

Aus der Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie  
(Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Henry W. S. Schroeder)  
der Universitätsmedizin der Universität Greifswald

---

**Thema: Morphometrische Studie der  
Lendenwirbelsäule zur Beurteilung der  
Machbarkeit einer auf intralaminären Schrauben  
basierenden Osteosynthese**

**INAUGURAL-DISSERTATION**

zur  
Erlangung des akademischen  
Grades  
Doktor der Zahnmedizin  
(Dr. med. dent.)

der  
Universitätsmedizin  
der  
Universität Greifswald  
2020

vorgelegt von  
**Marike Bredow-Zeden**  
geboren am 09.07.1980  
in Kaltenkirchen

---

---

Gutacher

Erstgutachter: PD Dr. med. Jörg Baldauf

Zweitgutachter: PD Dr. med. Johannes Lemcke

Dekan: Prof. Dr. med. Karlhans Endlich

Ort, Raum: Online Videokonferenz

Tag der Disputation: 13.10.2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Wirbelsäulenchirurgie . . . . .	1
1.1.1 Anatomische Besonderheiten der LWS . . . . .	2
1.1.2 Biomechanik der LWS . . . . .	2
1.2 Destabilisierende Wirbelsäulenpathologien . . . . .	3
1.2.1 Frakturen . . . . .	3
1.2.2 Degenerative Lockerung des Gefüges . . . . .	3
1.2.3 Neoplastische Veränderungen . . . . .	4
1.3 Wirbelsäulenosteosynthesetechniken . . . . .	4
1.3.1 Pedikelschrauben . . . . .	5
1.3.2 Laminaschrauben . . . . .	7
1.4 Fragestellung und Zielsetzung . . . . .	8
<b>2 Materialien</b>	<b>11</b>
2.1 Patienten . . . . .	11
2.2 Polytrauma-CT . . . . .	11
2.3 Kadaver . . . . .	12
<b>3 Methoden</b>	<b>13</b>
3.1 Ethikantrag . . . . .	13
3.2 Intraobserver-Variabilität . . . . .	13
3.3 Analyse . . . . .	13
3.4 Lamina . . . . .	14
3.4.1 Laminalänge der LWK . . . . .	14
3.4.2 Laminabreite der LWK . . . . .	15

## Inhaltsverzeichnis

---

3.4.3	Laminahöhe der LWK . . . . .	17
3.4.4	Laminalage in Bezug zum Wirbelkorpus . . . . .	18
3.4.5	Dornfortsatzhöhe am Schnittpunkt der Laminaachsen . . . . .	20
3.5	Pedikel . . . . .	22
3.5.1	Pedikelbreite und Pedikelhöhe . . . . .	22
3.5.2	Validität der Methode . . . . .	23
3.6	Statistik . . . . .	23
3.6.1	Statistische Analyse . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>25</b>
4.1	Studiengruppe . . . . .	25
4.2	Intraobserver-Variabilität . . . . .	26
4.3	Laminamaße . . . . .	26
4.3.1	Laminalänge . . . . .	26
4.3.2	Laminadurchmesser . . . . .	32
4.3.2.1	Breite der Lamina . . . . .	32
4.3.2.2	Höhe der Lamina . . . . .	32
4.3.3	Räumliche Lage der Laminae im Verhältnis zum Wirbelkorpus . . . . .	36
4.3.3.1	Sagittaler Winkel . . . . .	36
4.3.3.2	Axialer Winkel . . . . .	36
4.4	Pedikelmaße . . . . .	38
4.4.1	Pedikelbreite . . . . .	38
4.4.2	Pedikelhöhe . . . . .	38
4.5	Dornfortsatzmaße . . . . .	50
4.6	Validierung . . . . .	53
4.7	Korrelation der Lamina- und Pedikeldurchmesser . . . . .	53
4.8	Beurteilung der Schraubenplatzierung . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>63</b>
5.1	Studie . . . . .	63
5.1.1	Studiengruppe . . . . .	63
5.1.2	Methodik . . . . .	64
5.1.3	Strahlenbelastung . . . . .	64
5.2	Bewertung der Laminamaße . . . . .	65
5.2.1	Laminalänge . . . . .	65
5.2.2	Laminabreite und Laminahöhe . . . . .	65



5.2.3	Räumliche Lage der Laminae . . . . .	66
5.2.4	Pedikel . . . . .	66
5.2.5	Bewertung der Platzierbarkeit von intralaminären Schrauben . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>71</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>XXV</b>



# Abbildungsverzeichnis

3.1	Grundeinstellung in sagittaler, axialer und koronarer Ebene . . . . .	14
3.2	Länge der Lamina der Lendenwirbelkörper . . . . .	15
3.3	Bestimmung der äußeren Laminabreite . . . . .	16
3.4	Bestimmung der inneren Laminabreite . . . . .	16
3.5	Bestimmung der äußeren Laminahöhe . . . . .	17
3.6	Bestimmung der inneren Laminahöhe . . . . .	18
3.7	Winkelmessung in der axialen Ebene . . . . .	19
3.8	Winkelmessung in der sagittalen Ebene . . . . .	20
3.9	Dornfortsatzhöhe am Schnittpunkt der Laminaachsen . . . . .	21
3.10	Dornfortsatzhöhe am Schnittpunkt der Laminaachsen . . . . .	21
3.11	Pedikelbreite und Pedikelhöhe . . . . .	22
4.1	Altersstrukturvergleich . . . . .	26
4.2	Länge der Laminae . . . . .	27
4.3	Länge intralaminärer Schrauben . . . . .	28
4.4	Äußerer Durchmesser der Laminabreite . . . . .	33
4.5	Innerer Durchmesser der Laminabreite . . . . .	34
4.6	Äußerer Durchmesser der Laminahöhe . . . . .	34
4.7	Innerer Durchmesser der Laminahöhe . . . . .	35
4.8	Sagittaler Winkel der Lamina . . . . .	37
4.9	Axialer Winkel der Lamina . . . . .	37
4.10	Pedikelbreite innerer Durchmesser . . . . .	42
4.11	Pedikelbreite äußerer Durchmesser . . . . .	47
4.12	Pedikelhöhe äußerer Durchmesser . . . . .	48
4.13	Pedikelhöhe innerer Durchmesser . . . . .	49
4.14	Äußerer Durchmesser der Dornfortsatzhöhe . . . . .	52
4.15	Innerer Durchmesser der Dornfortsatzhöhe . . . . .	52
4.16	Höhenkorrelation weiblicher Probandinnen . . . . .	55

## Abbildungsverzeichnis

---

4.17 Breitenkorrelation weiblicher Probandinnen . . . . .	56
4.18 Höhenkorrelation männlicher Probanden . . . . .	57
4.19 Breitenkorrelation männlicher Probanden . . . . .	58
4.20 Mindestmaße von 4,5 mm . . . . .	60
4.21 Mindestmaße von 5 mm . . . . .	60

# Tabellenverzeichnis

2.1	Auswahlkriterien der Probanden und Probandinnen . . . . .	11
4.1	Laminamaße der weiblichen Probandinnen . . . . .	29
4.2	Laminamaße der männlichen Probanden . . . . .	30
4.3	Pedikelmaße der Männer . . . . .	40
4.4	Pedikelmaße der Frauen . . . . .	41
4.5	Maße der weiblichen Probandinnen . . . . .	42
4.6	Maße der männlichen Probanden . . . . .	44
4.7	Dornfortsatzmaße der Frauen . . . . .	51
4.8	Dornfortsatzmaße der Männer . . . . .	51
4.9	Korrelation Pedikel vs. Laminae der weiblichen Probandinnen . . . . .	54
4.10	Korrelation Pedikel vs. Laminae der männlichen Probanden . . . . .	54
4.11	Mindestmaße weiblich bei 5 mm Grenzwert . . . . .	59
4.12	Mindestmaße weiblich bei 4,5 mm Grenzwert . . . . .	61
4.13	Mindestmaße männlich bei 5 mm Grenzwert . . . . .	61
4.14	Mindestmaße männlich bei 4,5 mm Grenzwert . . . . .	61
5.1	Anatomische und radiologische Studien zu Pedikelmaßen . . . . .	67



# 1 Einleitung

## 1.1 Wirbelsäulenchirurgie

Die Wirbelsäulenchirurgie hat in den vergangenen 40 Jahren stark an Bedeutung gewonnen. An dieser Entwicklung haben die Fortschritte der Wirbelsäulenosteosynthesetechniken entscheidenden Anteil gehabt, da viele Wirbelsäulenerkrankungen mit einer Destabilisierung beziehungsweise (bzw.) krankhafter Deformität einhergehen. Mit dem Aufkommen der externen und kurz darauf auch internen Stabilisierungstechniken und Implantaten war es fortan möglich, Instabilitäten der Wirbelsäule operativ zu therapieren.

Mit den Erfolgen dieser ersten Stabilisierungen setzte eine anhaltende technische Entwicklung ein, die unter anderem den biomechanischen Anforderungen und der Entwicklung der operativen Therapie zur minimalen Invasivität Rechnung trug.

Dabei sind die biomechanischen Anforderungen an Wirbelsäulenimplantaten weiterhin nicht vollständig erfüllt. Zudem können Bedingungen von Seiten der Patienten vorliegen, die eine Verwendung von Implantaten erschweren.

Die Folge ist bei der zunehmenden Verbreitung von wirbelsäulenchirurgischen Eingriffen eine konstante Rate von Reoperationen zur Restabilisierung, bzw. eine zunehmende Häufigkeit dieser Revisionsoperationen. Bei Wirbelsäulenoperationen mit einer Osteosynthese von 4 oder mehr Segmenten lag die Reoperationsrate innerhalb von 4 Jahren aufgrund von Materialkomplikationen in einer repräsentativen Studie bei 25,8%<sup>42,52,88</sup>. Nach dorsaler Instrumentierung schwankt die Gesamtrevisionsrate in der Literatur zwischen 0 und 31%<sup>5,21,31,42,52,53,84,88,89,105</sup>. Charakteristisch für Revisionsoperationen ist, dass bei einer Restabilisierung der Wirbelsäule vormals mit Osteosynthesematerial belegte Strukturen oftmals nicht mehr belegt werden können. Die Einbeziehung benachbarter Wirbelkörper und damit die größere Ausdehnung der Instrumentierung und des Operationsfeldes ist die häufige Folge.

Dabei ist zur internen Stabilisierung der Wirbelsäule der Einsatz von Pedikelschrauben im Bereich der Brustwirbelsäule (BWS) und Lendenwirbelsäule (LWS) der etablierte Standard. Dennoch können anatomische Besonderheiten, pathologische Veränderungen oder infolge der Häufung wirbelsäulenchirurgischer Eingriffe ein Zustand nach vorangegangenen Wirbelsäulen-

## 1 Einleitung

---

operationen die Verwendung von Pedikelschrauben einschränken. Es besteht daher trotz der fortgeschrittenen operationstechnischen Entwicklungen ein Bedarf an alternativen Osteosynthesetechniken.

### 1.1.1 Anatomische Besonderheiten der LWS

Nach Junghanns<sup>51</sup> stellt das Bewegungsegment (Functional Spine Unit (FSU) ) die kleinste funktionelle Einheit der Wirbelsäule dar. Dieses besteht aus zwei benachbarten Wirbelkörpern und der Zwischenwirbelscheibe (Discus intervertebralis), sowie den paarigen Wirbelgelenken und den umgebenden Weichteilen mit Muskeln, Nerven und Bändern. Die Integrität der Wirbelkörper und der Wirbelverbindungen ist dabei eine unabdingbare Notwendigkeit, damit das Zusammenspiel dieses elastischen Systems funktioniert. Die regelrechte Funktion der Wirbelsäule kann beispielsweise durch Traumata, Tumoren, Entzündungen oder degenerative Veränderungen beeinträchtigt werden. Viele der resultierenden Strukturstörungen müssen insbesondere bei resultierender Instabilität der Wirbelsäule zur Vermeidung von Querschnittslähmungen und hochgradiger Immobilität der Betroffenen sowie zur Korrektur bzw. Vermeidung einer Deformität operativ behandelt werden. Laminae und Pedikel bilden jeweils die Bögen der Wirbel. Das Ligamentum (Lig.) flavum, welches von der anterioren kaudalen Fläche des oberen Bogens bis zum Oberrand des unteren Bogens und nach lateral bis zum Foramen intervertebralis reicht, füllt das interlaminäre Fenster aus<sup>14</sup>. Das interlaminäre Fenster hat topographische Beziehungen zur Bandscheibe, das sich von kaudal nach kranial ändert. In Höhe Lendenwirbelkörper (LWK) 5/Sakralwirbelkörper (SWK) 1 liegt das interlaminäre Fenster noch auf Höhe des Bandscheibenfaches<sup>14</sup>. Weiter nach kranial gehend liegt das interlaminäre Fenster kaudal des Bandscheibenraumes. Je weiter es nach kranial der lumbalen Bandscheibe geht, desto größer wird die Distanz<sup>14</sup>. Von LWK 1 bis LWK 5 nimmt die Größe der Wirbelkörper kontinuierlich zu. Dieses ist für die Wahl der Länge und Stärke der Wirbelkörperschrauben wesentlich. Die Stellung der Pedikel zum Wirbelkörper verändert sich. Die Wirbelkörper im Lendenbereich zeichnen sich durch eine besondere Form aus und haben einen bohnenförmigen Grundriss. Der transversale Durchmesser ist größer als der sagittale Durchmesser. Der Dornfortsatz richtet sich gerade nach hinten.

