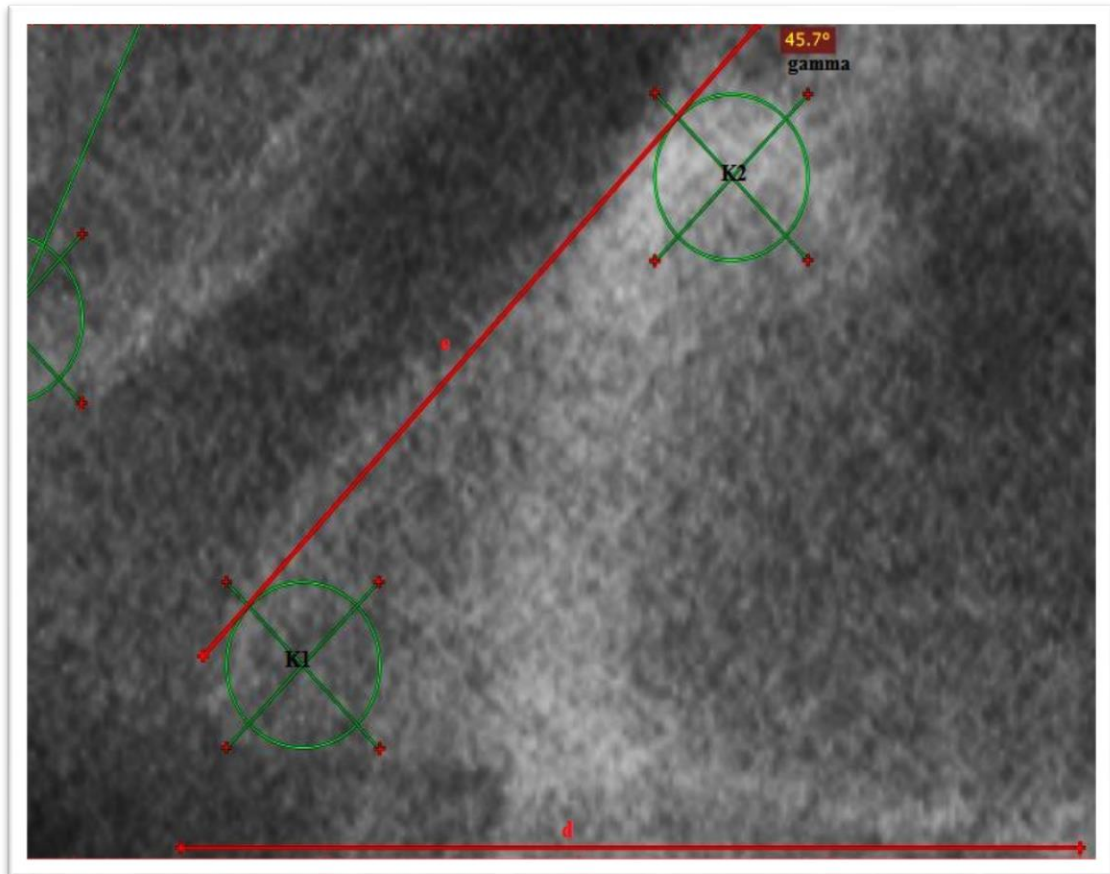


Abbildung 13: Sacral Slope

Strecke  $e$  (Tangente an  $K1$  und  $K2$ ) bildet mit Strecke  $d$  (hier zur besseren Ansicht parallel zum horizontalen Hilfsrahmen) den Sacral Slope Winkel  $\gamma 45,7^\circ$ .

### 3.4.6. Lordose

Zur Lordosebestimmung wird mit dem Cobb-Winkel-Werkzeug eine Strecke  $e$  tangential an  $K1$  und  $K2$  angelegt. Der zweite Schenkel  $f$  wird tangential an  $K3$  und  $K4$  (an der Bodenplatte des 12. Brustwirbelkörpers) angelegt und der Winkel  $\delta$  abgelesen (Abb. 12).

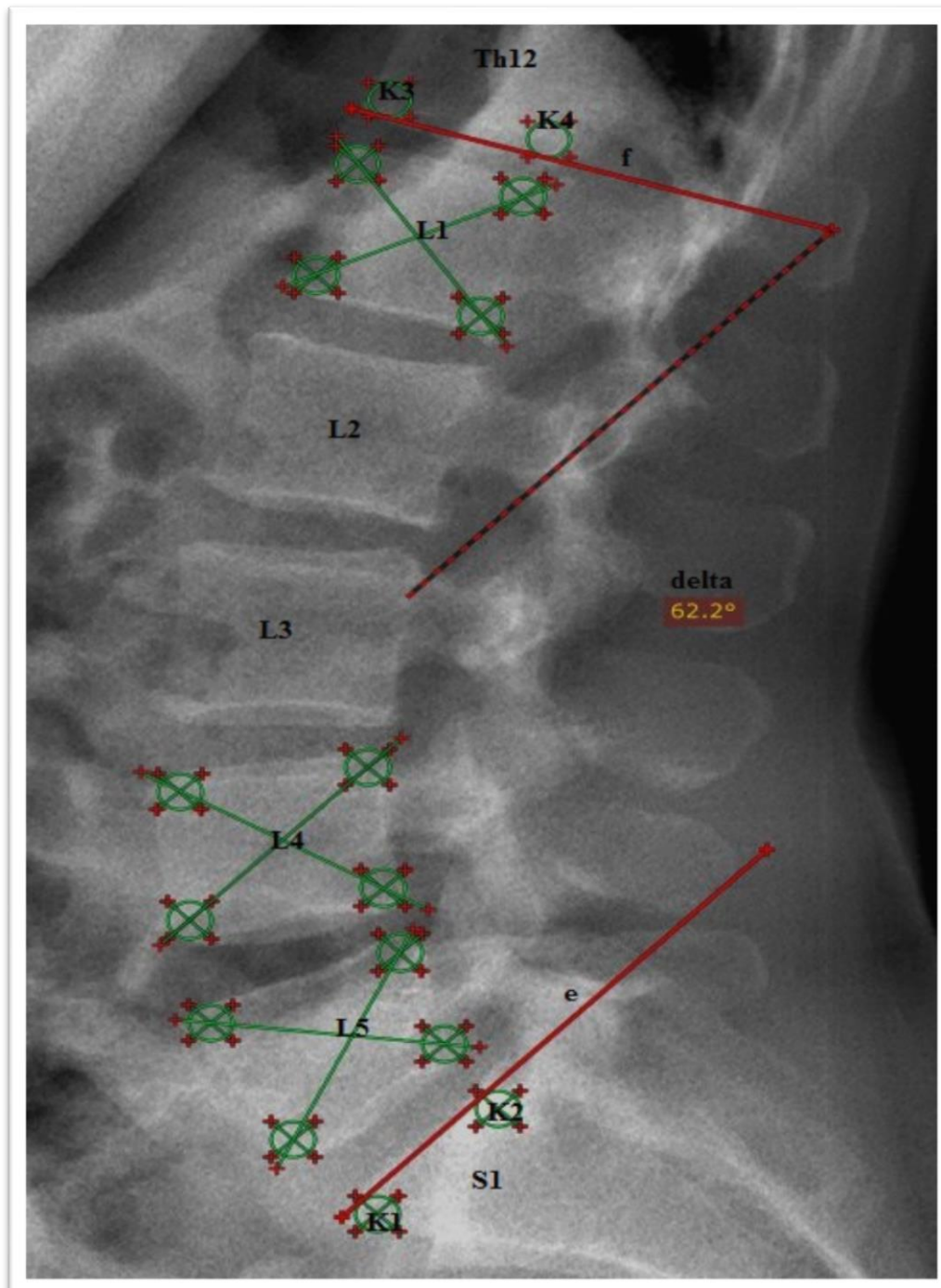


Abbildung 14: Lordose-Winkel

Strecke  $e$  (Tangente an  $K1$  und  $K2$ ) und Strecke  $f$  (Tangente an  $K3$  und  $K4$ ) bilden den Lordose-Winkel  $\delta$  62,2°.

### 3.4.7. C7-Lotabstand, SVA

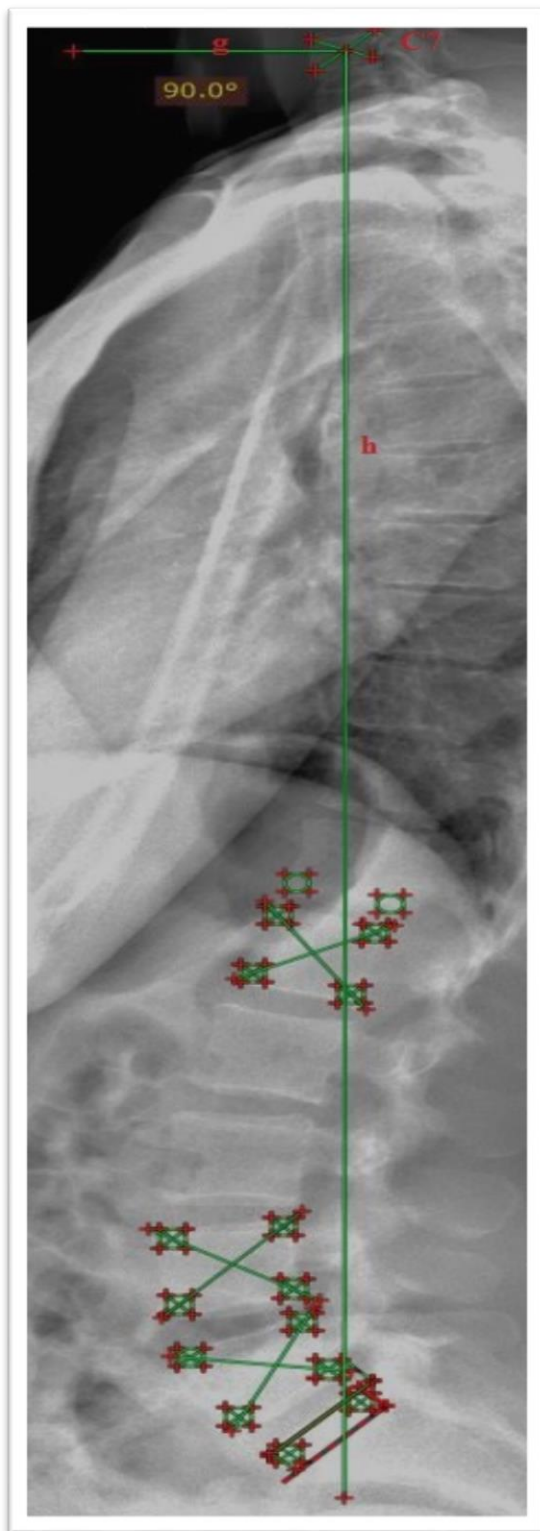


Abbildung 15: Lot durch C7

Schenkel g (hier zur besseren Ansicht parallel zum horizontalen Hilfsrahmen versetzt) bildet mit h einen  $90^\circ$  Winkel. Das Lot h verläuft durch M1 nach sakral.

Die Messung des C7-Lotabstandes erfordert einige Schritte. Zuerst wird mit dem Winkel-Werkzeug ein Lot gefällt. Dazu wird der erste Schenkel g deckungsgleich auf den oberen, horizontalen Hilfsrahmen gelegt. Der zweite Schenkel bildet nun das Lot h, welches im  $90^\circ$  Winkel zu g steht und durch den Mittelpunkt M1 des 7. Halswirbels verläuft (Abb.13).

Um den Lotabstand zu bestimmen, muss die S1-Deckplatten-Hinterkante definiert werden. Hierzu wird mit dem Cobb-Winkel-Werkzeug ein Schenkel  $e$  tangential an K1 und K2 angelegt. Der zweite Schenkel  $k$  wird im  $90^\circ$  Winkel zu  $e$  von dorsal an K2 tangential angelegt. Der Schnittpunkt mit  $e$  wird als  $S_d$  bezeichnet (Abb. 14).

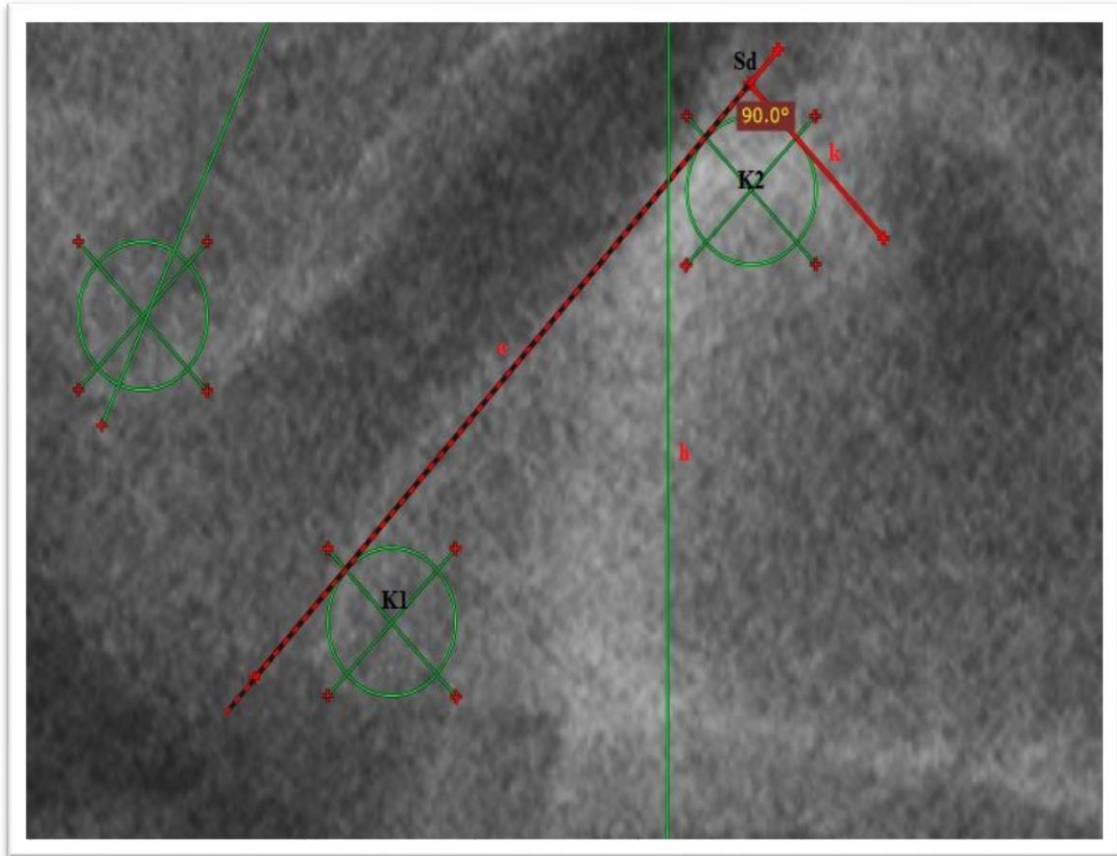


Abbildung 16: S1-Deckplattenhinterkante

Bestimmung der S1-Deckplattenhinterkante. Die Schenkel  $e$  und  $k$  stehen orthogonal zueinander, der Schnittpunkt ist  $S_d$ .

Mit dem Cobb-Winkel-Werkzeug wird dann ein Schenkel  $l$  deckungsgleich auf den horizontalen Hilfsrahmen gelegt. Der zweite Schenkel  $m$  liegt parallel zu  $l$  und schneidet den Punkt  $S_d$ , sowie das C7-Lot  $h$  im Punkt  $H$ . Mit dem Lineal-Werkzeug kann nun diese Strecke  $H-S_d$  gemessen und als C7-Lotabstand (SVA) in die Excel-Tabelle eingetragen werden (Abb. 15). Fällt das Lot vor die S1-Deckplattenhinterkante, wird der Wert mit positivem Vorzeichen vermerkt.

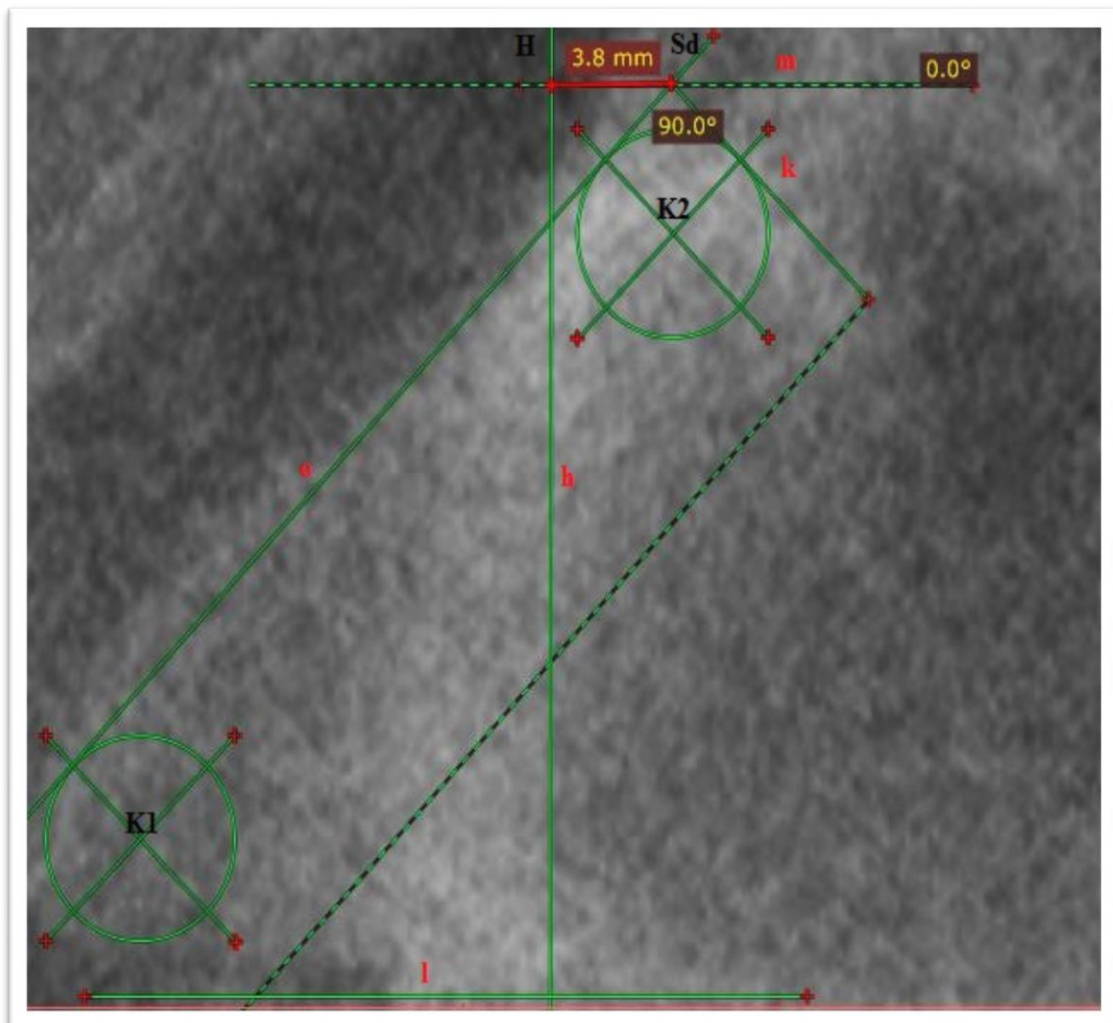


Abbildung 17: C7-Lotabstandsmessung

Strecke  $l$  liegt senkrecht zum Lot  $h$ , Strecke  $m$  liegt parallel zu  $l$  und schneidet die S1-Deckplattenhinterkante in  $S_d$  sowie das Lot  $h$  in Punkt  $H$ . Die Strecke  $H-S_d$  gibt den Abstand vom C7-Lot an, hier  $3,8 \text{ mm} \sim 0,4 \text{ cm}$ .

### 3.4.8. L1-S1-Lotwinkel

Zur Bestimmung des L1-S1-Lotwinkels wird der L1-Deckplattenmittelpunkt, sowie der S1-Deckplattenmittelpunkt benötigt. Die S1-Hinterkante wurde gerade für den C7PL mit dem Punkt Sd definiert. Auf die gleiche Weise wird nun die ventrale Begrenzung bemessen: mit dem Cobb-Winkel-Werkzeug wird ein Schenkel  $e$  tangential an K1 und K2 angelegt. Der zweite Schenkel  $i$  liegt senkrecht zu  $e$  von ventral tangential an K1 an und bildet als Schnittpunkt mit  $e$  den Punkt Sv. Mit dem Lineal-Werkzeug wird anschließend die Strecke Sv-Sd gemessen und der Mittelpunkt dieser Strecke als Punkt SM1 markiert (Abb. 16).

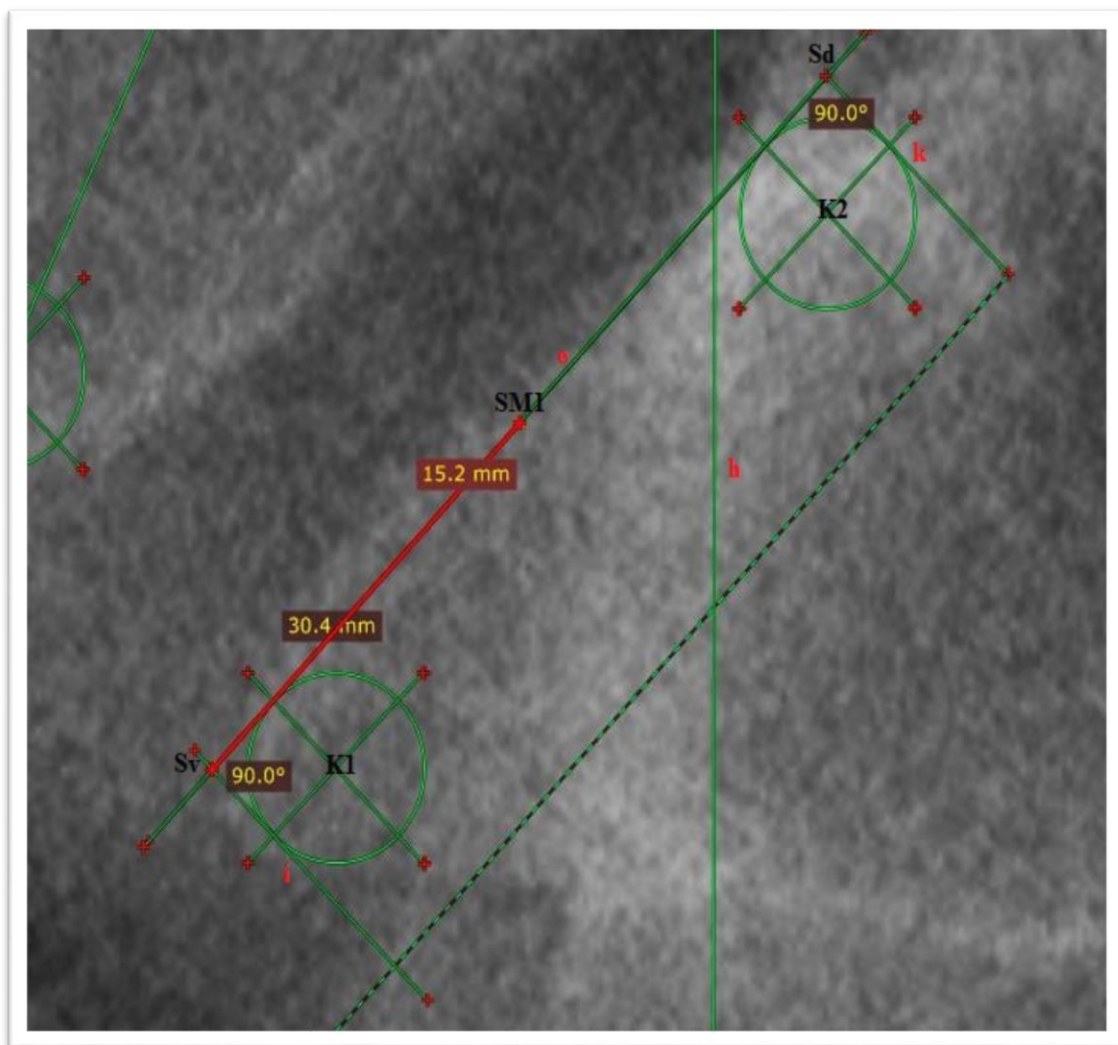


Abbildung 18: S1-Deckplattenmittelpunkt

Die Schenkel  $e$  und  $i$  stehen im  $90^\circ$  Winkel zueinander und bilden mit dem Schnittpunkt Sv die ventrale Begrenzung der S1-Deckplatte. Die Schenkel  $e$  und  $k$  stehen ebenfalls senkrecht zueinander und bilden mit dem Schnittpunkt Sd die dorsale Begrenzung der S1-Deckplatte. Der Mittelpunkt SM1 der Strecke Sv-Sd liegt hier bei 15,2 mm.



Der L1-Deckplattenmittelpunkt LM1 wird durch die halbe Strecke S1-S2 bestimmt und markiert (Abb. 17).

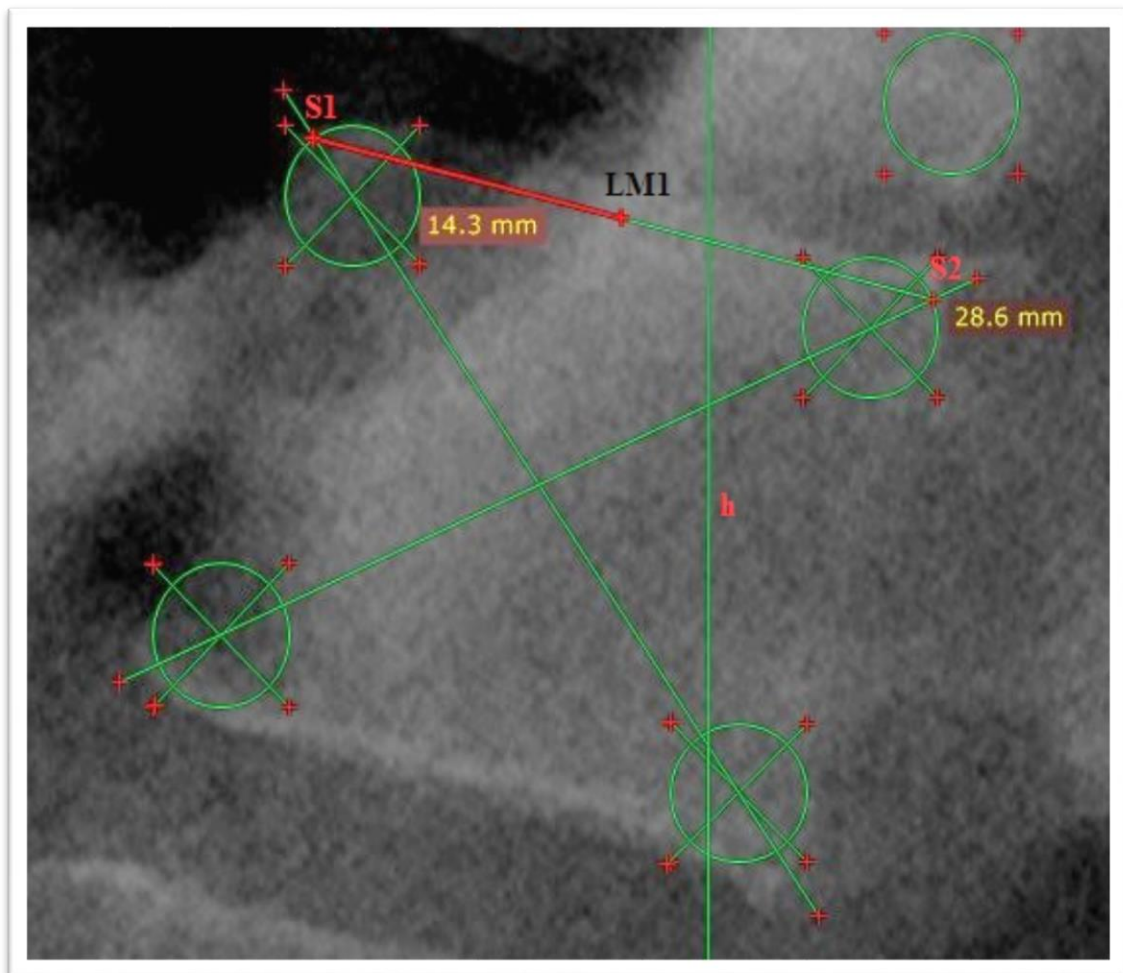


Abbildung 19: L1-Deckplattenmittelpunkt

Die Strecke zwischen S1 und S2 beträgt in diesem Fall 28,6 mm, daher wird der L1-Deckplattenmittelpunkt LM1 bei 14,3 mm markiert

Nun wird mit dem Cobb-Winkel-Werkzeug ein Schenkel n durch den L1-Deckplattenmittelpunkt LM1 und den S1-Deckplattenmittelpunkt SM1 gelegt. Als Lot hierzu wird der zweite Schenkel o deckungsgleich auf den vertikalen Hilfsrahmen gelegt. Der nun entstandene Winkel ist der L1-S1-Lotwinkel  $\varepsilon$ . Liegt das Lot hinter LM1-SM1 wird dies als negativer Wert vermerkt (Abb. 18).