### 1.1.2 Biomechanik der LWS

In der LWS kommt es in den oberen Bewegungssegmenten bei Seitwärtsbewegungen zu einer Rotation nach kontralateral, während im lumbosakralen Übergang (LWK 5/SWK 1) eine gleichsinnige Bewegungskopplung erfolgt<sup>35,86</sup>. Die sekundären Rotationsbewegungen dominieren in



den oberen LWS Abschnitten<sup>8</sup>. In dem kaudalen Abschnitt der LWS sind Seitwärtsbewegungen als gekoppelte Bewegung anzusehen<sup>8</sup>.

## 1.2 Destabilisierende Wirbelsäulenpathologien

### 1.2.1 Frakturen

Wirbelkörperfrakturen gliedern sich in traumatische, osteoporotische und pathologische Verletzungen und können konservativ oder operativ behandelt werden. Die meisten Frakturen der Wirbelsäule betreffen den unteren Bereich der Halswirbelsäule und den thorakolumbalen Übergang, die am häufigsten durch Verkehrsunfälle oder Sportverletzungen verursacht werden. Es können dabei einfache Kompressionsbrüche bis zu komplexen diskoligamentären Zerreißen und Berstungsfrakturen auftreten. Zur klinischen und radiologischen Einteilung der thorakolumbalen Frakturen wird das drei Säulen-Modell nach Denis angewendet und ist sinnvoll für die Evaluierung der Stabilität einer Fraktur<sup>27</sup>. Die AO Spine Klassifikation wird ebenso für die Fraktуреinteilung in der Klinik angewendet. Aufgrund der steigenden Lebenserwartung treten prozentual osteoporotische Wirbelkörperfrakturen vermehrt auf. Mit einer Inzidenz von 15 % ist die Osteoporose die häufigste Skeletterkrankung und gehört laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) zu den häufigsten chronischen Krankheiten. Es kommt bei der Osteoporose durch die Rarefizierung der Spongiosa und der Ausdünnung der Kompakta bereits unter physiologischen Bedingungen zu einer mechanischen Überlastung. Es entstehen als Folge von rezidivierenden Mikrofrakturen typische Höhenminderungen und Deformierungen der Wirbelkörper bis hin zu pathologischen Wirbelkörperbrüchen<sup>83</sup>. Bei neurologischen Ausfallserscheinungen durch die Retropulsion von Knochenfragmenten in den Spinalkanal kann eine sofortige operative Dekompriermung und Stabilisierung erforderlich sein<sup>9</sup>. Dabei stellen insbesondere wiederholt auftretende Frakturen, bzw. die bereits voroperierte osteoporotische Wirbelsäule eine therapeutische Herausforderung dar. So sind Wirbelkörper, bei denen bereits eine Zementaugmentation, wie eine Kyphoplastie oder Vertebroplastie durchgeführt wurde, nicht mehr mit Pedikelschrauben zur Osteosynthese belegbar.

### 1.2.2 Degenerative Lockerung des Gefüges

Degenerative Veränderungen an der Wirbelsäule, insbesondere der Osteochondrose stellen ein erhöhtes Risiko für Instabilitäten dar. Zudem stellt diese Pathologie nach einer erfolgten operativen Fusion eines Wirbelsegmentes eine gefürchtete Komplikation in Form der Anschlußinstabilität kaudal oder kranial des operierten Segmentes dar. Die Veränderungen dabei sind vielfältig

## 1 Einleitung

---

und bedingen sich häufig gegenseitig. Anlagebedingte Veränderungen können eine Destabilisierung begünstigen oder nach einer operativen Therapie zu fortdauernden Beschwerden führen. Eine weitere Hauptursache für degenerative Veränderungen ist die frühzeitige Alterung des bradytrophen Gewebes der Bandscheibe, die durch statische und mechanische Einflüsse begünstigt und verstärkt werden. Die Degeneration des Discus intervertebralis führt zu seiner Höhenverminderung und sekundär zur Lockerung des Gelenk- und Bandapparates<sup>44,61</sup>. Degenerationsursachen können vielfältig sein und durch zu hohe Belastungen der Wirbelsäule auftreten<sup>1,70</sup>. Desweiteren führen Noxen, wie Nikotinabusus zu einer vorzeitigen Bandscheibendegeneration<sup>80</sup>. Überwiegend in LWK 3/ LWK 4 und LWK 4/ LWK 5 finden die degenerativen Bandscheibenveränderungen statt, die bevorzugt bei Männern durch erhöhte Belastung und größere Diffusionsstrecken auftreten<sup>79</sup>.

Nach Spondylodese zur Behandlung einer degenerativen Instabilität kann es vor dem Erreichen einer knöchernen Fusion zu pseudarthrotischer oder septischer Materiallockerung kommen. In der Folge ist eine Revisionsspondylodese mit der Notwendigkeit der Erweiterung der Instrumentierung um weitere Wirbelsegmente erforderlich.

### 1.2.3 Neoplastische Veränderungen

Bei neoplastischen Veränderungen der Wirbelsäule handelt es sich bei den ossären Neubildungen zum größten Teil um Metastasen, die bei cirka (ca.) 10% aller Malignompatienten vorkommen<sup>48</sup>. 90% aller Knochenmetastasen entfallen auf den Bereich der Wirbelsäule<sup>69</sup>. Dabei wird eine resultierende Instabilität durch die osteoklastische Destruktion operativ durch eine palliative Stabilisierung therapiert<sup>48,100</sup>.

## 1.3 Wirbelsäulenosteosynthesetechniken

Ziele der operativen Therapie an der Wirbelsäule sind die Restauration der strukturellen Integrität und die Wiederherstellung der Stabilität und Funktionalität sowie der Schutz, bzw. die Druckentlastung der nervalen Strukturen. Eine stabilisierende Operation an der LWS erfolgt unter Berücksichtigung der Lordose und des sagittalen Profils und der Balance<sup>46</sup>. Die dabei an der Pathologie beteiligten bzw. angrenzenden Wirbel werden mittels eines Systems aus Schrauben und Längsträgern miteinander fixiert. Über das Längsträgersystem kann die Reposition einer Fraktur bzw. einer Spondylolisthesis erfolgen.

Eine segmentale Fixierung mit oder ohne Spondylodese wird bei vielen Wirbelsäulenerkrankungen, wie degenerativer Skoliose, Spondylolisthesis, Frakturen, Tumoren bzw. Wirbelkörpermetastasen und anderen Formen der Instabilität der Wirbelsäule eingesetzt. Dabei ist die beid-

seitige transpedikuläre Platzierung von Osteosyntheseschrauben zur Fixierung der etablierte Standard<sup>6</sup>. Biomechanisch stellen die Pedikel die belastbarsten Strukturen eines Wirbels dar<sup>55</sup>. Zu den hauptsächlichen Zielen der operativen Therapie von destabilisierenden Pathologien der LWS gehören die anatomische Reposition, die Retention der erzielten Korrektur, die Dekompression neuronaler Strukturen, die Rekonstruktion des sagittalen Wirbelsäulenprofils bei gleichzeitiger Minimalisierung der Fixationslänge und Vermeidung von Materialkomplikationen<sup>11</sup>.

In der technischen Entwicklung von Osteosynthesetechniken an der Wirbelsäule sind zunächst Techniken aus der Frakturosteosynthese für die Wirbelsäule adaptiert worden. Hier sind die direkten Schraubenosteosynthesen von Frakturen und die Verblockung von Wirbeln durch transartikuläre Schrauben und Drahtcerclagen zu nennen. Später, mit der Entwicklung neuer Implantate, sind Schrauben-Platten-, Schrauben- und Stabsysteme hinzugekommen.

Bereits 1944 wurde die transartikuläre Verschraubung durch das Facettengelenk in die Wirbelkörper der lumbosakralen Wirbelsäule von King erstmals beschrieben<sup>54</sup> und von Boucher im Jahre 1959 weiterentwickelt<sup>15,34</sup>. Diese Schraubenfixierung besteht darin, die Bewegung an den Facettengelenken mit Schrauben zu blockieren, die das Gelenk perforieren und durchdringen. Bei dieser primären Verschraubung von Knochen im Bereich der Wirbelsäule diente der Pedikel oder die Lamina hier noch nicht als Implantatlager, sondern wurde im Rahmen der transartikulären Schraubenarthrodese von benachbarten Facettengelenken miterfasst<sup>30</sup>.

Buck beschrieb die direkte Frakturosteosynthese mit Schrauben translaminär durch die Pars interarticularis bei Spondylolysen<sup>18</sup>. Ebenfalls mit der Intention einer Frakturosteosynthese wurde von Bradford eine Drahtcerclage zur Osteosynthese der Pars interarticularis eingeführt<sup>16</sup>.

Diesen direkten Osteosynthese- bzw. Arthrodesetechniken sind aufgrund der geringen biomechanischen Belastbarkeit eine recht hohe Rate an Materialversagen und hohe Rate an Pseudarthrosen gemein, bei gleichzeitig invasiver und risikoreicher Implantation. Diese Techniken sind daher weitgehend verlassen worden.

Mit der Entwicklung gekoppelter Schrauben-Träger-Systeme und später mit deren Winkelstabilität konnte die biomechanische Belastbarkeit implantatseitig deutlich erhöht werden.

Für die biomechanische Stabilität bei der Platzierung von Schrauben sind jedoch weitere patientenseitige Parameter wichtig, wie die Länge und Breite des Schraubenlagers, die Lage der Kopplungspunkte im Verhältnis zur Lage des Achsenkreuzes der Bewegungsachsen des Wirbelsegmentes oder die Knochenfestigkeit.

### 1.3.1 Pedikelschrauben

Im Rahmen von Frakturversorgungen beschrieben Roy-Camille und andere (et al.) 1970 das Einbringen von Schrauben in die Pedikel als Implantatlager<sup>90</sup>. Die dorsale Stabilisierung der

## 1 Einleitung

---

Wirbelsäule mittels transpedikulärer Schrauben mit seitlicher Plattenverbindung verbreitete sich 1970/1976 weltweit. Durch diese Methode erhielt das Implantatlager einen stabilen Fixpunkt, um anschließend Platten, wie sie in der Extremitätenosteosynthese eingesetzt werden, an der Wirbelsäule zu befestigen (Plattenspondylodese)<sup>30</sup>. Da der Schraubenkopf mit dem Plattenloch jedoch keine winkelstabile Verbindung einging, war das Konstrukt biomechanisch auf das Prinzip der Dreipunktwirkung und folglich einer multisegmentalen Montage angewiesen<sup>30</sup>. Magerl wendete 1977 den Fixateur externe an<sup>13,71</sup>. Er verwendete lange Schanz-Schrauben in eigenentwerfener Technik, die er perkutan transpedikulär in unmittelbaren Nachbarwirbelkörpern der Fraktur stabil verankerte, um eine Winkelstabilität zu erreichen<sup>30</sup>. Eine Weiterentwicklung wurde 1984 durch Dick et al. mit dem Fixateur interne entwickelt und entsprach bereits weitgehend der heute angewendete Methode<sup>13,71,91</sup>. Diese beinhaltet eine winkelstabile Verbindung zwischen der Pedikelschraube und einem Längsträger. Der Fixateur interne eignet sich auch außerhalb der Frakturbehandlung bei traumatischen Fehlstellungen, Metastasen, Tumoren, degenerativen Instabilitäten, lumbosakralen Fehlbildungen und Spondylolisthesen<sup>30</sup>. Pedikelschrauben basierte Konstrukte zeichnen sich durch eine hohe Rotationsstabilität aus und zeigen im klinischen Einsatz eine hohe Standfestigkeit gegenüber mechanischen Belastungen<sup>12</sup>. Mit ihnen sind auch Korrekturen von Deformitäten der Wirbelsäule möglich<sup>17</sup>.

Es bestehen eine Vielzahl von Weiterentwicklungen, wobei jedoch das Grundprinzip des Fixateur interne mit transpedikulärer Verschraubung im Bereich der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule unverändert blieb und als Standardverfahren etabliert ist<sup>2,28,29</sup>.

Bei jedem operativen Verfahren kann es bei der Platzierung von Schrauben, abhängig von den anatomischen Verhältnissen (zum Beispiel (z.B.) vom Pedikeldurchmesser, der Knochenfestigkeit, einer vorliegenden Skoliose), dem zu operierenden Wirbelsäulenabschnitt und der Technik des Operateurs zu Fehlplatzierungen kommen. Die Häufigkeit wird in der Literatur zwischen 2,5% und bis zu 40,0% angegeben<sup>5,23,37,50,58,64,76,77</sup>. Die Platzierung von Pedikelschrauben ist aufgrund anatomischer Verhältnisse, wie des Pedikeldurchmessers, nicht immer möglich. Den größten transversalen Durchmesser der Pedikel findet man in der LWS<sup>91</sup>. Wichtig ist der Pedikeldurchmesser für die Auswahl des Schraubendurchmessers, wobei die gebräuchlichen Schrauben einen Durchmesser von 4 bis 7 Millimeter (mm) haben bei einer Länge von 45 bis 55 mm. Bei sehr schmalen Pedikeln besteht das Risiko von Perforationen der Schraube durch die Pedikelkortikalis mit dem Risiko der Verletzung neuraler Strukturen und resultierender mangelnder Festigkeit. Zur Vermeidung dieser Situation muss ein angepasster reduzierter Schraubendurchmesser zur Anwendung kommen<sup>67</sup>. Dabei sind Schraubendurchmesser von 4 mm und darunter bei Pedikelschrauben in der LWS nicht sinnvoll einsetzbar. Potentielle Ausweichstrategien bei hypoplastischen Pedikeln wäre die Erweiterung der Instrumentierung in die Lamina, um

zusätzliche Segmente oder die Nutzung alternativer Strukturen zur Schraubenplatzierung zu ermöglichen.

### 1.3.2 Laminaschrauben

Laminaschrauben wurden bisher vorwiegend in der oberen Halswirbelsäule (HWS) und im zervikothorakalen Übergang klinisch angewendet<sup>4,10,47,85,94,103</sup>. Beim siebten Halswirbelkörper (HWK) können Laminaschrauben sicher und verlässlich benutzt werden<sup>47</sup>.

Laminaschrauben bieten einen vergleichbaren Grad an Stabilität wie Pedikelschrauben<sup>49,62,94</sup>.

Bei laminären Schrauben werden in der Literatur keine einheitlichen Bezeichnungen verwendet. Des Öfteren werden die Begrifflichkeiten zwischen translaminär und intralaminär nicht getrennt, wobei mehrere Anwendungen von Schraubenplatzierungen unter Beteiligung der Lamina beschrieben sind. Deshalb wird im folgenden Abschnitt auf die Begrifflichkeiten näher eingegangen und die Anfänge der Laminaschrauben beschrieben.

**Translaminäre Schrauben (TLS)** Im Jahre 1959 beschrieb Boucher die spinale Osteosynthese mittels translaminärer Schrauben mit Extension in die Facettengelenke<sup>15</sup>. Die Segmentfixierung besteht darin, die Beweglichkeit der Facettengelenke mit Schrauben zu blockieren, die das Gelenk perforieren und durchdringen. 1984 überarbeitete Magerl diese Technik und die TLS wurden etabliert<sup>71</sup>. Seither wurden TLS für kurze Segmentfusionen für Spinalkanalstenosen und degenerative Erkrankungen in der lumbalen Wirbelsäule verwendet<sup>43</sup>. Das Prinzip dieser Technik umfasst die Segmentfixierung über die Facettengelenke, um die Fusion zu erleichtern<sup>43,71</sup>.

**Intralaminäre Schrauben (ILS)** Intralaminäre Schrauben (ILS) im Rahmen von atlantoaxialen Fixierungen in den Axis wurden durch Wright als Erstes beschrieben<sup>103,104</sup>. Operativ wird von der Gegenseite am Processus spinosus eine Schraube in den kontralateralen Bogen eingebracht<sup>19</sup>. Die Schraubenplatzierung erfolgt als zwei gekreuzt im Wirbelbogen verlaufende Schrauben bei intaktem Bogen. Der Processus spinosus muss einen ausreichend großen Durchmesser aufweisen, damit sich die Schrauben kreuzen können<sup>19</sup>. In der zervikalen Wirbelsäule wurden ILS zur HWK 1/HWK 2 Stabilisierung, zur okzipital-zervikalen Fusion und zur subaxialen spinalen Stabilisierung erfolgreich eingesetzt<sup>103</sup>. Dabei wurden ILS mit Massae laterales des Atlas kombiniert<sup>78,81</sup>. Bei den beschriebenen Techniken wird die Schraube in die Lamina inseriert, durchdringt aber nicht das Facettengelenk. Somit sind ILS von translaminären Schrauben abzugrenzen<sup>24,36,57,74</sup>. Bei der Pedikelfixation im HWS-Bereich muss die Schraubenplatzierung mit größter Vorsicht erfolgen, um die ventrale Wand des Pedikels nicht zu perforieren, da durch eine Perforation eine erhöhte Gefahr der Vertebralisverletzung besteht<sup>19</sup>. Die

## 1 Einleitung

---

vorliegende Literatur bietet Evidenz, dass das Verletzungsrisiko der Arteria (A.) vertebralis beim Einsatz von ILS vermindert ist<sup>81</sup>. Daher stellt die intralaminäre Technik eine akzeptierte Alternative im zervikalen Bereich bei Verlaufsanaomalien der Vertebralisarterie dar<sup>81</sup>. Die meisten der Beschreibungen von ILS betreffen den Bereich der zervikalen und oberen thorakalen Wirbelsäule<sup>57,68</sup>. Für die lumbale Wirbelsäule gibt es relativ wenig Berichte über Laminaschrauben<sup>15,43,57</sup>, die Mehrzahl der Studien beschreiben translaminäre Facettenschrauben. Systematische Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Osteosynthesetechnik im Bereich der LWS fehlen.

Die Möglichkeit des intraoperativen Wechsels auf ILS und eine Anwendbarkeit in Kombination mit bestehenden pedikelschraubenbasierten Fusionen stellen die Vorteile dieser Technik dar<sup>14</sup>. Die Osteosynthese durch Schrauben in die Laminae der Wirbelbögen wird in der Hals- und Brustwirbelsäule mit zunehmender Verbreitung eingesetzt, insbesondere in Fällen, in denen die Platzierung von Pedikelschrauben unmöglich oder schwierig ist (Salvage Procedure)<sup>32,47</sup>.

Die erfolgreiche Anwendung von ILS erfordert ein gutes Verständnis der Morphologie der Lamina und den anatomischen Variationen zur sicheren Platzierung. Die Wirbelkörperanatomie, die mechanischen Belastungen, die Bewegungsabläufe und damit zusammenhängend die unterschiedlichen Anforderungen an die mechanische Beschaffenheit von Osteosynthesematerialien unterscheiden sich je nach Wirbelsäulenabschnitt. Anatomische und morphologische Studien, die die Platzierbarkeit von ILS und die Anforderungen an die Implantate im Bereich der LWS systematisch untersuchen, fehlen bisher.

Weiterhin gibt es wenig Untersuchungen der Anwendbarkeit dieser Osteosynthesetechnik im Bereich der LWS, die die lumbale Lamina analysieren und dem Chirurgen eine korrekte intralaminäre Schraubenplatzierung vermitteln<sup>43,47,57</sup>. Durch anatomische-morphologische Kenntnisse könnte das Therapiespektrum durch ILS erweitert werden.

### 1.4 Fragestellung und Zielsetzung

Neue Operationsverfahren, Lockerungen von bestehenden Osteosynthesen (operative Stabilisierung von Instabilitäten und Frakturen) und eine veränderte physiologische und pathologische Anatomie der Wirbelsäule machen alternative Stabilisierungsverfahren notwendig. Die Osteosynthese durch Schrauben in die Lamina der Wirbelbögen wird an der HWS mit zunehmender Verbreitung eingesetzt. In der Literatur sind bisher systematische anatomische Untersuchungen an der HWS und BWS beschrieben<sup>82</sup>, jedoch fehlen Daten zur Anwendung von ILS im Bereich der LWS. Es gibt wenig Literatur, die die Morphologie der Lamina der lumbalen Wirbelsäule beschreibt und eine Leitlinie für die chirurgischen Handgriffe zur korrekten Platzierung von ILS

anbietet<sup>43, 57</sup>

Aus der Problembeschreibung ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Ist eine Platzierung von ILS zur Osteosynthese mit Schrauben-Stabkonstrukten an der LWS anatomisch möglich?
- Welche Durchmesser und Längen von ILS sind aufgrund der anatomischen Verhältnisse anwendbar?
- Wie stellen sich die anatomischen Gegebenheiten der einzelnen LWK bezüglich der Anwendbarkeit von ILS dar?

Dabei hat sich die Studie zum Ziel gesetzt, die anatomischen Merkmale anhand von Computertomographien einer repräsentativen Population für die Platzierung von ILS im Bereich der LWS zu beschreiben.

Die morphometrischen Daten der Laminae der LWS sollen mit der Pedikelanatomie als Referenz für die Schraubenplatzierung verglichen und bewertet werden.





# 2 Materialien

## 2.1 Patienten

Es wurden jeweils 50 Frauen und 50 Männer mit mitteleuropäischem Ursprung, nach in Tabelle (Tab.) 2.1. aufgeführten Kriterien, in diese Studie eingeschlossen (s. Tab. 2.1 auf Seite (S.) 11). Die Patienten wurden im Rahmen ihrer Behandlung mit einer Polytrauma-Computertomographie (CT) untersucht. Die Auswahl der Untersuchungen erfolgte zufällig und in anonymisierter Form aus Untersuchungen des Zeitraumes der Jahre 2010 - 2012 in Zusammenarbeit mit dem Institut für Diagnostische Radiologie und Neuroradiologie der Universität Greifswald.

**Tabelle 2.1:** Einschluss-und Ausschlusskriterien.

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Alter über 20 Jahre bis 60 Jahre	Alter unter 20 Jahre und über 60 Jahre
Zeitraum 2010 - 2012	Spondylolysen
	knöcherne Verletzungen der LWS
	angeborene Fehlbildungen der LWS
	numerische Aberrationen der LWS

## 2.2 Polytrauma-CT

Alle Untersuchungen der Polytrauma-CT wurden auf einem Siemens Sensation 16 Spiral-CT durchgeführt. Die aquirierte Schichtdicke betrug 2 mm. Mittels einer radiologischen dreidimensionalen Planungs- und Analysesoftware DICOM wurden die anatomischen Charakteristika der Wirbelkörper der LWS unter Berücksichtigung der Trajektorien für ILS der ausgewählten CT erhoben.

### 2.3 Kadaver

Zur Verifizierung der Methode wurden zehn Kadaver in Zusammenarbeit mit dem Institut für Zellbiologie und Anatomie der Universität Greifswald zur Verfügung gestellt. Die ausgewerteten und validierten Daten wurden von Jonas Müller durchgeführt und freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Die Anzahl der Kadaver war limitiert.

# 3 Methoden

## 3.1 Ethikantrag

Der Ethikantrag wurde bei der Ethikkommission der Universitätsmedizin Greifswald eingereicht und akzeptiert.

## 3.2 Intraobserver-Variabilität

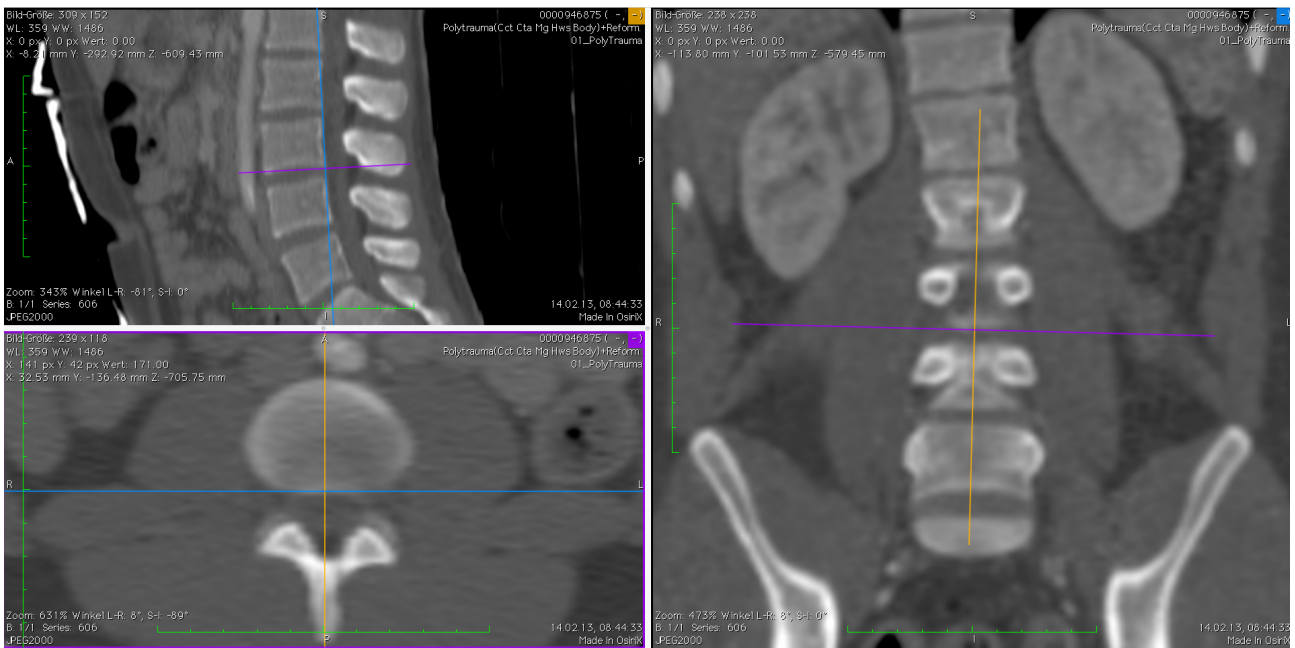
Zur Erfassung der Intraobserver-Variabilität wurden Messungen von einem Wirbelkörper bei zehn Computertomographien jeweils dreimal im zeitlichen Abstand von mindestens einem Tag wiederholt. Von den drei Wiederholungen wurden für die einzelnen Maße der Variationskoeffizient sowie die Varianz berechnet. Dabei wurden die Mittelwerte der Variationskoeffizienten und Varianzen gleichartiger Maße und beider Seiten für die Maße Winkel und äußere Durchmesser (ÄD) zusammengefasst.

## 3.3 Analyse

Die Analyse der Datensätze erfolgte mittels einer DICOM Software zur dreidimensionalen Rekonstruktion (multi planar reconstruction (MPR), OsiriX, OS X) von dem CT Datenset. Die Rekonstruktion wurde aus den sagittalen Schnittbildern der Wirbelsäule errechnet. Aus diesen wurden die anatomischen Maße der Laminae unter Berücksichtigung der Trajektorien für ILS erhoben. Die LWS musste dabei zunächst in 3 Ebenen rekonstruiert werden: in sagittaler, axialer und koronarer Ebene.