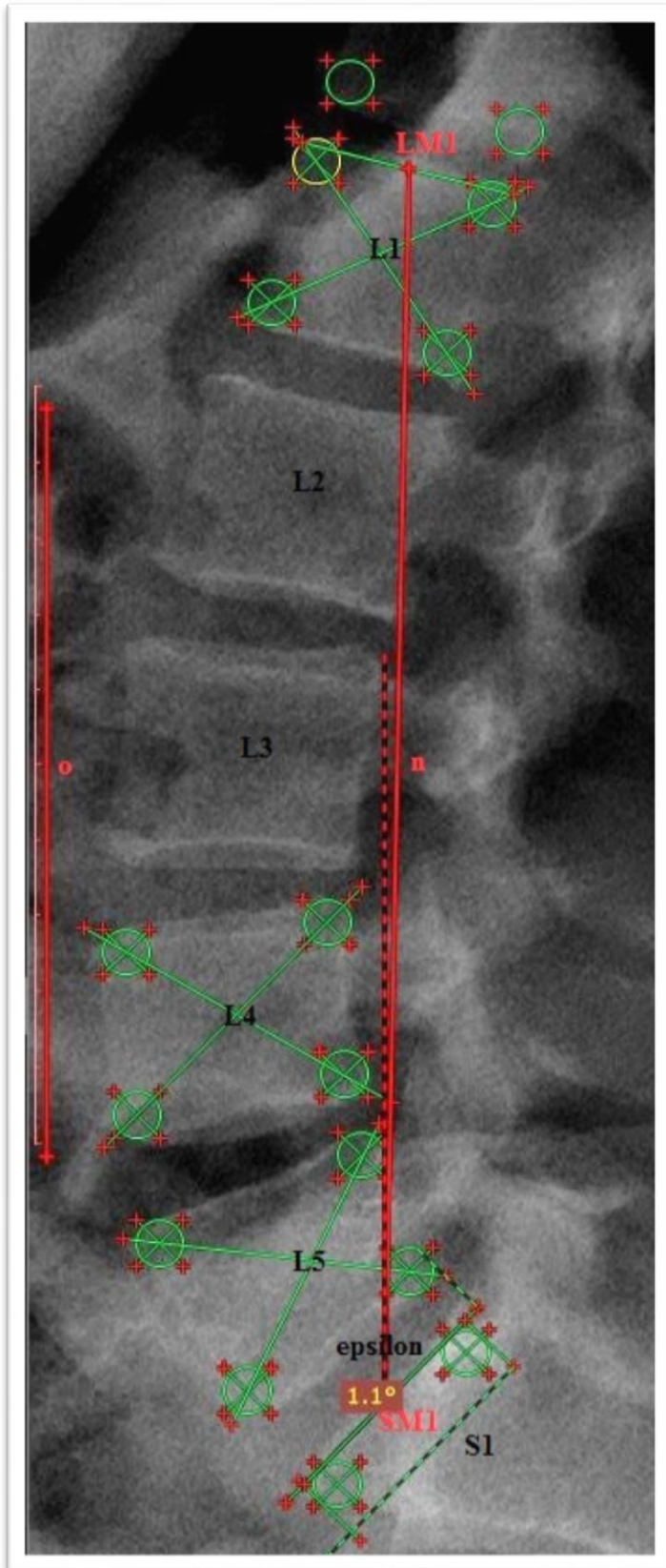


Abbildung 20: L1-S1-Lotwinkel

Der Schenkel o liegt hier zur besseren Ansicht parallel zum vertikalen Hilfsrahmen und bildet mit n den L1-S1-Lotwinkel  $\varepsilon$ , hier  $1,1^\circ$ .

### 3.4.9. Spinal Tilt

Für den Spinal Tilt wird mit dem Cobb-Winkel-Werkzeug ein Schenkel  $p$  durch den C7-Mittelpunkt  $M1$  und den S1-Deckplattenmittelpunkt  $SM1$  gelegt. Der zweite Schenkel  $q$  liegt deckungsgleich auf dem horizontalen Hilfsrahmen;  $p$  und  $q$  bilden den Spinal Tilt Winkel  $\mu$  (Abb. 19).

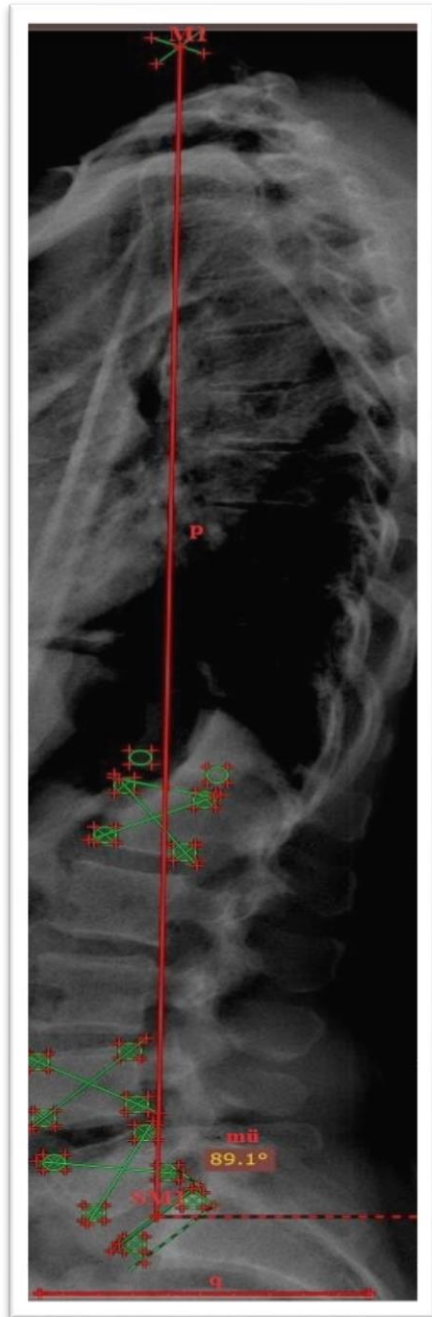


Abbildung 21: Spinal Tilt

Winkel  $\mu$  wird gebildet durch  $p$  (durch  $M1$  und  $SM1$ ) und  $q$  (hier parallel zum horizontalen Hilfsrahmen).

### **3.5. Messung mit Vertaplan® - Wirbelsäulenganzaufnahmen**

Nach dem Starten der Software werden die bereits anonymisierten Daten des Patienten von einem entsprechenden Datenträger (CD-R oder USB) geladen und geöffnet. Danach stehen zwei Operationsbereiche zur Auswahl: HWS und LWS. Hier wird der LWS-Bereich ausgewählt. Anschließend muss die Aufnahme in den dafür vorgesehenen Platz für die „Neutralaufnahme“ gezogen und ausgerichtet werden (*Abb. 20*). Im Anschluss werden Markierungen auf die einzelnen Wirbelmittelpunkt von S1 bis Th12 sowie C7 gezogen (*Abb. 21*). Die Software erkennt nun automatisch die Konturen der einzelnen Wirbelkörper. Jetzt muss jeder Eckpunkt jeden Wirbelkörpers korrigiert bzw. bei, durch die Software, bereits korrekt platzierter Stelle bestätigt werden. Durch jeweils einen Punkt werden die dorsalen und ventralen Begrenzungen der S1-Deckplatte sowie der Th12 Grundplatte markiert (*Abb. 22*). Nach Bestimmung des zu operierenden Segmentes, hier L4/L5, berechnet die Software die gewünschten Winkel und Strecken (*Abb. 23*).

Die Daten werden anschließend in eine Excel-Tabelle eingetragen.

### 3.5.1. Ausrichtung der Wirbelsäulenganzaufnahme

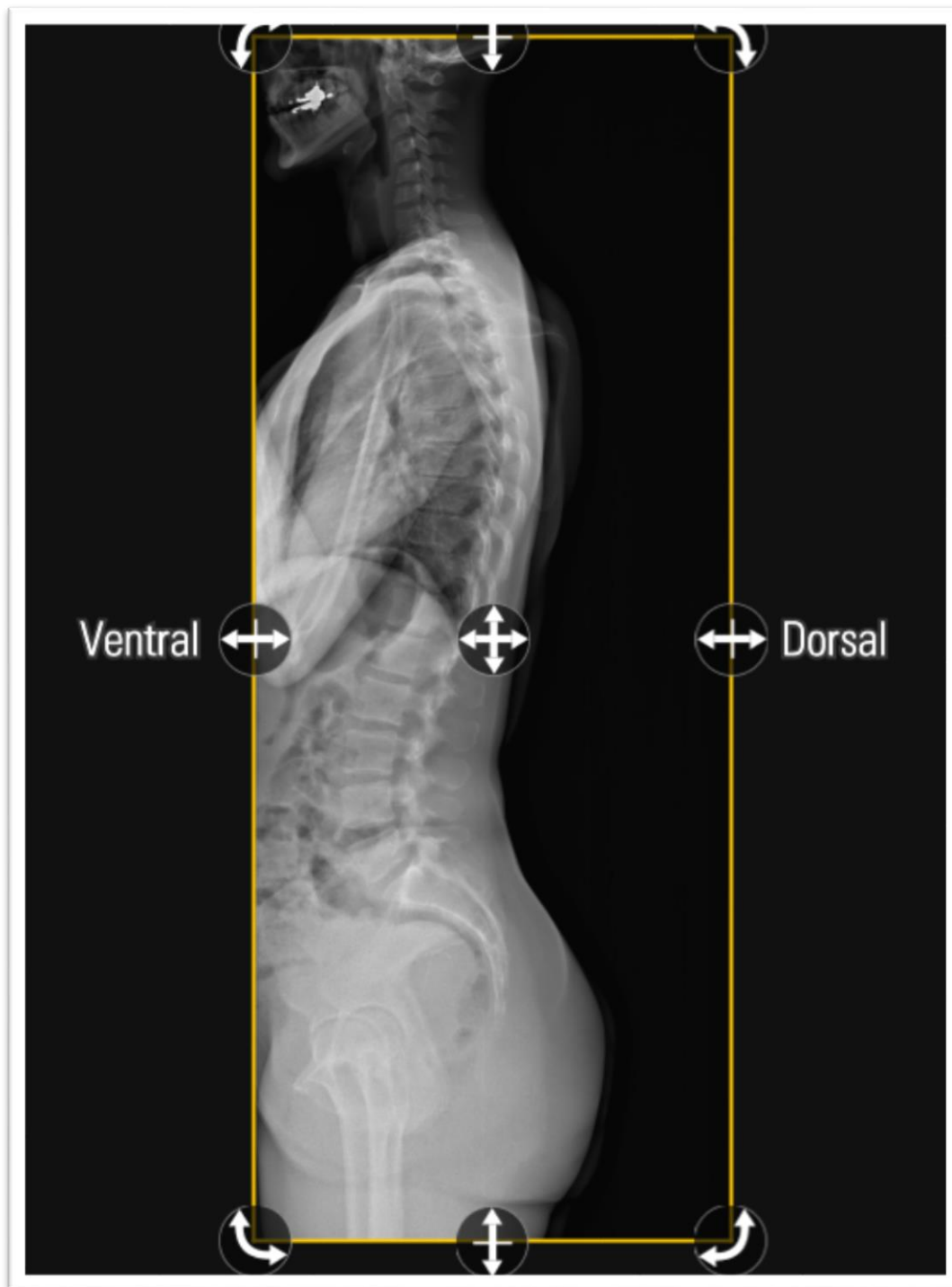


Abbildung 22: Ausrichtung der Wirbelsäulenganzaufnahme

Ansicht von links mit Ausrichtung der ventralen Seite der Wirbelsäulenganzaufnahme nach links im Bildschirm und der dorsalen Seite nach rechts

### 3.5.2. Wirbelkörpermarkierung

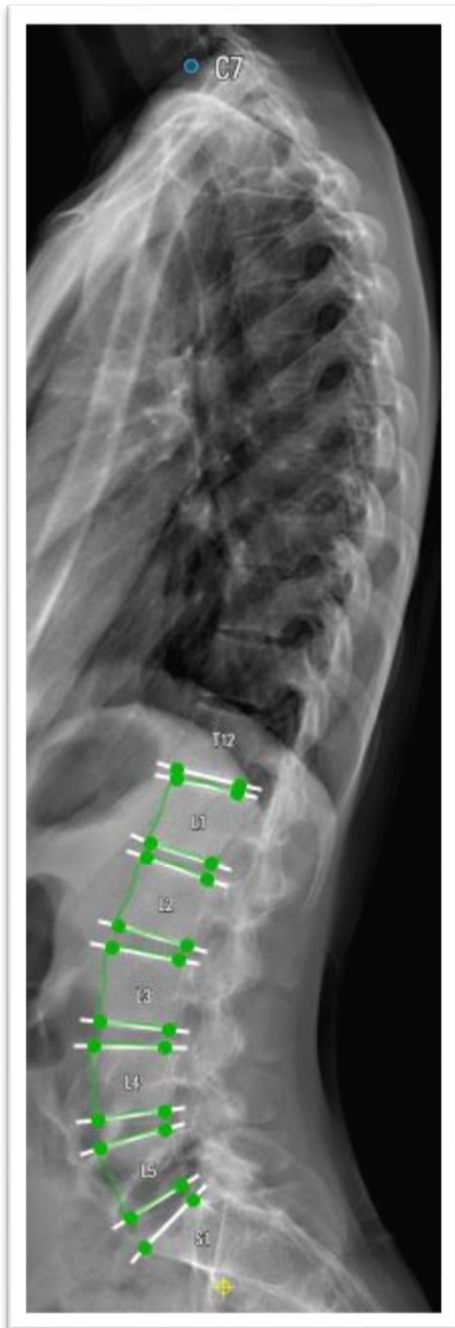


Abbildung 23: Wirbelkörpermarkierung

Markierung der Wirbelkörpermittelpunkte von C7, Th12, L1, L2, L3, L4, L5 sowie S1

### 3.5.3. Wirbelkörperbegrenzungen

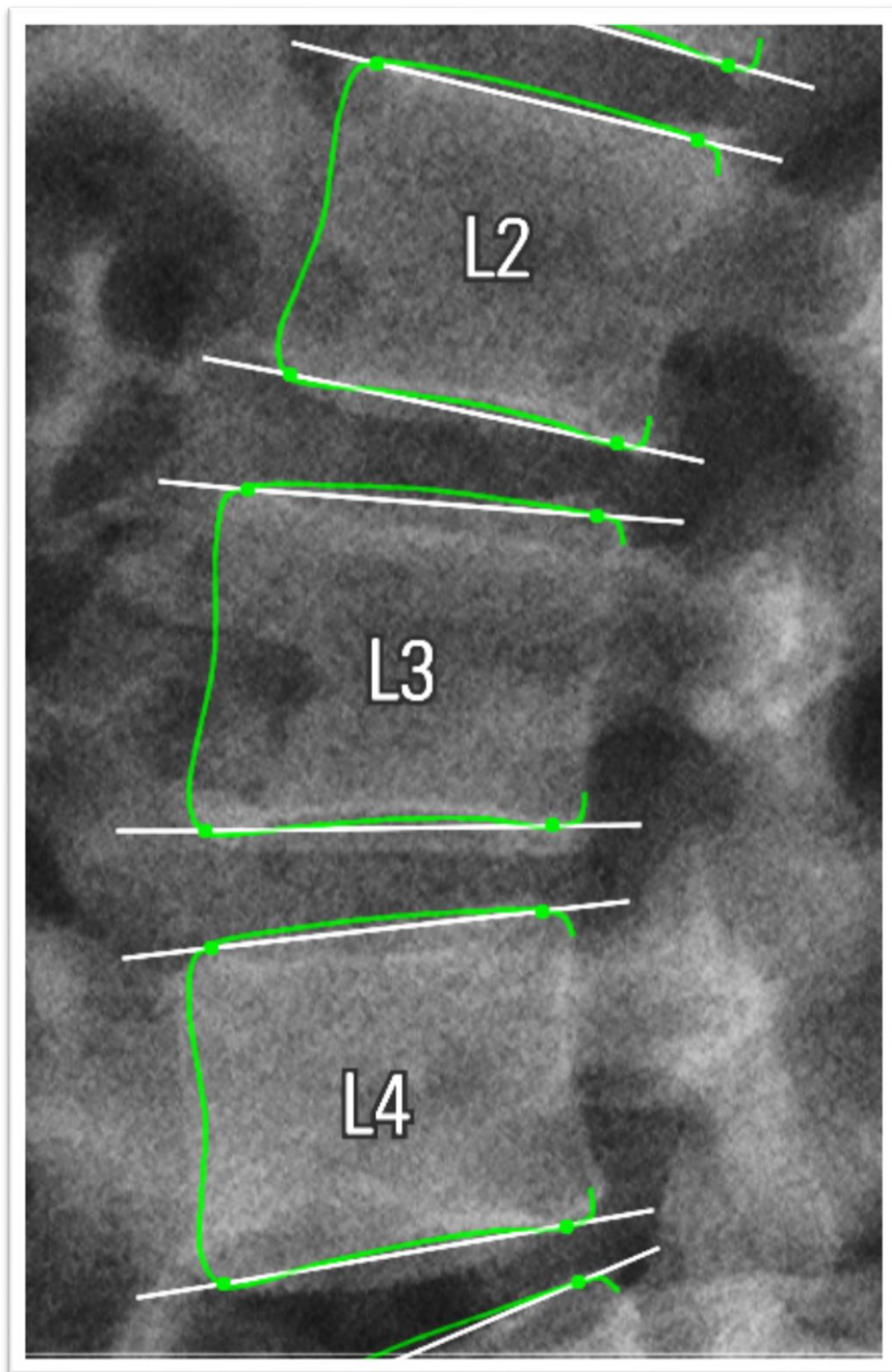


Abbildung 24: Wirbelkörperbegrenzungen

*Korrektur bzw. Bestätigung der Wirbelkörperbegrenzungen. Die dorsale und ventrale Begrenzung der S1-Deckplatte erfolgt mittels zweier Punkte, welche automatisch miteinander verbunden werden.*

### 3.5.4. Auswertung

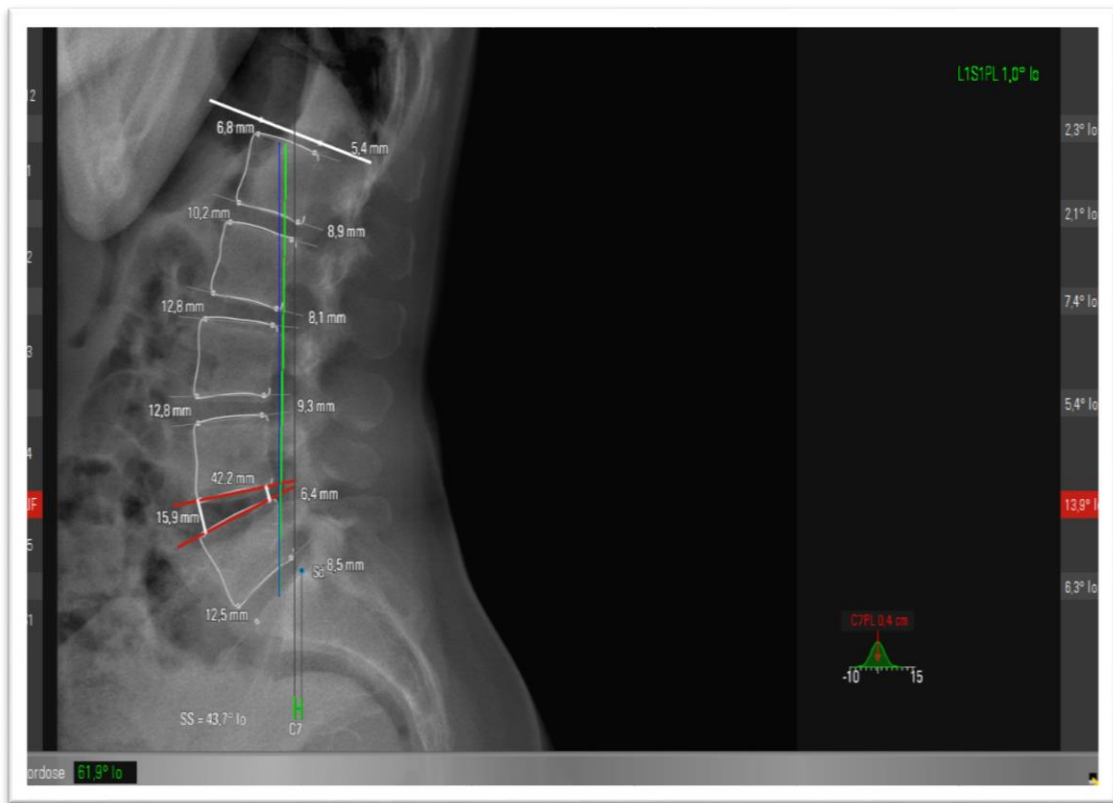


Abbildung 25: Auswertung

Ausgewertetes Bild mit Angaben der einzelnen Fachwinkel, SS, L1S1PL, C7PL sowie der Lordose

### 3.6. Planung mit Vertaplan®

Mittels der Software kann nach Vermessung der Wirbelkörper und Winkelberechnung eine OP-Planung erstellt werden. Durch Einsetzen verschiedener Cages kann direkt die Änderung von Lordose und L1-S1-Lotwinkel simuliert werden. Dies wird bei allen ausgewerteten Wirbelsäulenganzaufnahmen gemacht. Hierzu wird jeweils ein Cage simuliert, welcher den zu operierenden Fachwinkel, in diesem Fall L4/L5, auf 15° aufspreizt. Folgende Werte werden dokumentiert (Abb. 24):

*Winkelkorrektur:*

Gemessen Winkeländerung vom L4/L5-Fachwinkel (nativ) zur Simulation mit L4/L5-Fachwinkel von 15°, d.h.: Winkeländerung = 15° - L4/L5-Fachwinkel.



*L1-S1-Lotwinkel und L1-S1-Lotwinkeldifferenz:*

Nach simuliertem Aufspreizen des L4/L5-Fachwinkels auf  $15^\circ$  wird der L1-S1-Lotwinkel und die Differenz zum Ausgangswert bestimmt.

*Unkompensierte Lordose:*

Gemessen wird die Lordose welche entsteht, nachdem ein auf  $15^\circ$  aufgespreizter Cage simuliert wurde, d.h.: unkompenzierte Lordose = Lordose + Winkelkorrektur



Abbildung 26: Simulation mit  $15^\circ$  L4/L5-Fachwinkel

Bei Aufspreizen auf  $15^\circ$  resultiert eine Winkelkorrektur von  $1,1^\circ$ , die ursprüngliche Lordose von  $61,9^\circ$  liegt jetzt simuliert als unkompenzierte Lordose bei  $63^\circ$ .

### 3.7. Messung mit Radiant® - LWS-Zielaufnahmen

Genau wie bei der Vermessung der Wirbelsäulenganzaufnahmen wird auch bei der Messung der LWS-Zielaufnahmen vorgegangen. Gemessene Winkel sind:

*L4/L5-Fachwinkel, L5/S1-Fachwinkel, Sacral-Slope, Lordose, L1-S1-Lotwinkel*

Es werden prä- und postoperativ erstellte Röntgenbilder gemessen

### 3.8. Messung mit Vertaplan® – LWS-Zielaufnahmen

Wie unter Punkt 2.4. Messung mit Vertaplan® - Wirbelsäulenganzaufnahmen, wird auch bei den LWS-Zielaufnahmen vorgegangen. Dabei werden prä- und postoperativ erstellte Röntgenbilder vermessen und die Werte in eine entsprechende Tabelle eingetragen (Abb. 25 und Abb. 26). Das zu operierende Bandscheibenfach wurde bereits markiert.

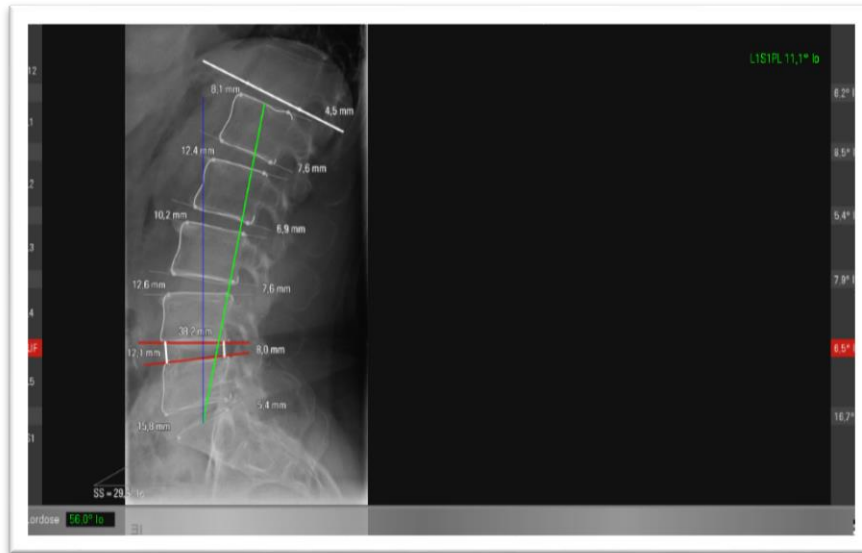


Abbildung 27: LWS-Zielaufnahme präoperativ

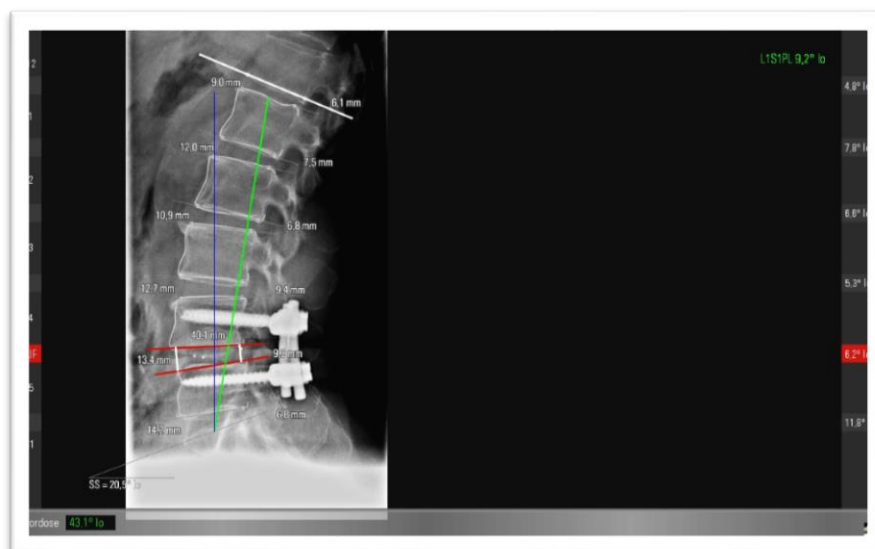


Abbildung 28: LWS-Zielaufnahme postoperativ

Cage einliegend im 4/5-Zwischenwirbelraum, dorsale Stabilisierung mit Pedikelschrauben und Stab

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Statistische Methoden

Bei den prä- und postoperativen Messungen, sowie bei den Messungen der Wirbelsäulenganzaufnahmen von Lordose, Sacral Slope, L4/L5-Fachwinkel, Sagittal-Vertikaler Achse sowie L1/S1-Lotwinkel handelt es sich um Längen- bzw. Winkelmaße (in cm oder Grad), denen ein metrisches Skalenniveau zu Grunde gelegt werden kann. Für die Auswertung können grundsätzlich parametrische Verfahren eingesetzt werden.

Für Messwiederholungen in einer Variablen mit zwei Messzeitpunkten ist neben der einfaktoriellen Varianzanalyse im Messwiederholungsdesign der t-Tests für abhängige Stichproben das Verfahren der Wahl.