Als Referenz- und Grundeinstellung galten dabei die Hinterkante und Grundplatte und Mediansagittallinie jedes einzelnen Wirbels. Als Grundeinstellung wurde diese vor der jeweiligen Messung des Wirbelkörpers eingestellt. Ebenso fand die Mediansagittalebene des LWKs Beachtung und wurde bei jedem Wirbel erneut in der koronaren Ebene der LWS ausgerichtet (siehe (s.) Abbildung (Abb.) 3.1 auf S. 14).

### 3 Methoden



**Abbildung 3.1:** Zur Grundeinstellung als Ausgangspunkt für die Messung eines jeden Wirbels wurden in der Mediansagittalebene (oben links) die Axialebene (unten links) an der Grundplatte und die Koronarebene (rechts) an der Hinterkante des zu messenden Wirbels ausgerichtet.

## 3.4 Lamina

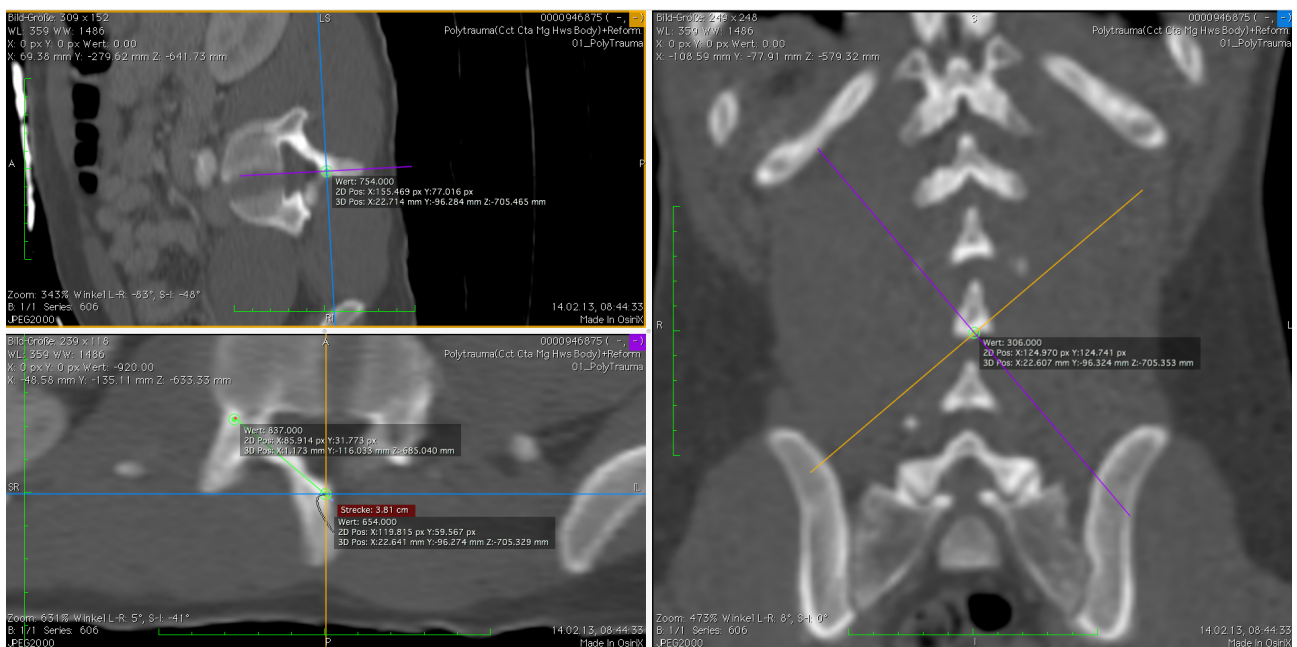
### 3.4.1 Laminalänge der LWK

Zur Messung der Länge der Laminae wurde aus der Grundeinstellung heraus die Koronarebene nach dorsal verschoben bis zum Schnittpunkt des Laminaachsenverlaufs mit der Mediansagittallinie. Aus dieser Einstellung heraus erfolgte die Rotation der Axialebene in jeweils beide Richtungen in den Laminaverlauf bis zur Darstellung der maximalen Länge und Breite der Laminae (s. Abb. 3.2 auf S. 15).

Die erste Messung erfasste bei der Längenmessung der Lamina die äußere Kortikalis am Dornfortsatz bis zur inneren Spongiosa in der maximalen Ausdehnung des Laminaverlaufs. Als weiteres Maß wurde die Dicke der Kortikalis im Achsenverlauf der Lamina erfasst. Somit wurde die maximale Länge der Lamina als Distanz zwischen dem Eingangspunkt und dem Endpunkt der ILS definiert (s. Abb. 3.2 auf S. 15).

Für den Punkt des Eintritts der Laminaschrauben galt der sagittale Mittelpunkt beim spinolaminären Übergang. Somit endete die Laminaschraube beim kortikalen Knochen, an der Kreuzung zwischen dem transversalen Prozess und dem Pedikel auf der kontralateralen Seite.

Nach der Längenmessung wurden die Endpunkte und Kreuzungspunkte mit der Mediansa-



**Abbildung 3.2:** Längenbestimmung der Lamina nach Verschiebung der Koronarebene in den Schnittpunkt der sich kreuzenden Laminaachsen im Dornfortsatz (unten links). Dann wurde die Sagittalebene rotiert und die Laminaachse eingestellt (links oben und unten). In dieser Einstellung erfolgte die Längenbestimmung der Lamina sowie die Bestimmung der Laminabreite (s. Abb. 3.3 auf S. 16).

gittallinie mit permanenten Markern versehen, die als Referenzpunkte für die spätere Winkelmessung galten (s. Abb. 3.2 auf S.15 ).

### 3.4.2 Laminabreite der LWK

In 90° zum Längenmaß in der Ebene des Laminaverlaufs wurde die Breite der gesamten Lamina (als Maß von Kortikalis bis Kortikalis) im anteroposterioren Durchmesser gemessen und mit Breite äußerer Durchmesser (Breite ÄD) bezeichnet (s. Abb. 3.3 auf S. 16). Dazu erfolgte die Breite der jeweiligen Lamina (als Maß von Spongiosa zur Spongiosa) an ihrer dünnsten Stelle (s. Abb. 3.4 auf S. 16) und wurde mit Breite innerer Durchmesser (Breite ID) deklariert. Somit konnte der kleinste Durchmesser der Lamina bestimmt werden.

### 3 Methoden

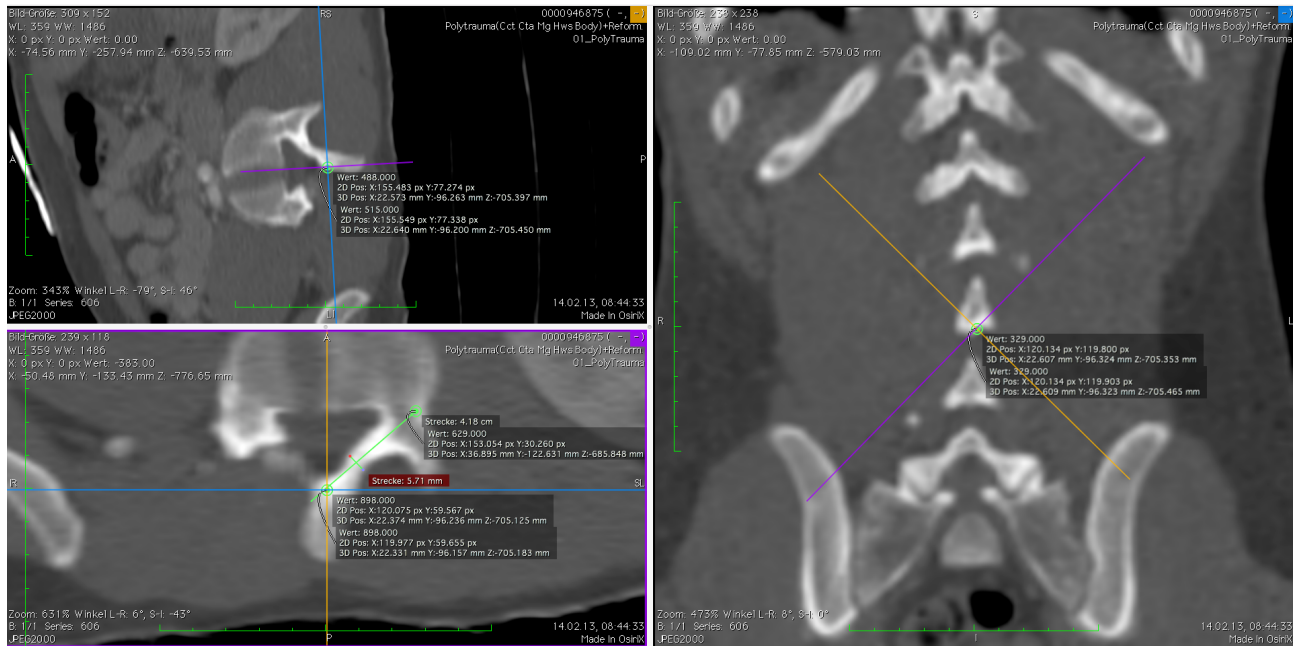


Abbildung 3.3: Bestimmung der äußeren Breite der Lamina (ÄD) (unten links).

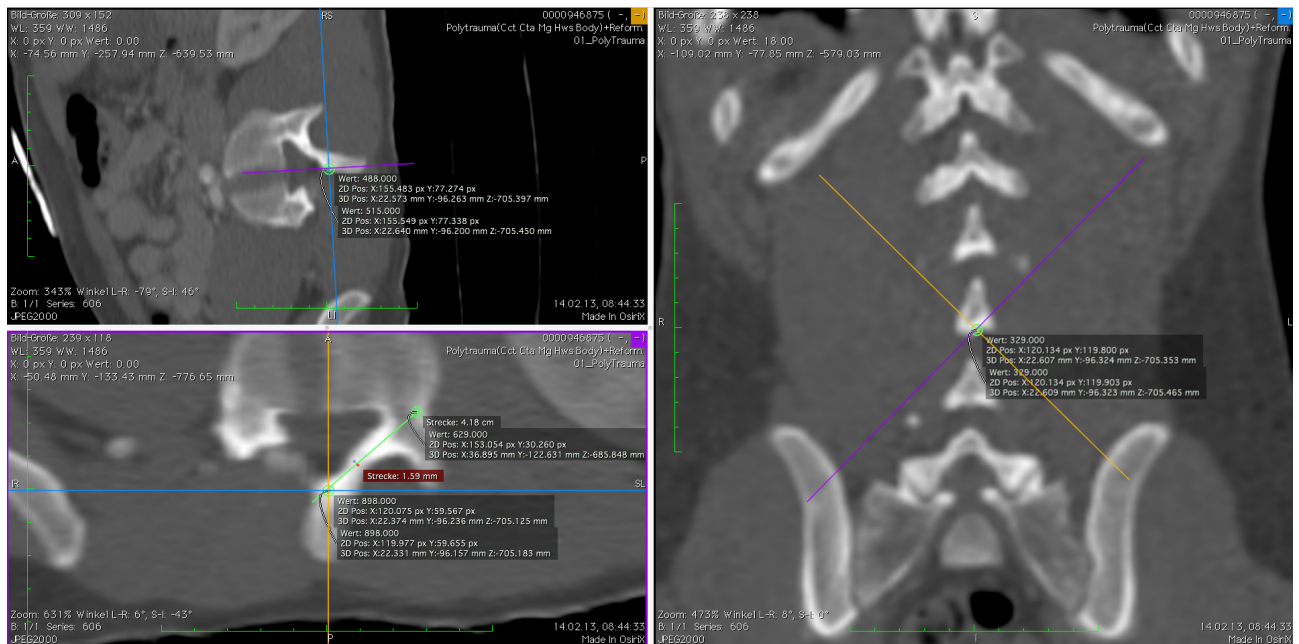
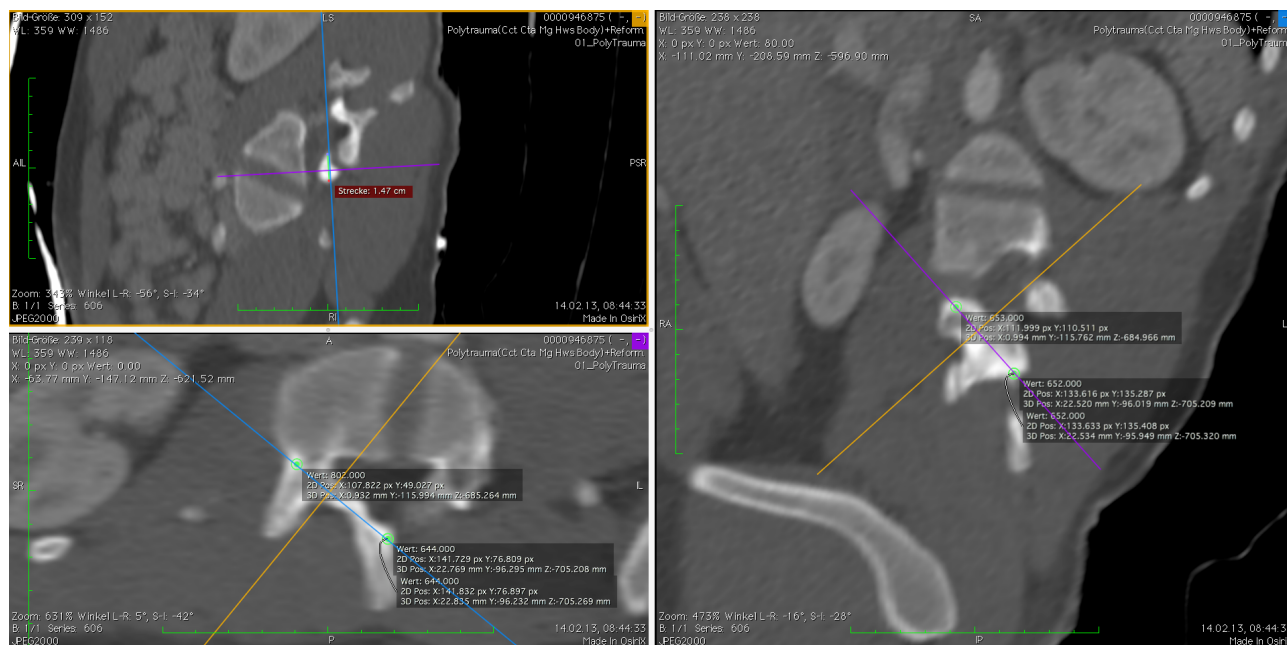


Abbildung 3.4: Bestimmung der inneren Breite der Lamina (ID) (unten links).