In den nachfolgenden Auswertungen werden t-Tests zur Quantifizierung der Veränderungsmessungen herangezogen. (Harms 1998)

### 4.2. Alters- und Geschlechtsverteilung

*Tabelle 3: Alters- und Geschlechtsverteilung der Wirbelsäulenganzaufnahmen*

		<b>Alter (in Jahren)</b>			
	<b>n</b>	<b>20-39</b>	<b>40-59</b>	<b>60-79</b>	<b>&gt;79</b>
<b>Gesamt</b>	25 (100%)	1 (4%)	6 (24%)	16 (64%)	2 (8%)
<b>weiblich</b>	13 (52%)	1 (4%)	2 (8%)	9 (36%)	1 (4%)
<b>männlich</b>	12 (48%)		4 (16%)	7 (28%)	1 (4%)

*Es wurden 25 Aufnahmen in die Auswertung eingeschlossen. Dabei wurden Röntgenbilder von 13 weiblichen sowie 12 männlichen Patienten ausgewertet. Der jüngste Patient war 18 Jahre, der älteste 83 Jahre. Der Median betrug 71 Jahre +/- 15,3.*

*Tabelle 4: Alters – und Geschlechtsverteilung der LWS-Zielaufnahmen*

		<b>Alter (in Jahren)</b>			
	<b>n</b>	<b>20-39</b>	<b>40-59</b>	<b>60-79</b>	<b>&gt;79</b>
<b>Gesamt</b>	40 (100%)	2 (5,0%)	17 (42,5%)	21(52,5%)	0 (0%)
<b>weiblich</b>	23 (57,5%)	2 (8,7%)	8 (34,8%)	13 (56,5%)	
<b>männlich</b>	17 (42,5%)		9 (52,9%)	8 (47,1%)	

*Die gesamte Untersuchungsgruppe bestand aus 40 Personen, 23 weiblichen sowie 17 männlichen Patienten. Der jüngste war 23 Jahre, der älteste 77 Jahre alt. Der Median betrug 60,5 Jahre +/- 11,5.*

### 4.3. Korrelation Vertaplan® mit RadiAnt®

Es zeigt sich, dass die Messergebnisse beider Programme bei allen gemessenen Parametern mit  $p > 0,001$  hochsignifikant miteinander korreliert sind.

Tabelle 5: Vergleich der Wirbelsäulenganzaufnahmen ( $n=40$ ) mit Vertaplan® und Radiant®

Merkm al	Software	Min	Max	Media n	SD	r	p
<b>Alter</b>		18,0	83,0	71,0	15,3	1,00	<0,001
<b>L4/L5- FW</b>	Vertaplan®	-3,0	13,8	6,1	4,5	0,95	<0,001
	Radiant®	-1,7	15,1	6,7	4,5		
<b>Sacral Slope</b>	Vertaplan®	19,9	52,8	36,6	11	0,99	<0,001
	Radiant®	18,5	52,9	36,6	11,2		
<b>Lordose</b>	Vertaplan®	26,3	74,1	51,0	15,3	0,97	<0,001
	Radiant®	26,8	74,2	50,1	15,2		
<b>SVA</b>	Vertaplan®	0,0	13,8	4,3	3,6	0,99	<0,001
	Radiant®	0,2	14,2	4,8	3,6		
<b>L1/S1- LW</b>	Vertaplan®	-11,0	13,8	1,4	7,6	0,99	<0,001
	Radiant®	-12,2	14,4	1,6	7,7		

### 4.4. Test-Retest-Reliabilität

Wiederholte Messungen bringen bei beiden Programmen sicher reproduzierbare Ergebnisse.

Tabelle 6: Test-Retest-Reliabilität Vertaplan® und RadiAnt®

Programm	L4/L5- FW	Sacral Slope	Lordose	SVA	L1/S1- LW
<b>r Vertaplan®</b>	0,97	0,99	0,98	0,99	0,99
<b>p</b>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<b>r Radiant®</b>	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99
<b>p</b>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

#### 4.5. Intertester-Reliabilität

Nach Einarbeitung in beide Programme konnten auch von einer studienfremden Person hochsignifikant korrelierte Ergebnisse erbracht werden.

Tabelle 7: Intertester-Reliabilität Vertaplan® und Radiant®

	<b>Programm</b>	<b>L4/L5- FW</b>	<b>Sacral Slope</b>	<b>Lordose</b>	<b>SVA</b>	<b>L1/S1- LW</b>
<b>r</b>	<b>Vertaplan®</b>	0,97	0,96	0,98	0,95	0,99
<b>p</b>		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<b>r</b>	<b>Radiant®</b>	0,92	0,98	0,98	0,98	0,99
<b>p</b>		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

#### 4.6. Vergleich der Wirbelsäulenganzaufnahmen mit den präoperativen WS-Aufnahmen

Es zeigt sich, dass die Wirbelsäulenganzaufnahmen mit den präoperativen Aufnahmen aus der Untersuchungsgruppe vergleichbar sind.

Die Werte für die Lordose liegen im Median zwischen 50,1° und 55,5°. Die in der Literatur publizierten Medianwerte haben eine Breite von 22,5 ± 9,9° bis 61,4° ± 9,7°. SS hat als Median 36,6° - 37,4° und liegt damit leicht unter den Referenzwerten, die sich bei 39-41° befinden.

Tabelle 8: Vergleich der Wirbelsäulenganzaufnahmen (Ges.) mit den präoperativen Aufnahmen der beiden Gruppen Böhm (B) und Pfeiffer (P)

	L4/5- Fach winkel			Lor- dose			Sacral Slope			L1- S1- LW		
	Ges.	B	P	Ges.	B	P	Ges.	B	P	Ges.	B	P
<b>Std. abw.</b>	4,2	4,1	4,5	15,0	12,1	13,2	10,8	10,1	9,1	7,4	5,5	6,5
<b>MW</b>	6,8	9,4	7,4	48,3	52,8	54,6	35,1	37,4	37,3	1,7	3,1	3,9
<b>SE</b>	4,3	4,1	4,6	15,3	12,3	13,7	11,0	10,3	9,4	7,5	5,6	6,8
<b>Min</b>	-1,7	1,9	-0,4	21,1	27,2	35	17,9	21,4	23,3	-13,0	-10,3	- 13,0
<b>Max</b>	15,1	18,5	15,3	74,2	79,5	78,6	52,9	62,7	52,2	14,4	11	14,4
<b>Med</b>	6,7	8,7	8,1	50,1	54,9	55,5	36,6	37	37,4	1,6	3,7	3,0

#### 4.7. Änderungen der Lordose nach Cage-Implantation auf Höhe L4/L5

##### *Auswertung Untergruppe „Böhm“:*

Bei 7 von 26 Patienten (26,9%) verringerte sich der L4/L5-Fachwinkel. Alle Patienten dieser Gruppe zeigten postoperativ einen kleineren Lordosewinkel.

Eine postoperative Vergrößerung des L4/L5-Fachwinkels war bei 19 Patienten zu messen (73,1%). Hiervon wiesen 8 (42,1%) eine kleinere Lordose auf, während bei 11 (57,9%) der Lordosewinkel größer wurde.

Im Gesamten verkleinerte sich die Lordose bei 15 von 26 (57,7%), bei 11 (42,3%) wurde der Lordosewinkel nach Einbringen eines Cages auf Höhe L4/L5 größer.

##### *Auswertung Untergruppe „Pfeiffer“:*

Nach Einbringen eines Cages verkleinerte sich der L4/L5-Fachwinkel bei 8 von 14 Patienten (57,1%). Bei 7 von 8 (87,5%) dieser Gruppe verringerte sich dadurch der Lordosewinkel, bei 1 Patient wurde die Lordose dadurch vergrößert.

Bei 6 Patienten (42,8%) war der L4/L5-Fachwinkel postoperativ vergrößert. Eine gleichsinnige Zunahme der Lordose trat nur bei 1 Patient auf. Bei 5 von 6 Patienten (83%) war der Lordosewinkel kleiner geworden.

Im Gesamten verringerte sich der Lordosewinkel bei 12 von 14 Patienten (85,7%), nur bei 2 wurde er größer.

Beide Kollektive zusammen zeigen einen verringerten L4/L5-Fachwinkel bei 15 der 40 Patienten (37,5%). Hierbei sind die postoperativen Lordosewinkel bei 14 Patienten (93,3%) kleiner geworden. 25 Patienten (62,5%) hatten postoperativ vergrößerte L4/L5-Fachwinkel. Bei 13 (52%) war die Lordose verkleinert, bei 12 (48%) war dieser Winkel vergrößert.

#### **4.8. Zwei-Stichproben t-Test bei abhängigen Variablen (Paarvergleichstest)**

Die Auswertung des Paarvergleichstests zeigt die Veränderung der korrespondierenden prä- und postoperativ gemessenen Winkel. Dabei werden die zwei Kohorten getrennt betrachtet.

Die Werte für das operierte L4/L5-Segment zeigen bei Böhm eine starke positive Korrelation von  $r = 0,80$ . Der Mittelwert des L4/L5-Fachwinkels steigt von  $8,99^\circ$  auf  $10,79^\circ$  mit  $p=0,001$ . Der Mittelwert der Lordose vergrößert sich von  $52,85^\circ$  auf  $53,23^\circ$ . Dies ist mit  $p=0,83$  und  $r=0,71$  aber keine signifikante Änderung.

Sacral Slope und der L1/S1-Lotwinkel zeigen sich, wie aus der Tabelle hervorgeht, als sehr robust gegenüber Veränderungen.



Tabelle 9: Paarvergleichstest Böhm

	L4/5		SS		L1/S1		Lordose	
	prä- OP	post- OP	prä- OP	post- OP	prä- OP	post- OP	prä- OP	post- OP
<b>Mittelwert</b>	9,0	10,8	37,5	37,9	3,0	3,1	52,9	53,2
<b>Varianz</b>	16,4	20,8	109,8	102,4	31,2	17,7	152,6	162,8
<b>Beobachtungen</b>	26	26	26	26	26	26	26	26
<b>r</b>	0,801		0,675		0,710		0,711	
<b>Hypothetische Differenz Mittelwerte</b>	0		0		0		0	
<b>Freiheitsgrade (df)</b>	25		25		25		25	
<b>t-Statistik</b>	-		-0,257		-		-	
	3,328				0,015		0,207	
<b>p(T&lt;=t) einseitig</b>	0,001		0,399		0,494		0,419	
<b>Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test</b>	1,708		1,708		1,708		1,708	
<b>p(T&lt;=t) zweiseitig</b>	0,003		0,799		0,988		0,837	
<b>Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test</b>	2,060		2,060		2,060		2,060	

In der Kohorte Pfeiffer weisen die Patienten im L4/L5-Segment postoperativ eher kleinere Werte auf. Dabei sinken die Winkel im Mittel von 7,18° auf 6,46°. Mit  $r=0,24$  und  $p=0,64$  sind dies ebenfalls jedoch keine signifikanten Änderungen. Die Lordose vermindert sich von 54,83° auf 48,63°. Mit  $p=0,019$  und  $r=0,79$  stellt nur dies eine signifikante Änderung dar.

Tabelle 10: Paarvergleichstest Pfeiffer

	<b>L4/L5</b>		<b>SS</b>		<b>L1/S1</b>		<b>Lordose</b>	
	<i>prä- OP</i>	<i>post- OP</i>	<i>prä- OP</i>	<i>post- OP</i>	<i>prä- OP</i>	<i>post- OP</i>	<i>prä- OP</i>	<i>post- OP</i>
<b>Mittelwert</b>	7,2	6,5	37,1	34,1	4,0	1,4	54,8	48,6
<b>Varianz</b>	25,1	16,5	97,2	105,5	46,4	57,8	197,9	144,4
<b>Beobachtungen</b>	14	14	14	14	14	14	14	14
<b>r</b>	0,243		0,835		0,76		0,790	
<b>Hypothetische Differenz Mittelwerte</b>	0		0		0		0	
<b>Freiheitsgrade (df)</b>	13		13		13		13	
<b>t-Statistik</b>	0,475		1,939		1,886		2,674	
<b>p(T&lt;=t) einseitig</b>	0,321		0,037		0,041		0,010	
<b>Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test</b>	1,771		1,771		1,771		1,771	
<b>p(T&lt;=t) zweiseitig</b>	0,643		0,075		0,082		0,019	
<b>Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test</b>	2,16		2,16		2,16		2,16	

#### 4.9. Korrelationen der Wirbelsäulenganzaufnahmen

Es zeigt sich, dass Spinal Tilt und SVA hochsignifikant miteinander korreliert sind.

Außerdem sind Spinal Tilt und SVA mit dem L4/L5 Fachwinkel mit  $p < 0,01$  korreliert. Hochsignifikant ist auch Sacral Slope mit dem L1-S1-Lotwinkel sowie mit der Lordose korreliert.

Tabelle 11: Korrelationen der Wirbelsäulenganzaufnahmen

	<b>L4/L5-FW</b>	<b>SS</b>	<b>L1-S1- LW</b>	<b>Lordose</b>	<b>SVA</b>	<b>Spinal Tilt</b>
<b>L4/L5-FW</b>		$r = 0,46$ $p = 0,02$	$r = -0,06$ $p = 0,79$	$r = 0,56$ $p = 0,004$	$r = -0,5$ $p = 0,01$	$r = 0,48$ $p = 0,015$
<b>Sacral Slope</b>			$r = -0,64$ $p < 0,001$	$r = 0,91$ $p < 0,001$	$r = -0,8$ $p = 0,72$	$r = 0,06$ $p = 0,79$
<b>L1-S1-LW</b>				$r = -0,46$ $p = 0,021$	$r = -0,35$ $p = 0,09$	$r = 0,41$ $p = 0,043$
<b>Lordose</b>					$r = -0,27$ $p = 0,2$	$r = 0,28$ $p = 0,18$
<b>SVA</b>						$r = -0,97$ $p < 0,001$

## 5. Beantwortung der Beweisfragen und Diskussion

1. Sind die Ergebnisse der Messungen des Programms Vertaplan® und die Messungen mit Radiant® signifikant korreliert und wie groß ist die Reliabilität der Methoden?

Wie aus den Messreihen hervorgeht, sind die Ergebnisse der beiden Programme Vertaplan® und RadiAnt® signifikant miteinander korreliert. Es macht also im Ergebnis keinen Unterschied, ob händisch ausgemessen wird, oder die Software den Messprozess übernimmt.

Auch die Test-Retest-Reliabilität ist hoch, ebenso die Intertester-Reliabilität. Die Messverfahren an sich können damit als stabil gewertet werden.

2. Welche Vorteile bietet die Anwendung des Programmes Vertaplan® gegenüber einer händischen Ausmessung mittels Radiant®?

Vorteilhaft beim Programm Vertaplan® ist die Zeit, die im Vergleich zur aufwändigen Konstruktion von Kreisen und Diagonalen mit RadiAnt® eingespart werden kann, was in heutiger Sicht, wo es oftmals an genau dieser mangelt, ein entscheidender Faktor sein kann. In dieser Studie wurde die Zeit nicht gemessen, es ist ein subjektives Gefühl des Autors. Für Messungen mit Vertaplan wurden ca. 5-10 Minuten benötigt, hingegen für Radiant etwa 20-30 Minuten. Nicht aufgeführt sind hier allerdings die Kosten, welche das Programm (Vertaplan®) verursacht. Ob sich dies durch die entsprechende Zeitersparnis rechnet, sei dahingestellt.

Es zeigt sich, dass es stark davon abhängt, wo die Grenzen der Wirbelkörper zur Vermessung gesetzt werden. Minimale Abweichungen können die Ergebnisse ändern. Hier spielt die Qualität der Röntgenaufnahmen eine große Rolle, ebenso die Beschaffenheit der knöchernen Strukturen. Um nicht durch „falsche“ Positionierung der Eckpunkte in den unterschiedlichen Programmen „verfälschte“ Werte zu erhalten, wurde daher jede Aufnahme in zeitlicher Nähe mit beiden Programmen ausgewertet.

3. Sind die bei in der Folge operierten Patienten präoperativ gemessenen Lordosewinkel signifikant von denen nicht operierter WS-Ganzaufnahmepatienten verschieden und liegen die Werte im Bereich der in der Literatur publizierten Werte?

Wirbelsäulenzilaufnahmen im Stehen zeigen grundsätzlich keine anderen Winkelmaße als Wirbelsäulenganzaufnahmen. Sämtliche Werte liegen im Bereich der in der einschlägigen Literatur publizierten Werte. Die Winkel für die Lordose liegen im Median zwischen  $50,1^\circ$  und  $55,5^\circ$ . Die in der Literatur publizierten Medianwerte haben eine Breite von  $22,5 \pm 9,9^\circ$  bis  $61,4 \pm 9,7^\circ$ . SS hat als Median  $36,6^\circ - 37,4^\circ$  und liegt damit leicht unter den Referenzwerten, die sich bei  $39-41^\circ$  befinden.

Dies scheint zwar auf den ersten Blick logisch, zeigt aber, dass die unterschiedliche Aufnahmetechnik (Zentralstrahl, geringere Standardisierung der Haltung in den Zielaufnahmen mangels Haltestange etc.) ohne wesentliche Folgen bleibt. Die Aufnahmen sind also methodisch durchaus vergleichbar.

4. Welche Auswirkungen auf die Lordose der LWS haben Veränderungen der Winkelstellung von L4/L5 durch Implantation von Cages bei dorsoventralen monosegmentalen PLIF und TLIF Operationen und welche Korrelation mit der Gesamtstatik der Wirbelsäule hat eine Veränderung der LWS Lordose?

Bei der Auswertung der zwei Gruppen stellt sich heraus, dass das Einbringen von PLIF-Cages (Pfeiffer) zu keiner signifikanten Winkeländerung im L4/L5-Segment führt, jedoch zu einer (schwach) signifikanten Abnahme der lumbalen Gesamtlordose.

Die von Böhm verwendeten Harms-Körbchen lordosieren im operierten Segment signifikant. Dies liegt höchstwahrscheinlich an der stark ventralen Platzierung der Cages. Eine signifikante Auswirkung auf die Gesamtlordose zeigte sich jedoch nicht. Es ist zu vermuten, dass die stärkere Lordosierung bei L4/L5 in der Folge zu einer Kompensation durch Inklinatation im Bereich von L5/S1 sowie Th12-L4 führt. Dies scheint ein bereits sehr kurzfristig nach der OP auftretender Effekt zu sein.

Wird hingegen auch nur schwach bei L4/L5 kyphosiert (Pfeiffer), kann sich die Kyphose zwischen L5/S1 sowie Th12-L4 gleichsinnig verstärken, was nicht erwünscht ist. Bei Sacral Slope und dem L1/S1-Lotwinkel ergeben sich keine signifikanten Änderungen.

5. Sind die unter 4 gemachten Prognosen konsistent mit Aussagen in der Literatur?  
Selbst lordosierende 1-Segment Fusionen im Bereich L4/L5 wirken sich relativ wenig auf die Gesamtstatik aus. Sacral Slope und L1/S1-Lotwinkel scheinen sehr robust gegen Veränderungen zu sein. Auch die Gesamtlordose ist nur gering verändert. Diese Effekte sind durchaus implantatabhängig.

Das Postulat von Vertaplan®, dass lordosierende Cages die Lordose der Gesamtwirbelsäule erhöhen, scheint aktive habituelle Mechanismen in vivo, wie zum Beispiel eine verstärkte thorakale Kyphose, Inklination im Becken sowie Beugung der Knie nicht zu berücksichtigen.

Dies wird dadurch umso wahrscheinlicher, als ein wesentliches Prognosekriterium (Spinal Tilt) mit mehreren Lordoseparametern nicht signifikant korreliert ist (vergl. Tab. 11).

Harms-Körbchen zählen bekanntermaßen zu den potentesten Lordosierern am Markt, wenn diese weit ventral impaktiert werden. Wenn nun selbst diese Cages in vivo und unter axialer Last die LWS nicht (re-)lordosieren, wie kritisch muss ein darauf basierendes Konzept der OP-Strategie (z.B. nach LeHuec et al.) erst gesehen werden?

Die Vergleiche der Wirbelsäulenganzaufnahmen untereinander zeigen, dass die Sagittal-Vertikale Achse und Spinal Tilt miteinander korreliert sind, sowie mit dem L4/L5-Fachwinkel und dem L1/S1-Lotwinkel, nicht aber mit der Lordose. Da es trotz signifikanter Lordosierung des L4/L5 Fachwinkels zu keiner signifikanten Veränderung von Lordose, Sacral Slope und dem L1/S1-Lotwinkel kam, ist anzunehmen, dass Spinal Tilt und die Sagittal-Vertikale Achse unverändert bleiben werden. Dies tatsächlich zu beweisen erfordert allerdings eine postoperative Anfertigung von Wirbelsäulenganzaufnahmen. Sollte hierfür kein EOS-Imaging-System® zur Verfügung stehen, ist eine Zustimmung durch eine Ethikkommission, bedingt durch die große Strahlenbelastung für die Patienten, unwahrscheinlich. Es kämen ca. 2,6 +/- 0,95 mSv pro Wirbelsäulenganzaufnahmen (berechnet aus den Einzelaufnahmen der HWS, BWS, LWS und Becken) hinzu. Eine CCT bringt etwa 2 mSv. (Bauer und Veit 2003). Für Deutschland wurde das Risiko einer Krebserkrankung durch Röntgenstrahlung auf 1,5% berechnet (Berrington de González und Darby 2004).

Ebenso muss auch der Nutzen präoperativer Wirbelsäulenganzaufnahmen für kurzstreckige Fusionen in Frage gestellt werden.

Die Wirbelsäule ist ein hochdynamisches System bestehend aus vielen Einzelgliedern. Für einen aufrechten Stand sind ebenfalls die Beine und das Becken von Bedeutung, wie auch durch Le Huec und andere Autoren beschrieben. Es scheint sehr theoretisch, durch Änderung an einem Glied dieser langen Kausalkette, z.B. durch Implantation eines Cages auf Höhe L4/L5, eine Auswirkung auf die Gesamtstatik zu haben. Hier müssen

Kompensationsmechanismen greifen. In dieser Arbeit, in welcher „nur“ Zielaufnahmen der Lendenwirbelsäule ausgewertet wurden, kann über entsprechende Kompensation keine Aussage getroffen werden, da hierzu sowohl der Bereich oberhalb (also mindestens die thorakalen Wirbelsäulenabschnitte) als auch das gesamte Becken inklusiver der Femurköpfe (dadurch könnte ein veränderter Pelvic Tilt eine mögliche Kompensation anzeigen) ausgewertet werden müssten. Eine über Jahre „erlernte“ individuelle Haltung wird sich durch operative Versorgung in einem Segment nicht ändern. Auch kann hier nicht aufgezeigt werden, inwiefern eine postoperativ herbeigeführte Schmerzarmut den Muskeltonus der inter- und intraspinalen Muskulatur ändert und somit zu Veränderungen der Lordose führen kann. So scheint jeder Mensch seine ganz persönliche habituelle sagittale Balance zu besitzen, die sich über die Jahre ändert und den gegebenen Bedingungen anpasst.

### **Fehlerquellen:**

Im Rahmen der Wirbelkörpervermessung muss bei beiden Systemen bestimmt werden, wo die Eckpunkte liegen. Bei schlechter Bildqualität oder osteoporotischen Knochen ist dies zum Teil schwer. Durch Arbeiten mit Hell-/Dunkel- und Kontrastverstärkung kann die Darstellung der Wirbelkörpergrenzen zwar oft verbessert werden, eine genaue Bestimmung ist jedoch nicht immer möglich. Hierbei können mehrere Grad Abweichung entstehen. Da dies nur bei wenigen Messungen der Fall ist, stört dieser Fehler bei einer großen Kohorte nicht.

Problematisch ist auch die Auswahl der Patienten. Es handelt sich um 2 verschiedene Operateure die jeweils andere Implantate einsetzen. Die Untergruppen (Böhm, Pfeiffer) müssten getrennt betrachtet werden, da das einzig vergleichbare Merkmal die operierte Höhe (also in diesem Fall L4/L5) ist. Im Gesamten ist die Zahl der gemessenen Patienten eher gering trotz z.T. signifikanter Messwerte.

Ebensowenig ist über die Patienten bekannt und deren Begleiterkrankungen (z.B. Osteoporose), die sich ggf. auf die Ergebnisse auswirken könnten.

Weiterhin muss auch die Qualität bzw. Einheitlichkeit der sowohl prä- also auch postoperativ angelegten Röntgenzielaufnahmen hinterfragt werden. Auch wenn dies in habitueller Stellung möglichst standardisiert geschehen soll, können auch hier Fehlerquellen liegen. Bekanntermaßen führen Schmerzen zu einer Schonhaltung und vice

versa eine Schmerzarmut oder neuerdings –freiheit zu einem aufrechteren Stand im Rahmen der Aufnahme.

Eine tatsächliche habituelle Stellung, wie sie auch im Alltag eingenommen wird, ist wahrscheinlich eher nicht zu erreichen.

Ebenso sind auf den Röntgenzielaufnahmen der LWS in der Regel das Becken und die Femurköpfe nicht mit abgebildet, wodurch kompensatorische Inklinaton oder Reklination nicht erfasst werden. Auch hier wären Wirbelsäulenganzaufnahmen nötig, um die Auswirkungen auf die Gesamtstatik sichtbar zu machen.

## **6. Zusammenfassung**

Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, mindestens einmal im Leben an Rückenschmerzen zu leiden und deshalb einen Arzt aufsuchen zu müssen. Ursachen sind meist degenerative Veränderungen im Bereich der Lendenwirbelsäule. Bringen konservative Maßnahmen nicht die gewünschte Besserung kommt es häufig zu Operationen.

Im Rahmen der OP werden zum Beispiel Protrusionen der Bandscheibe oder Verengungen im Spinalkanal entfernt sowie die Fusion und Stabilisierung der Wirbelkörper angestrebt. Ziel ist eine optimale Wiederherstellung möglichst physiologischer Verhältnisse. Hierbei spielt das sagittale Profil der Wirbelsäule eine wichtige Rolle. Unter besten Bedingungen liegt ein Schwerelot, vom 7. Halswirbelkörper nach kaudal fallend, im Bereich der S1-Deckplattenhinterkante. Der Schwerpunkt liegt dann zwischen den Füßen und es muss kaum Kraft aufgewandt werden, um den Körper in der aufrechten Position zu halten. Für das seitliche Wirbelsäulenprofil sind neben Thorakalkyphose und Lumballdose auch das Becken sowie Muskeln und Bänder verantwortlich.

Mit minimalinvasiven Operationstechniken (PLIF oder TLIF) können heute eine gute Fusionsrate sowie Langzeitstabilität erzielt werden. Zur Planung solcher OP's werden Zielaufnahmen der Lendenwirbelsäule im Stehen angefertigt. Intraoperativ wird versucht, nach Ausräumen des Bandscheibenfaches, mittels passender Cages oder anderer Platzhalter den Winkel des operierten Segmentes in „physiologische“ Werte zu korrigieren, dann mittels Pedikelschrauben- und Stabsystem zu stabilisieren und somit die Lordose nachhaltig zu bessern.



In der Arbeit wurden die prä- und postoperativ erstellten Zielaufnahmen der Lendenwirbelsäule von 40 Patienten (26 von Prof. Böhm und 14 von Prof. Pfeiffer) mit zwei unterschiedlichen Systemen ausgewertet, die Winkel vermessen und die Programme untereinander verglichen.

Außerdem wurden 25 bereits bestehende Gesamtaufnahmen der Wirbelsäule vermessen mit dem Ziel, korrelierende Winkel oder Maße zu finden, welche sich auf reine LWS-Zielaufnahmen übertragen lassen.

Im Vergleich der zwei Programme zur Auswertung (Vertaplan® und RadiAnt®) zeigte sich eine signifikante Korrelation in der Inter- / Intra- sowie Test-Retest-Reliabilität. Die Möglichkeit von Vertaplan®, die Auswirkung von unterschiedlichen Cages auf die Gesamtstatik der Wirbelsäule zu simulieren, kann hier allerdings nicht verifiziert werden.

Es zeigte sich zudem, dass selbst lordosierende 1-Segmentfusionen relativ wenig Auswirkung auf die Gesamtstatik haben, wobei dies durchaus implantatabhängig ist. Selbst die verwendeten Harms-Titankörbchen, welche weit ventral impaktiert normalerweise zu den potenten Lordosierern zählen, können keine signifikante Änderung der lumbalen Lordose und des sagittalen Gesamtprofils erzielen. Die eingebrachten PEEK Cages führten trotz leicht lordotischem Design sogar eher zu einer Abnahme der Lordose. Ob dies an einem tatsächlich verkleinerten Fachwinkel durch den Cage liegt oder aber an einer Impression des Cages in Grund- und Deckplatte der benachbarten Wirbelkörper durch die axiale Last kann hier nicht geklärt werden.

Einen gemeinsamen Winkel aus Wirbelsäulenganz- und Wirbelsäulenteilaufnahmen der LWS zu finden, war methodisch nicht möglich. Hierzu wären sowohl prä- als auch postoperativ angefertigte Ganz- und Teilaufnahmen der Patienten nötig, was sich ethisch aufgrund der unnötig hohen Strahlenbelastung nicht vertreten lässt.

Es stellt sich die Frage, inwieweit 1-Segmentfusionen überhaupt zu einer planbaren Änderung der Lordose und der Gesamtstatik führen können, da die Wirbelsäule ein hochdynamisches aus vielen Einzelgliedern bestehendes System ist, in welchem Muskeln und Bänder eine große Rolle spielen und somit ein über Jahre „erlerntes“ individuelles sagittales Profil bilden.

Der Einsatz von teurer Planungssoftware sowie entsprechender winkeladjustierbarer Cages sollte daher kritisch hinterfragt werden.