## 3.4.3 Laminahöhe der LWK

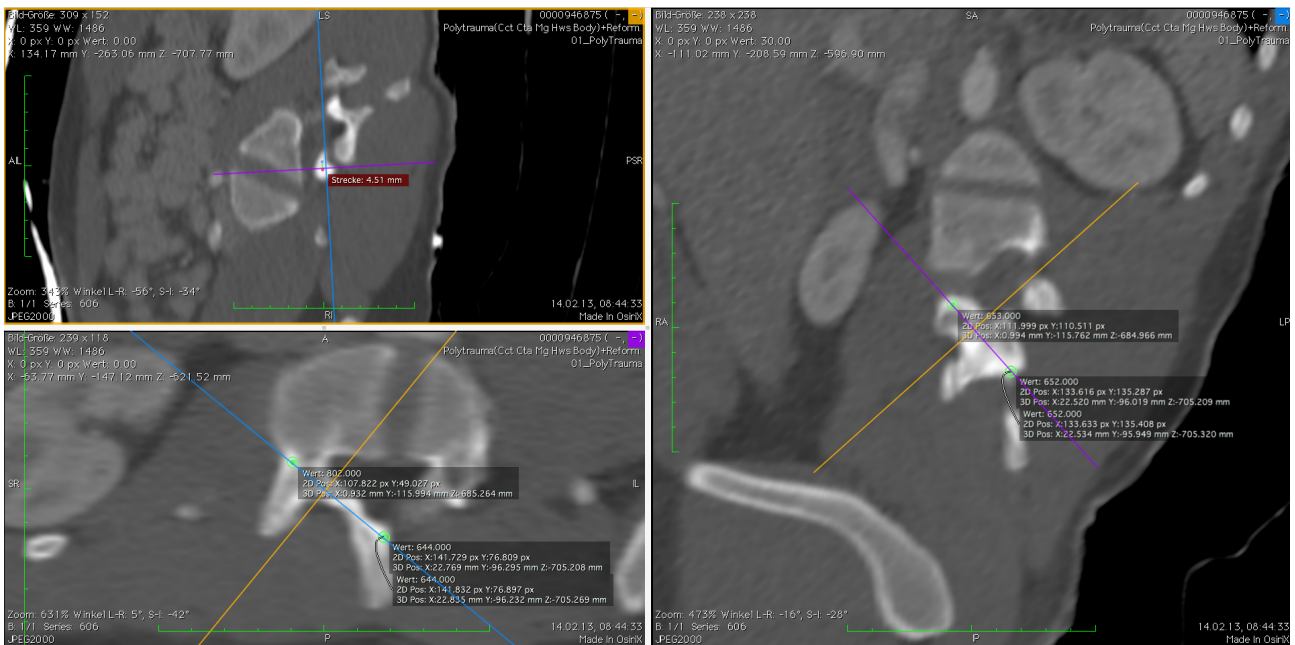


**Abbildung 3.5:** Zur Bestimmung der äußeren Höhe der Lamina (ÄD) wurde aus der bestehenden Einstellung zur Messung von Länge und Breite der Lamina die Sagittalebene nach lateral verschoben und die Einstellung der geringsten Ausdehnung der Laminahöhe (kraniokaudaler Durchmesser) in der Sagittalebene aufgesucht (oben links).

Zur Messung der Laminahöhe musste zunächst die Koronarebene in die Laminaachse gedreht werden. Durch Verschiebung der Koronarebene nach lateral fand nun die Durchsichtung der Lamina statt und die Schicht mit Darstellung der geringsten Höhe des kraniokaudalen Durchmessers wurde aufgesucht. In dieser Schicht wurde nun die Höhe der Lamina mit Ausdehnung Kortikalis bis Kortikalis (s. Abb. 3.5 auf S. 17) und von Spongiosa zur Spongiosa gemessen (s. Abb. 3.6 auf S. 18).



### 3 Methoden



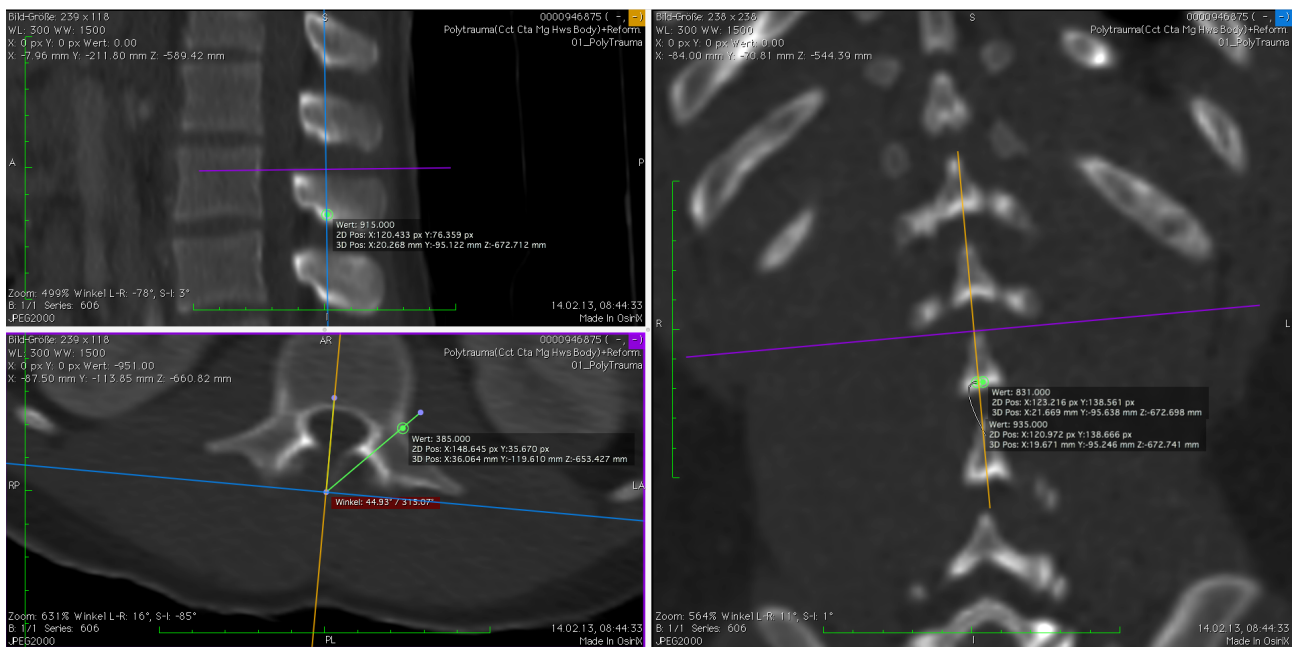
**Abbildung 3.6:** Die Bestimmung der inneren Höhe der Lamina (ID) als minimaler kraniokaudaler Durchmesser in der Sagittalebene der Laminaachse.

#### 3.4.4 Laminalage in Bezug zum Wirbelkörper

Neben der Größenbestimmung der Laminae sollte auch die räumliche Lage der Laminae erfasst werden. Hierfür diente die Bestimmung von Winkelmaßen, gemessen als Winkelverhältnis der Laminaachse zur Referenzeinstellung in der sagittalen und der axialen Ebene. Hierzu erfolgte die Verschiebung der Koronarebene aus der Grundeinstellung jeweils nach dorsal bis zur Kreuzung der Ebene mit den eingelegten Markern in den Schnittpunkten der Laminaachse mit der Mediansagittalebene. Von dieser Einstellung ausgehend wurde die Axialebene nach kranial verschoben bis zur Darstellung der zuvor gelegten Marker am Endpunkt der Laminaachsen in der Axialebene. Nun erfolgte eine Winkelmessung von der Mediansagittallinie zum Laminaachsenverlauf in der Axialebene (s. Abb. 3.7 auf S. 19). Somit definierte sich der Winkel in der Axialebene als Winkel zwischen einer Linie vom Anfang- und Endpunkt der ILS und der Mittellinie des korrespondierenden Wirbelkörpers (s. Abb. 3.7 auf S. 19).

Das zweite Winkelmaß war die Winkelung zum Wirbelkörper in der Sagittalebene. Hierzu wurde erneut aus der Grundeinstellung jeweils beidseits die Koronarebene nach dorsal verschoben bis zur Kreuzung der Ebene mit den eingelegten Markern in den Schnittpunkten der Laminaachse mit der Mediansagittalebene. Von dieser Einstellung ausgehend erfolgte die Verschiebung der Sagittalebene jeweils nach lateral bis zur Darstellung der zuvor gelegten Marker am Endpunkt der Laminaachsen in der Sagittalebene. Nun wurde eine Winkelmessung von der Koronarlinie zum Laminaachsenverlauf in der Sagittalebene durchgeführt (s. Abb. 3.8 auf S.

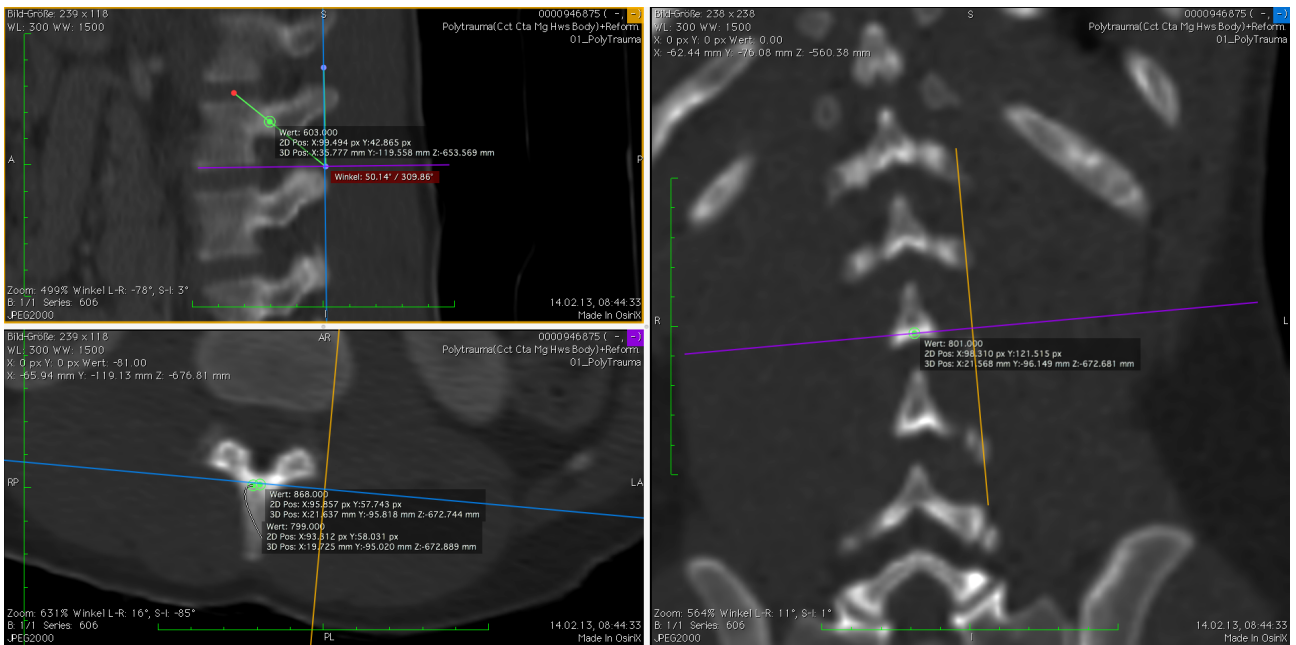




**Abbildung 3.7:** Winkelmessung in der axialen Ebene als Winkel des Laminaverlaufs zur Mediansagittalachse (unten links).

20). Somit definierte sich der Winkel in der Sagittalebene als der Winkel zwischen einer Linie vom Eintritt und Endpunkt der ILS und einer Linie parallel verlaufend zum posterioren Rand des Wirbelkörpers (s. Abb. 3.8 auf S. 20).