## Summary

The probability of suffering from low back pain and having to seek for diagnosis and treatment at least once in a lifetime is high. The causes thereof are mostly degenerative alterations of the lumbar spine. If conservative treatments are not successful, surgery is commonly considered a therapeutic option.

Lumbar surgical procedures include the removal of disc protrusions or stenosis of the spinal canal as well as stabilization and fusion of vertebrae. Their goal is the restoration of physiological function. In order to achieve this, considering the sagittal profile of the spine is important. Physiologically, a perpendicular line in cervical vertebral body C7 reaches the back rim of the S1 upper plate. This leads to gravity centering between the feet and enables to keep the body upright easily. The lateral profile of the spine is maintained by the thoracic kyphosis and lumbar lordosis as well as the pelvis with its muscles and ligaments.

Using minimal invasive procedures such as PLIF and TLIF, good fusion rates and long-term stability are achievable. For planning of the procedure usually a radiograph of the lumbar spine is performed while standing upright. Intraoperatively, the intervertebral disc space will be cleared, a cage will be introduced to correct the angles of the segment back to physiological levels and fixed thereafter using pedicle screws and a rod system.

This thesis comprehensively and meticulously analyses the pre- and postoperatively performed x-ray images of the lumbar spine of 40 patients, using two different systems. This includes measuring several relevant angles and comparison of two measuring technologies. Additionally, 25 preexisting x-ray images of whole spines were analyzed with the aim of finding correlating parameters which can be reproduced by solely looking at the lumbar spine.

Comparing the analysis systems Vertaplan® und RadiAnt®, a significant correlation in inter-, intra- and test – retest reliability can be shown.

Vertaplan® offers the possibility of simulating the impact of different cages on the spinal static, verifying this impact was not conducted in this study.

Analysis shows, however, that even lordosing one segment during instrumented fusion has only little effect on the sagittal profile of the spine as a whole, with minor differences depending on the choice of the implant.

Harms cages, when implanted on the far anterior side of the motion segment which have a supposedly strong lordosing effect do not show significant changes in lordosis and whole profile of the spine.

Unilateral “oblique” PLIF cages even lead to a slight decrease in lordosis. Potential reasons for this could be an actual decrease of the angle or the impression of the cage into the top and bottom plate of neighboring vertebral bodies.

On the basis of the data presented it seems questionable how extensively a predictable and relevant change of lumbar lordosis and sagittal profile of the entire spine can be achieved by performing a single segment fusion. This might be due to segment dynamics under load and interplay of multiple links, muscles and ligaments which have formed an individual sagittal profile over the course of a patients live.

This leads also to the conclusion that the usage of extensive planning software and linked angle adjustable cages should be critically scrutinized.

## 7. Literaturverzeichnis

1. Abbas, J.; Hamoud, K.; May, H.; Hay, O.; Medlej, B.; Masharawi, Y. et al. (2010): Degenerative lumbar spinal stenosis and lumbar spine configuration. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 19 (11), S. 1865–1873. DOI: 10.1007/s00586-010-1516-5.
  2. Ammendolia, C.; Stuber, K. J.; Rok, E.; Rampersaud, R.; Kennedy, C. A.; Pennick, V. et al. (2013): Nonoperative treatment for lumbar spinal stenosis with neurogenic claudication. In: *The Cochrane database of systematic reviews* 8, S. CD010712. DOI: 10.1002/14651858.CD010712.
  3. Amundsen, T.; Weber, H.; Lilleås, F.; Nordal, H. J.; Abdelnoor, M.; Magnaes, B. (1995): Lumbar spinal stenosis. Clinical and radiologic features. In: *Spine* 20 (10), S. 1178–1186.
- Anatomie des Menschen. Lehrbuch u. Atlas (1987). Stuttgart: Thieme.
4. Aumüller, G. (2007): Anatomie. 208 Tabellen;. Stuttgart: Thieme (Duale Reihe).
  5. Barrey, C.; Darnis, A. (2015): Current strategies for the restoration of adequate lordosis during lumbar fusion. In: *World journal of orthopedics* 6 (1), S. 117–126. DOI: 10.5312/wjo.v6.i1.117.
  6. Barrey, C.; Jund, J.; Nosedá, O.; Roussouly, P. (2007): Sagittal balance of the pelvis-spine complex and lumbar degenerative diseases. A comparative study about 85 cases. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 16 (9), S. 1459–1467. DOI: 10.1007/s00586-006-0294-6.
  7. Barrey, C.; Roussouly, P.; Perrin, G.; Le Huec, J.-C. (2011): Sagittal balance disorders in severe degenerative spine. Can we identify the compensatory mechanisms? In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 20 Suppl 5, S. 626–633. DOI: 10.1007/s00586-011-1930-3.
  8. Bauer, B.; Veit, R. (2003): Dosiswerte in der Röntgendiagnostik. In: *Deutscher Ärzteverlag* 100 (31-32), S. 2087–2088.
  9. Berjano, P.; Langella, F.; Ismael, M.-F.; Damilano, M.; Scopetta, S.; Lamartina, C. (2014): Successful correction of sagittal imbalance can be calculated on the basis of

pelvic incidence and age. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 23 Suppl 6, S. 587–596. DOI: 10.1007/s00586-014-3556-8.

10. Berrington de González, A.; Darby, S. (2004): Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. In: *Lancet (London, England)* 363 (9406), S. 345–351. DOI: 10.1016/S0140-6736(04)15433-0.

11. Bolesta, M. J.; Bohlman, H. H. (1989): Degenerative spondylolisthesis. In: *Instructional course lectures* 38, S. 157–165.

12. Brötz, D.; Weller, M. (2004): Diagnostik und Therapie bei Bandscheibenschäden. Neurologie, Physiotherapie und das McKenzie-Konzept ; 15 Tabellen. Stuttgart: Thieme (Physiofachbuch).

13. Bruno, A. G.; Anderson, D. E.; D'Agostino, J.; Bouxsein, M. L. (2012): The effect of thoracic kyphosis and sagittal plane alignment on vertebral compressive loading. In: *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research* 27 (10), S. 2144–2151. DOI: 10.1002/jbmr.1658.

14. Casazza, B. A. (2012): Diagnosis and treatment of acute low back pain. In: *American family physician* 85 (4), S. 343–350.

15. Cloward, R. B. (1953): The treatment of ruptured lumbar intervertebral discs by vertebral body fusion. I. Indications, operative technique, after care. In: *Journal of neurosurgery* 10 (2), S. 154–168. DOI: 10.3171/jns.1953.10.2.0154.

16. Denard, P. J.; Holton, K. F.; Miller, J.; Fink, H. A.; Kado, D. M.; Marshall, L. M.; Yoo, J. U. (2010): Back pain, neurogenic symptoms, and physical function in relation to spondylolisthesis among elderly men. In: *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 10 (10), S. 865–873. DOI: 10.1016/j.spinee.2010.07.004.

17. Deschênes, S.; Charron, G.; Beaudoin, G.; Labelle, H.; Dubois, J.; Miron, M.-C.; Parent, S. (2010): Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager. In: *Spine* 35 (9), S. 989–994. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181bdcaa4.

18. Dietrich, T. J.; Pfirrmann, C. W. A.; Schwab, A.; Pankalla, K.; Buck, F. M. (2013): Comparison of radiation dose, workflow, patient comfort and financial break-even of

standard digital radiography and a novel biplanar low-dose X-ray system for upright full-length lower limb and whole spine radiography. In: *Skeletal radiology* 42 (7), S. 959–967. DOI: 10.1007/s00256-013-1600-0.

19. Drake, R. L.; Gray, H. (2014): Gray's anatomy for students. [student consult]. 3. ed., international ed. Philadelphia u.a.: Churchill Livingstone Elsevier.

20. Dreischarf, M.; Albiol, L.; Rohlmann, A.; Pries, E.; Bashkuev, M.; Zander, T. et al. (2014): Age-related loss of lumbar spinal lordosis and mobility--a study of 323 asymptomatic volunteers. In: *PloS one* 9 (12), S. e116186. DOI: 10.1371/journal.pone.0116186.

21. Dubousset, J. (1984): The pelvis « intercalary bone » Monograph of the GES.

Dubousset, J. (1998): Importance de la notion de la vertèbre pelvienne dans l'équilibrerachidien. Application à la chirurgie de la colonne vertébrale chez l'enfant et l'adolescent. In: *Paris: Frison Roche*.

22. Duval-Beaupère, G.; Schmidt, C.; Cosson, P. (1992): A barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis. The conditions required for an economic standing position. In: *Ann Biomed Eng* 20 (4), S. 451–462. DOI: 10.1007/BF02368136.

23. Ferraris, L.; Koller, H.; Meier, O.; Hempfing, A. (2012): The relevance of sagittal balance in spine surgery. In: *Deutscher Ärzteverlag*.

24. Fleege, C.; Rickert, M.; Rauschmann, M. (2015): PLIF- und TLIF-Verfahren. Indikation, Technik, Vor- und Nachteile. In: *Der Orthopäde* 44 (2), S. 114–123. DOI: 10.1007/s00132-014-3065-9.

25. Fraser, R. D. (1995): Interbody, Posterior, and Combined Lumbar Fusions. In: *Spine* 20 (Supplement 24), S. 167S. DOI: 10.1097/00007632-199512151-00016.

26. Gelb, D. E.; Lenke, L. G.; Bridwell, K. H.; Blanke, K.; McEnery, K. W. (1995): An analysis of sagittal spinal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers. In: *Spine* 20 (12), S. 1351–1358.

27. Genevay, S.; Atlas, Steven J. (2010): Lumbar spinal stenosis. In: *Best practice & research. Clinical rheumatology* 24 (2), S. 253–265. DOI: 10.1016/j.berh.2009.11.001.

28. Golob, Anna L.; Wipf, Joyce E. (2014): Low back pain. In: *The Medical clinics of North America* 98 (3), S. 405–428. DOI: 10.1016/j.mcna.2014.01.003.

29. González-Sánchez, M.; Luo, J.; Lee, R.; Cuesta-Vargas, A. I. (2014): Spine curvature analysis between participants with obesity and normal weight participants: a biplanar electromagnetic device measurement. In: *BioMed research international* 2014, S. 935151. DOI: 10.1155/2014/935151.
30. Gregory, D. S.; Seto, Craig K.; Wortley, G. C.; Shugart, C. M. (2008): Acute lumbar disk pain: navigating evaluation and treatment choices. In: *American family physician* 78 (7), S. 835–842.
31. Gu, G.; Zhang, H.; Fan, G.; He, S.; Cai, X.; Shen, X. et al. (2014): Comparison of minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion in two-level degenerative lumbar disease. In: *International orthopaedics* 38 (4), S. 817–824. DOI: 10.1007/s00264-013-2169-x.
32. Harms, J.; Rolinger, H. (1982): Die operative Behandlung der Spondylolisthese durch dorsale Aufrichtung und ventrale Verblockung. In: *Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete* 120 (3), S. 343–347. DOI: 10.1055/s-2008-1051624.
33. Harms, J. Online verfügbar unter "[www.harms-spinesurgery.com](http://www.harms-spinesurgery.com)".
- Harms, V. (1998): Biomathematik, Statistik und Dokumentation. Eine leichtverständliche Einführung, [mit ausführlich kommentierten Prüfungsfragen] ; nach den Gegenstandskatalogen für den 1. und 2. Abschnitt der ärztlichen Prüfung. 7., überarb. Aufl. Kiel: Harms.
34. Hempfing, A.; Zenner, J.; Ferraris, L.; Meier, O.; Koller, H. (2011): Wiederherstellung der sagittalen Balance bei der Versorgung thorakaler und lumbaler Wirbelkörperfrakturen. In: *Der Orthopäde* 40 (8), S. 690–702. DOI: 10.1007/s00132-011-1796-4.
35. Hohmann, D.; Kügelgen, B.; Liebig, K. (Hg.) (2013): Erkrankungen des zervikookzipitalen Übergangs Spondylolisthesis Wirbelsäule in Arbeit und Beruf: Springer (Neuroorthopädie).
36. Illés, S. Tamás (2015): A derékfájás: mikor és mit tegyünk? In: *Orvosi hetilap* 156 (33), S. 1315–1320. DOI: 10.1556/650.2015.30232.
37. Imhof, H.; Halpern, B. (Hg.) (2006): Wirbelsäule. Stuttgart: Thieme (Pareto-Reihe Radiologie).

38. Inufusa, A.; An, H. S.; Lim, T. H.; Hasegawa, T.; Haughton, V. M.; Nowicki, B. H. (1996): Anatomic changes of the spinal canal and intervertebral foramen associated with flexion-extension movement. In: *Spine* 21 (21), S. 2412–2420.
39. Inui, Y.; Doita, M.; Ouchi, K.; Tsukuda, M.; Fujita, N.; Kurosaka, M. (2004): Clinical and radiologic features of lumbar spinal stenosis and disc herniation with neuropathic bladder. In: *Spine* 29 (8), S. 869–873.
40. Junghans, H. (1930): Spondylolisthesis ohne Spalt im Zwischengelenk-Stück: Pseudospondylolisthesen. In: *Acrh. Orthop. Unfallchiru.*, 29, S. 118–127.
41. Kahle, W.; Frotscher, M. (2013): Nervensystem und Sinnesorgane. 11., überarb. Aufl.
42. Kalff, R.; Ewald, C.; Waschke, A.; Gobisch, L.; Hopf, C. (2013): Degenerative lumbar spinal stenosis in older people: current treatment options. In: *Deutsches Ärzteblatt international* 110 (37), S. 613-23; quiz 624. DOI: 10.3238/arztebl.2013.0613.
43. Kalichman, L.; Hunter, D. J. (2008): Diagnosis and conservative management of degenerative lumbar spondylolisthesis. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 17 (3), S. 327–335. DOI: 10.1007/s00586-007-0543-3.
44. Lafage, V.; Schwab, F.; Skalli, W.; Hawkinson, N.; Gagey, P.-M.; Ondra, S.; Farcy, J.-P. (2008): Standing balance and sagittal plane spinal deformity: analysis of spinopelvic and gravity line parameters. In: *Spine* 33 (14), S. 1572–1578. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31817886a2.
45. Le Huec, J. C.; Aunoble, S.; Leijssen, P.; Pellet, N. (2011): Pelvic parameters: origin and significance. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 20 Suppl 5, S. 564–571. DOI: 10.1007/s00586-011-1940-1.
46. Le Huec, J.-C.; Basso, Y.; Mathews, H.; Mehbod, A.; Aunoble, S.; Friesem, T.; Zdeblick, T. (2005): The effect of single-level, total disc arthroplasty on sagittal balance parameters: a prospective study. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European*



*Section of the Cervical Spine Research Society* 14 (5), S. 480–486. DOI: 10.1007/s00586-004-0843-9.