### 3 Methoden



**Abbildung 3.8:** Winkelmessung in der sagittalen Ebene als Winkel des Laminaverlaufs zur Hinterkante (oben links).

#### 3.4.5 Dornfortsatzhöhe am Schnittpunkt der Laminaachsen

Die sagittale Höhe am Schnittpunkt der Laminaachsen in der Mediansagittalebene wurde in der koronaren Ebene gemessen. Die Werte für die Dornfortsatzhöhe (von Kortikalis zur Kortikalis) (s. Abb. 3.9 auf S. 21) und ebenso die innere Höhe der Dornfortsätze (von Spongiosa zur Spongiosa) wurden dokumentiert (s. Abb. 3.10 auf S. 21). Somit konnte die Dornfortsatzhöhe am Schnittpunkt der jeweiligen Laminaachse bestimmt werden.

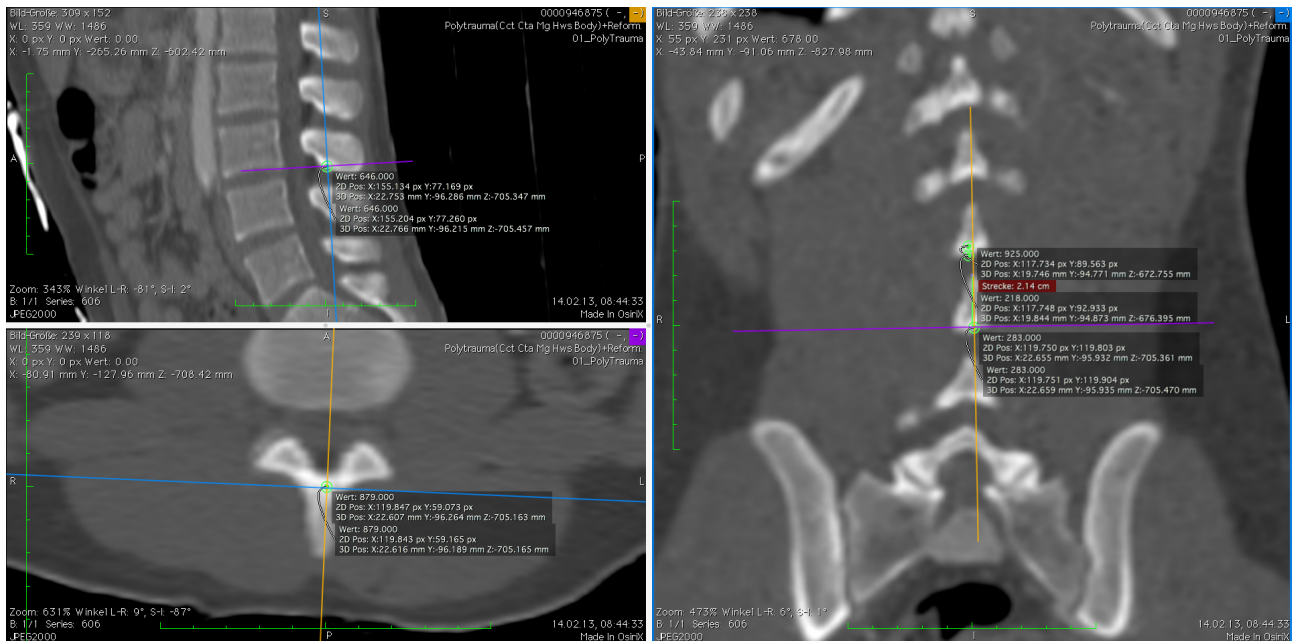


Abbildung 3.9: Äußere Höhe der Dornfortsätze (ÄD) am Schnittpunkt der Laminaachsen (rechts).

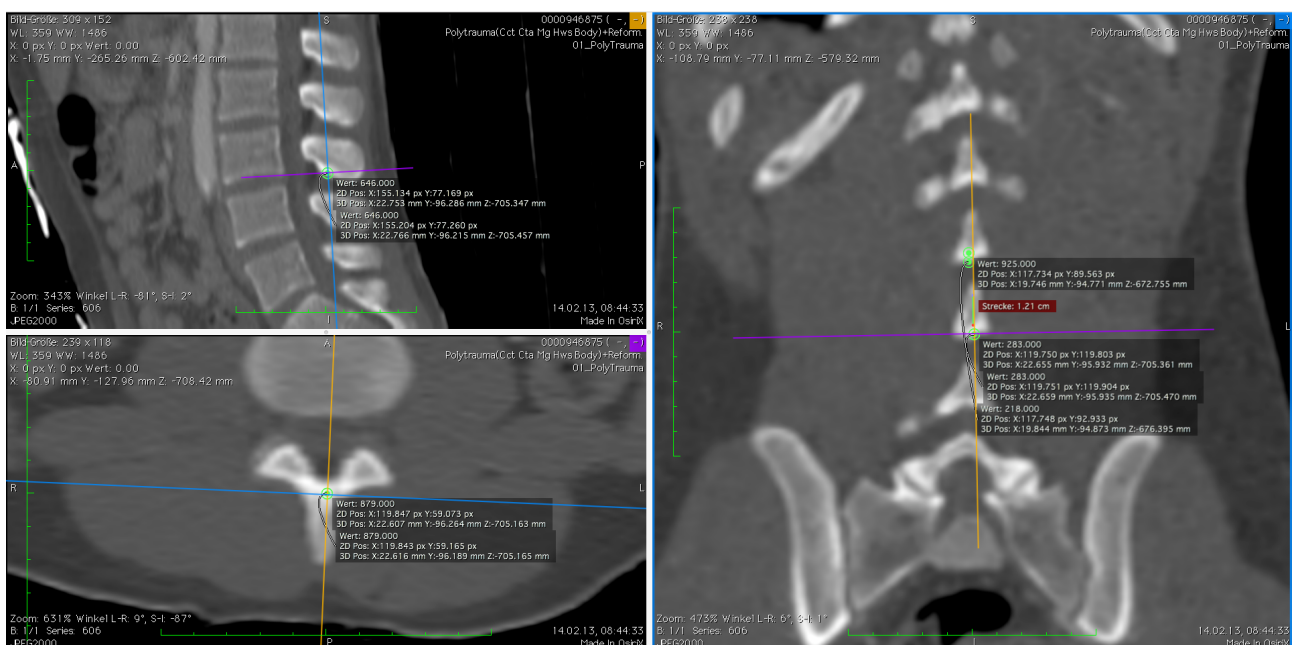
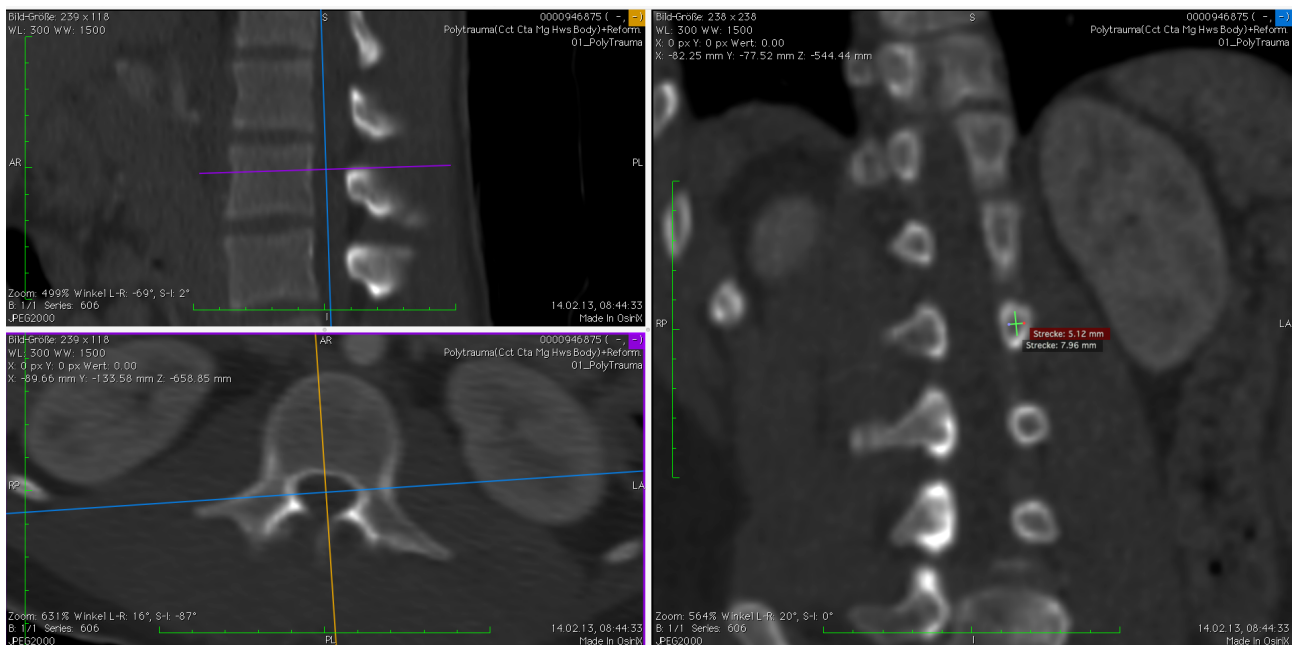


Abbildung 3.10: Innere Höhe der Dornfortsätze (ID) am Schnittpunkt der Laminaachsen (rechts).

## 3.5 Pedikel

### 3.5.1 Pedikelbreite und Pedikelhöhe

Zur Querschnittsmessung der Pedikel erfolgte die Verschiebung aus der Grundeinstellung zunächst in die Axialebene nach kranial bis zur Schnittebene des Pedikels in seiner maximalen Breite. Danach wurde die Koronarebene nach dorsal verschoben bis zur Mitte des Spinalkanals. Nun fand die Drehung der Koronarebene jeweils beidseits in die schmalste Stelle des Pedikels statt. Ziel dieser Einstellung war, den Pedikel in  $90^\circ$  zum Pedikelverlauf zu schneiden, um Verzerrungen der Messung zu vermeiden und um den minimalen Querschnitt des Pedikels abzubilden. Die Messung erfolgte durch die Mitte des Pedikels. Auf diese Weise konnte die Breite und Höhe des Pedikels jeweils von Kortikalis zur Kortikalis (ÄD) und von Spongiosa zur Spongiosa (ID) gemessen werden und der Durchmesser der korrespondierenden Pedikel am engsten Punkt zwischen dem äußeren Rand des kortikalen Knochens bestimmt werden (s. Abb. 3.11 auf S. 22).



**Abbildung 3.11:** Zur Bestimmung der Pedikelbreite und Pedikelhöhe wurde die Koronarebene in die Mitte des Spinalkanals nach dorsal verschoben und von dort in die Pedikelachse beider Seiten rotiert (unten links). Die Messung erfolgte in der Koronarebene (rechts).

### 3.5.2 Validität der Methode

Um die aus den dreidimensionalen rekonstruierten CT Daten hinsichtlich verfahrensbedingter Abweichungen von den tatsächlichen anatomischen Daten zu überprüfen, wurden zehn Kadaver in einem Computertomographen gescannt, um die Werte nach der genannten Methode zu bestimmen und mit den anatomisch gewonnenen Daten zu vergleichen. Diese Methode wurde durch Jonas Müller durchgeführt und zur Verfügung gestellt. Dafür wurden die Wirbelkörper präpariert und in Kalilauge mazeriert. Unter Verwendung eines digitalen Messschiebers (Mitutoyo, Serie 500, Messgenauigkeit 0,01 mm) wurden die Länge der Lamina, Breite und Höhe an der engsten Stelle der Lamina sowie die Höhe und Breite der entsprechenden Pedikel manuell bestimmt und mit den Werten verglichen, die bei der CT Rekonstruktion erhalten wurden und der systematische Fehler bestimmt.

## 3.6 Statistik

Die statistische Auswertung erfolgte mittels GraphPad PRISM Software Version 5.

### 3.6.1 Statistische Analyse

Für alle gemessenen Parameter wurde eine deskriptive Statistik berechnet. Angegeben sind Mittelwerte mit Standardabweichung (SA) sowie Minimal- und Maximalwert. Der Test auf Normalverteilung (NV) erfolgte mittels D'Agostino & Pearson omnibus normality test (n.s.: Nullhypothese wird angenommen,  $\alpha=0,05$ ).

Die Testung der linken versus (vs.) der rechten Daten erfolgte mittels gepaartem T-Test bei normalverteilten Daten und mittels Wilcoxon Vorzeichenrang-Test bei nichtparametrischen Daten. Das Signifikanzniveau wurde auf  $p < 0,05$  gesetzt.

Die Altersverteilung in der Studiengruppe zwischen weiblichen Probandinnen und männlichen Probanden wurde bei abgelehnter Normalverteilung mittels Kolmogorow-Smirnow-Test auf die Gleichheit der Wahrscheinlichkeitsverteilung getestet.

Die Korrelationsanalysen wurden mittels Pearson Test bei normalverteilten und mittels Spearman Test bei nichtnormalverteilten Daten getestet.

Somit wird auf die wiederholte statistische Auswertungserklärung bei den einzelnen Ergebnissen verzichtet.

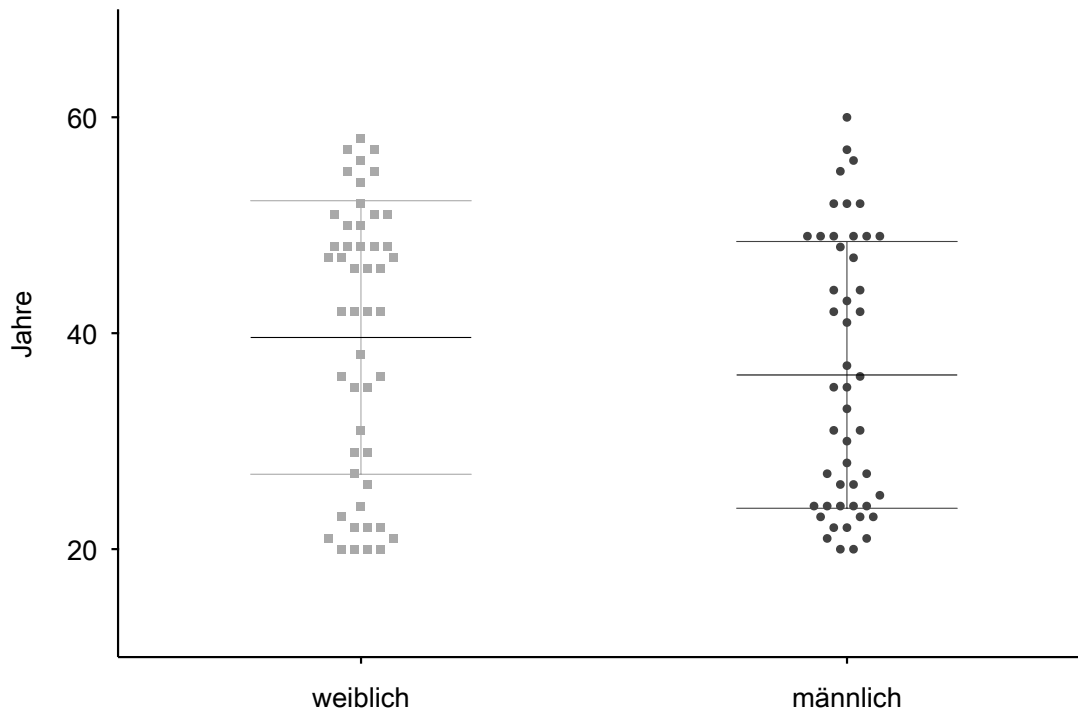


# 4 Ergebnisse

## 4.1 Studiengruppe

100 Computertomographien von 50 Männern und 50 Frauen wurden für die Querschnittsstudie nach den Ein- und Ausschlußkriterien ausgewählt (s. Abschnitt (Abs.) 2.1 auf S. 11). Das Durchschnittsalter der weiblichen Probandinnen lag bei 39,5 Jahren (Spanne 20 - 58 Jahre, (Standardabweichung (SA)) 12,77). Bei den männlichen Probanden betrug das Durchschnittsalter 36,1 Jahren (Spanne 20 - 60 Jahre, SA 12,48) (s. Abb. 4.1 auf S. 26).

Die Altersstruktur der Geschlechter wurde auf die Gleichheit der Wahrscheinlichkeitsverteilung getestet. Im Ergebnis wurde die Nullhypothese, die beiden Gruppen besitzen die gleiche Wahrscheinlichkeitsverteilung, angenommen.



**Abbildung 4.1:** Streudiagramm der Altersverteilung in Jahren von weiblichen Probandinnen und männlichen Probanden (jeweils  $n=50$ ). Die Linien zeigen den Mittelwert, sowie die SA an.

## 4.2 Intraobserver-Variabilität

Bei der Intraobserver-Variabilität ergab sich eine Abweichung von durchschnittlich 0,36 mm (Variationskoeffizient: 3,5%) bei den Messungen der äußeren Durchmesser (ÄD). Bei den Winkelmessungen ergaben sich  $1,07^\circ$  (Variationskoeffizient: 2,4%) Abweichungen. Bei allen Messwerten ergaben sich bei den Abweichungen keine Signifikanz.

## 4.3 Laminamaße

### 4.3.1 Laminalänge

Die Längen der Laminae nahmen von kranial nach kaudal zu (s. Abb. 4.2 auf S. 27).

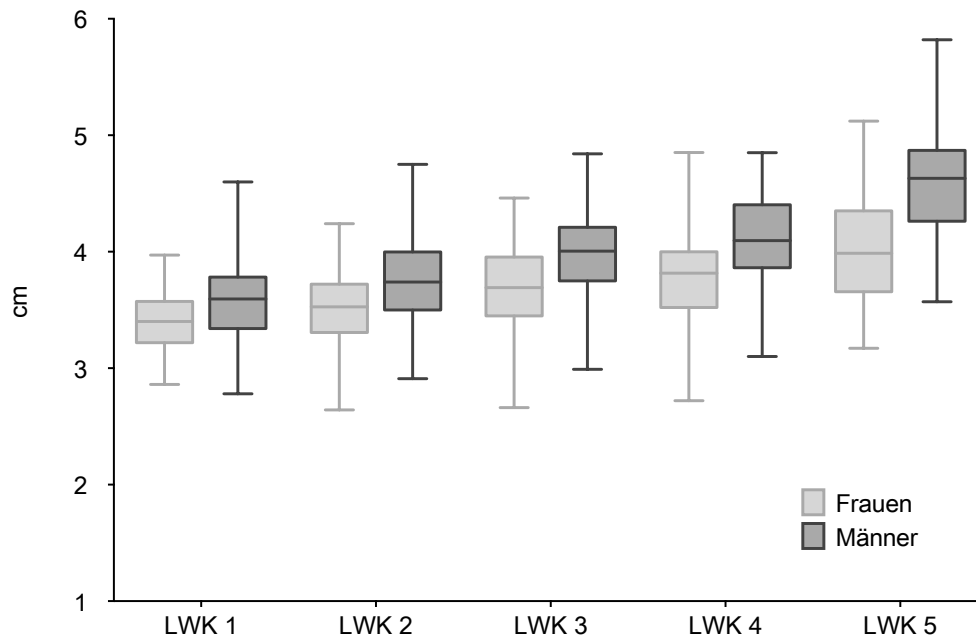
Die Testung zum Vergleich der Länge der Laminae rechts gegen links ergab bei beiden Geschlechtern keine systematischen Seitendifferenzen (s. Tab. 4.1 auf S. 29 und s. Tab. 4.2 auf S. 30). Bei beiden Geschlechtern im Durchschnitt wurde die minimale Laminalänge bei LWK 1 und die maximale Laminalänge bei LWK 5 gemessen.

Bei den weiblichen Probandinnen betrug der Mittelwert der Länge der Lamina im Durchschnitt



bei LWK 1 34 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 29 - 40 mm) und bei LWK 5 40 mm ( $\pm 4$  mm SA, Spanne 32 - 51 mm) (s. Tab. 4.5 auf S. 42).

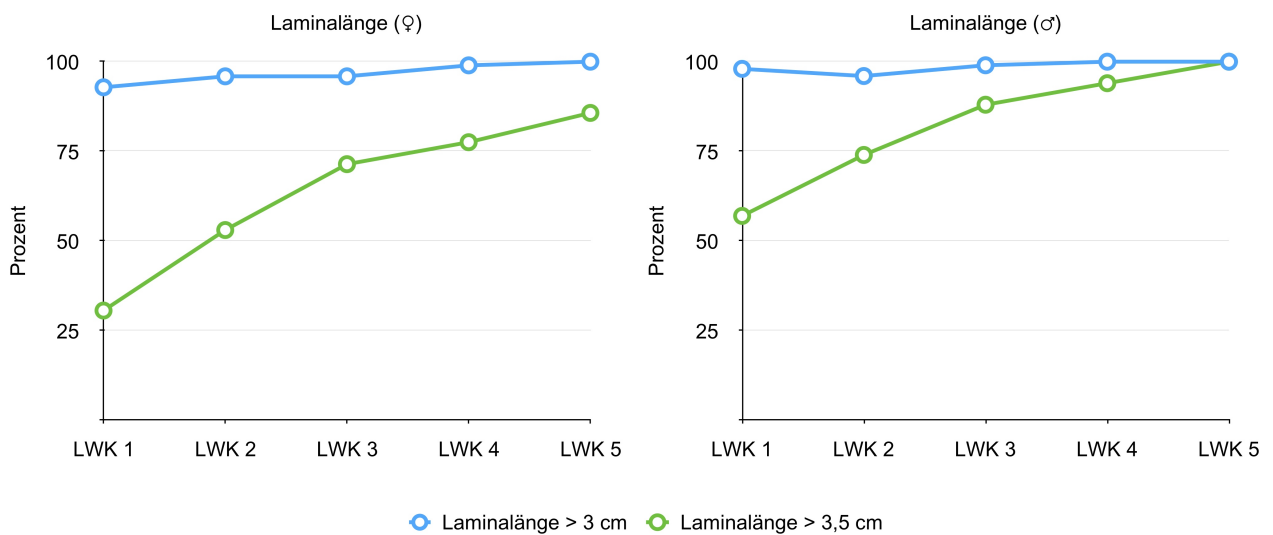
Bei den männlichen Probanden reichte die Länge der Lamina im Mittel bei LWK 1 von 36 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 28 - 46 mm) bis 46 mm ( $\pm 5$  mm SA, Spanne 36 - 58 mm) bei LWK 5 (s. Tab. 4.6 auf S. 44). Die Mindestlänge  $>3$  cm erfüllten alle LWK bei beiden Geschlechtern (s. Abb. 4.3 auf S. 28).



**Abbildung 4.2:** Länge der Laminae in Zentimeter (cm) für LWK 1 bis LWK 5, gemessen als Distanz zwischen der äußeren Kortikalis am Dornfortsatz bis zur inneren Kortikalis am Übergang der Pars interarticularis zum Pedikel. Die Daten sind separiert nach Geschlecht. Jeweils  $n=100$ , bei Zusammenfassung der Messungen beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.

## 4 Ergebnisse

---



**Abbildung 4.3:** Anteil der Laminae von LWK 1 bis LWK 5 in %, deren Längen >3 cm bzw. >3,5 cm erreichen. Als Laminalänge wurde die Distanz zwischen der äußeren Kortikalis am Dornfortsatz bis zur inneren Kortikalis am Übergang der Pars interarticularis zum Pedikel gewertet. Die Daten sind separiert nach Geschlecht. Jeweils n=100, bei Zusammenfassung der Messungen beider Seiten.

**Tabelle 4.1:** Laminamaße und deskriptive Statistik der weiblichen Probandinnen. Maße sind angegeben in cm. Test auf Normalverteilung (NV): D' Agostino & Pearson omnibus normality test (n.s.: Nullhypothese wird angenommen,  $\alpha=0,05$ ), Test rechts vs. links: paired-T Test (parametrisch), Wilcoxon matched-pairs signed rank test (nichtparametrisch). SA: Standardabweichung. n = 50.

	rechts				links					
	Parameter	Mittelwert	SA	Spanne	NV	Mittelwert	SA	Spanne	NV	p Wert
LWK 1	Länge	3,38	0,27	2,86 - 3,97	n. s.	3,43	0,27	2,96 - 3,96	n. s.	n. s.
	Breite ID	0,25	0,07	0,11 - 0,42	n.s.	0,23	0,05	0,13 - 0,33	n. s.	n. s.
	Breite ÄD	0,60	0,11	0,37 - 0,86	n. s.	0,61	0,10	0,39 - 0,90	n. s.	n. s.
	Höhe ÄD	1,11	0,17	0,79 - 1,54	n. s.	1,14	0,20	0,70 - 1,57	n. s.	n. s.
	Höhe ID	0,39	0,10	0,22 - 0,62	n. s.	0,41	0,10	0,16 - 0,59	n. s.	n. s.
LWK 2	Länge	3,50	0,30	2,64 - 4,24	n. s.	3,57	0,28	3,01 - 4,15	n. s.	n. s.
	Breite ID	0,24	0,08	0,12 - 0,56	<0.0001	0,23	0,07	0,12 - 0,51	<0.0001	n. s. <sup>2</sup>
	Breite ÄD	0,61	0,10	0,19 - 0,74	<0.0001	0,60	0,10	0,27 - 0,91	0,0287	n. s. <sup>2</sup>
	Höhe ÄD	1,21	0,19	0,80 - 1,61	n. s.	1,27	0,22	0,85 - 1,72	n. s.	0,0079
	Höhe ID	0,44	0,19	0,18 - 1,42	<0.0001	0,48	0,22	0,22 - 1,7	<0.0001	0,0355 <sup>2</sup>
LWK 3	Länge	3,65	0,37	2,66 - 4,39	n. s.	3,75	0,46	3,25 - 4,46	n. s.	n. s.
	Breite ID	0,24	0,07	0,13 - 0,52	<0.0001	0,25	0,08	0,11 - 0,43	n. s.	n. s. <sup>2</sup>
	Breite ÄD	0,62	0,16	0,25 - 1,24	0,0002	0,61	0,13	0,10 - 0,94	0,0002	n. s. <sup>2</sup>
	Höhe ÄD	1,32	0,24	0,93 - 1,88	n. s.	1,33	0,27	0,15 - 1,88	<0.0001	n. s. <sup>2</sup>
	Höhe ID	0,45	0,16	0,25 - 1,17	<0.0001	0,45	0,16	0,18 - 1,21	<0.0001	n. s. <sup>2</sup>
LWK 4	Länge	3,73	0,39	2,72 - 4,59	n. s.	3,85	0,34	3,23 - 4,85	n. s.	0,0004
	Breite ID	0,23	0,07	0,13 - 0,40	n. s.	0,22	0,08	0,08 - 0,37	n. s.	n. s.
	Breite ÄD	0,59	0,11	0,38 - 0,88	n. s.	0,59	0,15	0,27 - 0,98	n. s.	n. s.
	Höhe ÄD	1,37	0,22	0,87 - 1,84	<0.0001	1,76	0,25	1,22 - 2,43	<0.0001	0,009 <sup>2</sup>
	Höhe ID	0,47	0,15	0,24 - 1,09	n. s.	0,47	0,20	0,17 - 1,31	<0.0001	n. s. <sup>2</sup>