47. Le Huec, J.-C.; Faundez, A.; Dominguez, D.; Hoffmeyer, P.; Aunoble, S. (2015): Evidence showing the relationship between sagittal balance and clinical outcomes in surgical treatment of degenerative spinal diseases: a literature review. In: *International orthopaedics* 39 (1), S. 87–95. DOI: 10.1007/s00264-014-2516-6.

48. Legaye, J.; Duval-Beaupere; Marty, C.; Hecquet, J. (1998): Pelvic incidence. A fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. In: *European Spine Journal* 7 (2), S. 99–103. DOI: 10.1007/s005860050038.

49. Legaye, J.; Duval-Beaupère, G (2005): Sagittal plane alignment of the spine and gravity: a radiological and clinical evaluation. In: *Acta orthopaedica Belgica* 71 (2), S. 213–220.

50. Leonidou, A.; Lepetsos, P.; Pagkalos, J.; Antonis, K.; Flieger, I.; Tsiridis, E.; Leonidou, O. (2015): Treatment for spondylolysis and spondylolisthesis in children. In: *Journal of orthopaedic surgery (Hong Kong)* 23 (3), S. 379–382.

51. Lin, P. M. (1977): A Technical Modification of Cloward's Posterior Lumbar Interbody Fusion. In: *Neurosurgery* 1 (2), S. 118–124. DOI: 10.1227/00006123-197709000-00006.

52. Lippert, H. (1993): *Lehrbuch Anatomie. 54 Tabellen. 3., erw. Aufl. München: Urban & Schwarzenberg.*

53. Lundon, K. M.; Li, A. M.; Bibershtein, S. (1998): Interrater and intrarater reliability in the measurement of kyphosis in postmenopausal women with osteoporosis. In: *Spine* 23 (18), S. 1978–1985.

54. Manchikanti, L.; Singh, V.; Falco, F. J.; Benyamin, E. Ramsin, M.; Hirsch, J. A. (2014): Epidemiology of low back pain in adults. In: *Neuromodulation : journal of the International Neuromodulation Society* 17 Suppl 2, S. 3–10. DOI: 10.1111/ner.12018.

55. Manwaring, J. C.; Bach, K.; Ahmadian, A. A.; Deukmedjian, A. R.; Smith, D. A.; Uribe, J. S. (2014): Management of sagittal balance in adult spinal deformity with minimally invasive anterolateral lumbar interbody fusion: a preliminary radiographic study. In: *Journal of neurosurgery. Spine* 20 (5), S. 515–522. DOI: 10.3171/2014.2.SPINE1347.

56. Marketos, S. G.; Skiadas, P. (1999): Hippocrates. The father of spine surgery. In: *Spine* 24 (13), S. 1381–1387.
57. Matsumoto, M.; Watanabe, K.; Tsuji, T.; Ishii, K.; Takaishi, H.; Nakamura, M. et al. (2009): Nocturnal leg cramps: a common complaint in patients with lumbar spinal canal stenosis. In: *Spine* 34 (5), S. E189-94. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31818f953c.
58. Matsunaga, S.; Sakou, T.; Morizono, Y.; Masuda, A.; Demirtas, A. M. (1990): Natural history of degenerative spondylolisthesis. Pathogenesis and natural course of the slippage. In: *Spine* 15 (11), S. 1204–1210.
59. Mayer, H. M. (2001): Diskogener Rückenschmerz und degenerative Spinalstenose - Wie sinnvoll sind operative Verfahren? In: *Schmerz (Berlin, Germany)* 15 (6), S. 484–491. DOI: 10.1007/s004820100036.
60. Mirbagheri, S.-S.; Rahmani-Rasa, A.; Farmani, F.; Amini, P.; Nikoo, M.-R. (2015): Evaluating Kyphosis and Lordosis in Students by Using a Flexible Ruler and Their Relationship with Severity and Frequency of Thoracic and Lumbar Pain. In: *Asian spine journal* 9 (3), S. 416–422. DOI: 10.4184/asj.2015.9.3.416.
61. Molinos, M.; Almeida, C. R.; Caldeira, J.; Cunha, C.; Gonçalves, R. M.; Barbosa, M. A. (2015): Inflammation in intervertebral disc degeneration and regeneration. In: *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society* 12 (104), S. 20141191. DOI: 10.1098/rsif.2014.1191.
62. Morvan, G.; Mathieu, P.; Vuillemin, V.; Guerini, H.; Bossard, P.; Zeitoun, F.; Wybier, M. (2011): Standardized way for imaging of the sagittal spinal balance. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 20 Suppl 5, S. 602–608. DOI: 10.1007/s00586-011-1927-y.
63. Nachemson, A. (1975): Towards a better understanding of low-back pain: a review of the mechanics of the lumbar disc. In: *Rheumatology and rehabilitation* 14 (3), S. 129–143.
- Netter, F. H. (2014): Atlas of human anatomy. 6. ed. Philadelphia Pa.: Saunders Elsevier.
64. O'Rourke, M. R.; Grobler, L. J. (1998): L4-L5 degenerative spondylolisthesis: indications and technique for operative management. In: *The Iowa orthopaedic journal* 18, S. 76–86.

65. O'Sullivan, P. B. (2000): Lumbar segmental 'instability': clinical presentation and specific stabilizing exercise management. In: *Manual therapy* 5 (1), S. 2–12. DOI: 10.1054/math.1999.0213.
66. Ou-Yang, L.; Lu, G.-:M. (2015): Dysfunctional microcirculation of the lumbar vertebral marrow prior to the bone loss and intervertebral discal degeneration. In: *Spine* 40 (10), S. E593-600. DOI: 10.1097/BRS.0000000000000834.
67. Parr, A. T.; Diwan, S. Abdi, S. (2009): Lumbar interlaminar epidural injections in managing chronic low back and lower extremity pain: a systematic review. In: *Pain physician* 12 (1), S. 163–188.
68. Patel, V. B.; Wasserman, R.; Imani, F. (2015): Interventional Therapies for Chronic Low Back Pain: A Focused Review (Efficacy and Outcomes). In: *Anesthesiology and pain medicine* 5 (4), S. e29716. DOI: 10.5812/aapm.29716.
69. Pellet, N.; Aunoble, S.; Meyrat, R.; Rigal, J.; Le Huec, J.-C. (2011): Sagittal balance parameters influence indications for lumbar disc arthroplasty or ALIF. In: *European spine journal* 20 Suppl 5, S. 647–662. DOI: 10.1007/s00586-011-1933-0.
- 70 Pfeiffer, M.; Griss, P, Schuler, P. (1992): Development of spondylolisthesis after growth arrest. In: *European spine journal* 1 (1), S. 49-52. DOI: 10.1007/BF00302143
71. Rickert, Marcus; Rauschmann, Michael; Fleege, C.; Behrbalk, E.; Harms, J. (2015): Interkorporelle Fusionsverfahren an der Wirbelsäule. Die Entwicklung aus historischer Sicht. In: *Der Orthopäde* 44 (2), S. 104–113. DOI: 10.1007/s00132-015-3076-1.
72. Rittenberg, Joshua D.; Ross, Amy E. (2003): Functional rehabilitation for degenerative lumbar spinal stenosis. In: *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America* 14 (1), S. 111–120.
73. Rosenberg, N. J. (1976): Degenerative spondylolisthesis: surgical treatment. In: *Clinical orthopaedics and related research* (117), S. 112–120.
74. Roussouly, Pierre; Gollogly, Sohrab; Berthonnaud, Eric; Dimnet, Johannes (2005): Classification of the Normal Variation in the Sagittal Alignment of the Human Lumbar Spine and Pelvis in the Standing Position. In: *Spine* 30 (3), S. 346–353. DOI: 10.1097/01.brs.0000152379.54463.65.

75. Roussouly, Pierre; Gollogly, Sohrab; Nosedá, Olivier; Berthonnaud, Eric; Dimnet, Johannes (2006): The vertical projection of the sum of the ground reactive forces of a standing patient is not the same as the C7 plumb line: a radiographic study of the sagittal alignment of 153 asymptomatic volunteers. In: *Spine* 31 (11), S. E320-5. DOI: 10.1097/01.brs.0000218263.58642.ff.
76. Roussouly, Pierre; Pinheiro-Franco, João Luiz (2011): Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 20 Suppl 5, S. 609–618. DOI: 10.1007/s00586-011-1928-x.
77. Schünke, Michael; Schulte, Erik; Schumacher, Udo (2007): Prometheus - LernAtlas der Anatomie. Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem ; 182 Tabellen. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Thieme.
78. Schünke, Michael; Schulte, Erik; Schumacher, Udo (2009): Kopf, Hals und Neuroanatomie. 2., überarb. u. erw. Aufl.
79. Schwab, Frank; Lafage, Virginie; Boyce, Reid; Skalli, Wafa; Farcy, Jean-Pierre (2006): Gravity line analysis in adult volunteers: age-related correlation with spinal parameters, pelvic parameters, and foot position. In: *Spine* 31 (25), S. E959-67. DOI: 10.1097/01.brs.0000248126.96737.0f.
80. Schwab, Frank; Patel, Ashish; Ungar, Benjamin; Farcy, Jean-Pierre; Lafage, Virginie (2010): Adult spinal deformity-postoperative standing imbalance: how much can you tolerate? An overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery. In: *Spine* 35 (25), S. 2224–2231. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181ee6bd4.
81. Searle, Angela; Spink, Martin; Ho, Alan; Chuter, Vivienne (2015): Exercise interventions for the treatment of chronic low back pain: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. In: *Clinical rehabilitation* 29 (12), S. 1155–1167. DOI: 10.1177/0269215515570379.
82. Simon, Jeremy; McAuliffe, Matthew; Shamim, Fehreen; Vuong, Nancy; Tahaei, Amir (2014): Discogenic low back pain. In: *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America* 25 (2), S. 305–317. DOI: 10.1016/j.pmr.2014.01.006.

83. Sobotta, Johannes (2006): Rumpf, Eingeweide, untere Extremität. 22., neu bearb. Aufl. München: Elsevier Urban & Fischer (Atlas der Anatomie des Menschen, / Sobotta. Hrsg. von Reinhard V. Putz ... ; Bd. 2).
84. Sparrey, Carolyn J.; Bailey, Jeannie F.; Safaee, Michael; Clark, Aaron J.; Lafage, Virginie; Schwab, Frank et al. (2014): Etiology of lumbar lordosis and its pathophysiology: a review of the evolution of lumbar lordosis, and the mechanics and biology of lumbar degeneration. In: *Neurosurgical focus* 36 (5), S. E1. DOI: 10.3171/2014.1.FOCUS13551.
85. Spetzger, Uwe; Schilling, Andrej von; Winkler, Gerd; Wahrburg, Jürgen; König, Alexander (2013): The past, present and future of minimally invasive spine surgery: a review and speculative outlook. In: *Minimally invasive therapy & allied technologies : MITAT : official journal of the Society for Minimally Invasive Therapy* 22 (4), S. 227–241. DOI: 10.3109/13645706.2013.821414.
86. Spoor, A. B.; Öner, F. C. (2013): Minimally invasive spine surgery in chronic low back pain patients. In: *Journal of neurosurgical sciences* 57 (3), S. 203–218.
87. Stagnara, P.; Mauroy, J. C. de; Dran, G.; Gonon, G. P.; Costanzo, G.; Dimnet, J.; Pasquet, A. (1982): Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis. In: *Spine* 7 (4), S. 335–342.
88. Suthar, Pokhraj; Patel, Rupal; Mehta, Chetan; Patel, Narrotam (2015): MRI evaluation of lumbar disc degenerative disease. In: *Journal of clinical and diagnostic research : JCDR* 9 (4), S. TC04-9. DOI: 10.7860/JCDR/2015/11927.5761.
89. Trepel, Martin (2009): Neuroanatomie. Struktur und Funktion ; [mit dem Plus im Web]. 4., neu bearb. Aufl., [Nachdr.]. München: Elsevier Urban & Fischer.
90. Vaz, G.; Roussouly, P.; Berthonnaud, E.; Dimnet, J. (2002): Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. In: *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 11 (1), S. 80–87.
91. Verbiest, H. (1954): A radicular syndrome from developmental narrowing of the lumbar vertebral canal. In: *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 36-B (2), S. 230–237.

- 92., Vialle, Raphaël; Levassor, Nicolas; Rillardon, Ludovic; Templier, Alexandre; Skalli, Wafa; Guigui, Pierre (2005): Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. In: *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 87 (2), S. 260–267. DOI: 10.2106/JBJS.D.02043.
93. Wood, Kirkham B.; Fritzell, Peter; Dettori, Joseph R.; Hashimoto, Robin; Lund, Teija; Shaffrey, Chris (2011): Effectiveness of spinal fusion versus structured rehabilitation in chronic low back pain patients with and without isthmic spondylolisthesis: a systematic review. In: *Spine* 36 (21 Suppl), S. S110-9. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31822ef8c5.
94. Ye, Yong-Ping; Xu, Hao; Chen, Dan (2013): Comparison between posterior lumbar interbody fusion and posterolateral fusion with transpedicular screw fixation for isthmic spondylolithesis: a meta-analysis. In: *Archives of orthopaedic and trauma surgery* 133 (12), S. 1649–1655. DOI: 10.1007/s00402-013-1868-5.
95. Zhang, Qunhu; Yuan, Zhen; Zhou, Min; Liu, Huan; Xu, Yong; Ren, Yongxin (2014): A comparison of posterior lumbar interbody fusion and transforaminal lumbar interbody fusion: a literature review and meta-analysis. In: *BMC musculoskeletal disorders* 15, S. 367. DOI: 10.1186/1471-2474-15-367.

## **8. Anhang**

Die Seite 78 (Lebenslauf) enthält persönliche Daten. Sie ist deshalb nicht Bestandteil der Online-Veröffentlichung

## **b. Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Prof. Dr. Pfeiffer, der meine Arbeit stets mit viel Verständnis unterstützt hat und mir bei Fragen geduldig zur Seite stand. Für die Bereitstellung weiteren Bildmaterials danke ich ebenso Prof. Dr. Böhm. Außerdem möchte ich meinen Eltern danken, die mich sowohl im Studium als auch in dieser Arbeit immer motiviert haben. Ganz besonderer Dank gebührt meiner Frau Béatrice, die mich von der Ausbildung zum Gesundheits- und Krankenpfleger bis jetzt so liebevoll begleitet und unterstützt hat.