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 4.1: Fortsetzung Laminamaße der weiblichen Probandinnen.

weiblich	rechts			links			p Wert			
	Parameter	Mittelwert	SA	Spanne	NV	Mittelwert		SA	Spanne	NV
LWK 5	Länge	4,01	0,42	3,17 - 4,82	n. s.	4,01	0,43	3,30 - 5,12	n. s.	n. s.
	Breite ID	0,22	0,08	0,11 - 0,44	n. s.	0,20	0,09	0,08 - 0,45	0,0165	n. s. <sup>2</sup>
	Breite ÄD	0,56	0,17	0,22 - 1,04	n. s.	0,54	0,16	0,18 - 0,84	n. s.	n. s.
	Höhe ÄD	1,41	0,25	0,97 - 2,04	n. s.	1,45	0,24	0,92 - 2,05	n. s.	n. s.
	Höhe ID	0,48	0,19	0,13 - 0,95	n. s.	0,55	0,23	0,24 - 1,33	<0,0001	0,0074 <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Wilcoxon signed rank non-parametric test

**Tabelle 4.2:** Laminamaße und deskriptive Statistik der männlichen Probanden. Maße sind angegeben in cm. Test auf Normalverteilung (NV): D'Agostino & Pearson omnibus normality test (n.s.: Nullhypothese wird angenommen,  $\alpha=0,05$ ), Test rechts vs. links: paired-T Test (parametrisch), Wilcoxon matched-pairs signed rank test (nichtparametrisch). SA: Standardabweichung, n = 50.

männlich	rechts			links			p Wert			
	Parameter	Mittelwert	SA	Spanne	NV	Mittelwert		SA	Spanne	NV
LWK 1	Länge	3,60	0,30	3,11 - 4,30	n. s.	3,59	0,37	2,78 - 4,60	n. s.	n. s.
	Breite ID	0,24	0,07	0,10 - 0,40	n. s.	0,27	0,07	0,10 - 0,43	n. s.	0,0328
	Breite ÄD	0,64	0,13	0,30 - 1,02	n. s.	0,67	0,12	0,37 - 0,99	n. s.	n. s.
	Höhe ÄD	1,20	0,22	0,71 - 1,33	n. s.	1,22	0,20	0,68 - 1,59	n. s.	n. s.
	Höhe ID	0,44	0,14	0,17 - 0,84	n. s.	0,47	0,12	0,23 - 0,95	n. s.	0,0318 <sup>2</sup>
LWK 2	Länge	3,75	0,37	3,00 - 4,70	0,0002	3,77	0,38	2,91 - 4,75	<0,0001	n. s. <sup>2</sup>
	Breite ID	0,28	0,11	0,11 - 0,80	<0,0001	0,29	0,09	0,15 - 0,59	0,0023	n. s. <sup>2</sup>
	Breite ÄD	0,66	0,13	0,24 - 0,99	n. s.	0,71	0,14	0,23 - 0,91	0,0017	0,0210 <sup>2</sup>
	Höhe ÄD	1,28	0,24	0,33 - 1,69	0,0003	1,34	0,26	0,16 - 1,89	<0,0001	0,0114 <sup>2</sup>
	Höhe ID	0,47	0,18	0,16 - 1,22	<0,0001	0,48	0,19	0,11 - 1,07	0,0001	n. s. <sup>2</sup>

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 4.2: Fortsetzung Laminamaße der männlichen Probanden.

männlich	rechts				links				p Wert	
	Parameter	Mittelwert	SA	Spanne	NV	Mittelwert	SA	Spanne		NV
LWK 3	Länge	3,93	0,36	3,13 - 4,71	n. s.	4,01	0,38	2,99 - 4,84	n. s.	n. s.
	Breite ID	0,24	0,09	0,03 - 0,45	n. s.	0,26	0,09	0,10 - 0,51	0,0133	n. s. <sup>2</sup>
	Breite ÄD	0,66	0,12	0,42 - 0,91	n. s.	0,69	0,14	0,48 - 0,97	n. s.	n. s.
	Höhe ÄD	1,44	0,20	1,06 - 1,92	n. s.	1,45	0,22	1,04 - 1,92	n. s.	n. s.
	Höhe ID	0,53	0,15	0,27 - 0,98	n. s.	0,52	0,13	0,30 - 0,84	n. s.	n. s.
LWK 4	Länge	4,12	0,38	3,10 - 4,77	n. s.	4,13	0,37	3,31 - 4,85	n. s.	n. s.
	Breite ID	0,24	0,09	0,08 - 0,48	0,0343	0,27	0,08	0,06 - 0,42	n. s.	0,0132
	Breite ÄD	0,65	0,12	0,43 - 0,93	n. s.	0,68	0,13	0,36 - 0,92	n. s.	0,0341 <sup>2</sup>
	Höhe ÄD	1,50	0,27	1,07 - 2,38	0,0022	1,54	0,26	0,95 - 2,29	0,0143	n. s. <sup>2</sup>
	Höhe ID	0,52	0,16	0,20 - 0,93	n. s.	0,54	0,20	0,20 - 1,14	0,0166	n. s. <sup>2</sup>
LWK 5	Länge	4,59	0,48	3,65 - 5,82	n. s.	4,58	0,45	3,57 - 5,64	n. s.	n. s.
	Breite ID	0,25	0,09	0,04 - 0,55	0,0036	0,26	0,10	0,01 - 0,51	n. s.	n. s. <sup>2</sup>
	Breite ÄD	0,64	0,14	0,37 - 1,08	n. s.	0,66	0,16	0,36 - 1,03	n. s.	n. s.
	Höhe ÄD	1,72	0,38	1,09 - 2,67	n. s.	1,67	0,29	1,22 - 2,36	n. s.	n. s.
	Höhe ID	0,70	0,25	0,35 - 1,38	n. s.	0,69	0,26	0,29 - 1,68	<0,0001	n. s. <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Wilcoxon signed rank non-parametric test

### 4.3.2 Laminadurchmesser

Die Messung der Laminadurchmesser erfolgte in 2 Ebenen als Breite und Höhe wie in Unterabschnitt (Unterabs.) 3.4.2 auf S. 15 beschrieben. Als Breite der Lamina wurde der anteroposteriore Durchmesser definiert und als Höhe der kraniokaudale Durchmesser. Die Bestimmung erfolgte als innerer (ID) und äußerer Durchmesser (ÄD) unter Erfassung bzw. Auslassung der Kortikalis.

#### 4.3.2.1 Breite der Lamina

Bei der Breite der Laminae zeigte sich sowohl beim ID als auch beim ÄD keine abstrahierbare Veränderung von LWK 1 nach LWK 5 (s. Abb. 4.4 auf S. 33 und Abb. 4.5 auf S. 34).

Der ÄD der Laminabreite reichte bei den weiblichen Probandinnen von im Minimum 2 mm (LWK 2, LWK 3) bis zu einem Maximum von 12 mm (LWK 3) (s. Tab. 4.5 auf S. 42). Der Durchschnitt des äußeren Durchmessers der Laminabreite bei den Frauen lag bei 6 mm bei allen Lendenwirbelkörpern (s. Tab. 4.5 auf S. 42). Der ID der Laminabreite der weiblichen Probandinnen reichte von 1 mm bei LWK 4 ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 1-4 mm) und ebenso bei LWK 5 ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 1-5 mm) bis zu einem Maximum von 5 mm ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 1-5 mm) bei LWK 2. Im Durchschnitt betrug die innere Laminabreite zwischen 2 mm ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 1-5 mm) bei LWK 5 und 3 mm ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 1 - 12 mm) bei LWK 3 (s. Tab. 4.5 auf S. 42).

Bei den männlichen Probanden reichte der ÄD der Laminabreite von einem Minimum von 2 mm ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 2 - 10 mm) bei LWK 2 bis maximal 11 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 4 - 11 mm) bei LWK 5. Die Mittelwerte der ÄD der Laminae bei den Männern lagen bei allen Lendenwirbelkörpern bei 7 mm (s. Tab. 4.6 auf S. 44). Der ID reichte von minimal 0,1 mm ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 0,1 - 6 mm) bei LWK 5 bis zu einem Maximum von 8 mm ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 1 - 8 mm) bei LWK 2. Im Mittel betrug der ID der Laminae bei allen Lendenwirbelkörpern 3 mm (s. Tab. 4.6 auf S. 44).

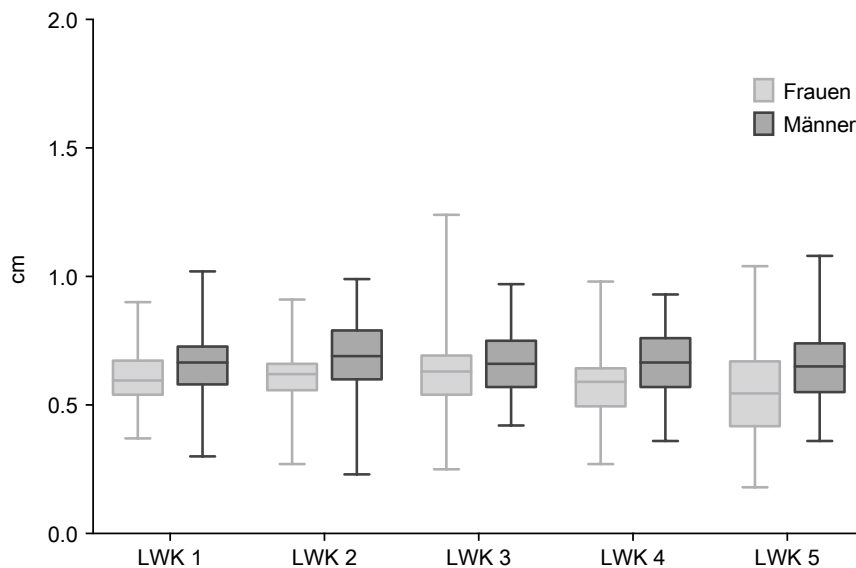
#### 4.3.2.2 Höhe der Lamina

Bei der Höhe der Laminae zeigte sich sowohl beim ÄD als auch beim ID bei beiden Geschlechtern eine Größenzunahme von LWK 1 nach LWK 5 (s. Abb. 4.6 auf S. 34 und Abb. 4.7 auf S. 35).

Der ÄD der Laminahöhe reichte bei den weiblichen Probandinnen von im Minimum 7 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 7 - 16 mm ) bei LWK 1 bis zu einem Maximum von 25 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 9 - 25 mm ) bei LWK 4. Der Durchschnitt des ÄD der Laminahöhe bei den Frauen lag zwischen 11 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 7 - 16 mm ) bei LWK 1 und 14 mm bei LWK 4 ( $\pm 3$  mm

SA, Spanne 9 - 25 mm ) und ebenso 14 mm bei LWK 5 ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 9 - 21 mm). Der ID der Laminahöhe der weiblichen Probandinnen reichte von 1 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 1 - 13 mm) bei LWK 5 bis 13 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 2 - 13 mm) bei LWK 4. Im Durchschnitt betrug der ID zwischen 4 mm ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 2 - 6 mm) bei LWK 1 und 5 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 1 - 13 mm) bei LWK 5 (s. Tab. 4.5 auf S. 42).

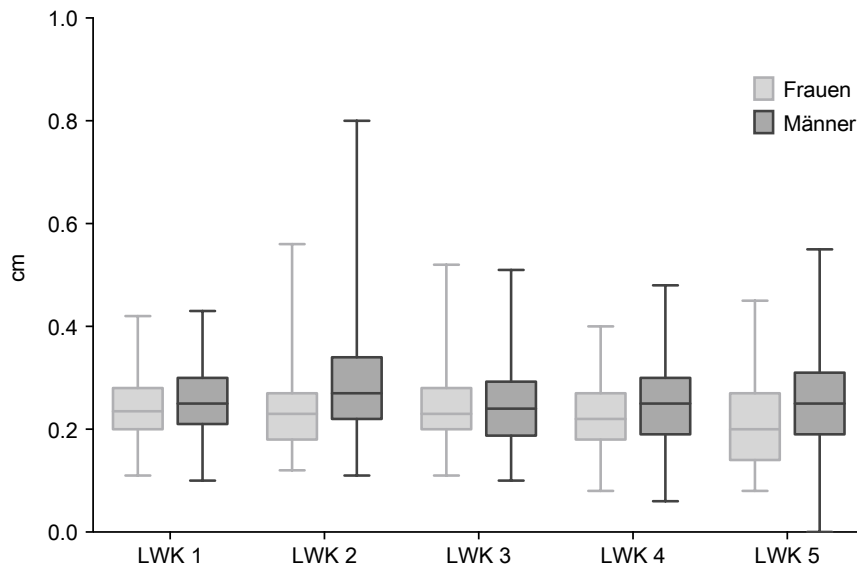
Bei den männlichen Probanden reichte der ÄD von einem Minimum von 7 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 7 - 17 mm) bei LWK 1 bis maximal 27 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 10 - 27 mm) bei LWK 5 (s. Tab. 4.2 auf S. 30). Die Mittelwerte des ÄD der Laminahöhe bei den Männern lagen zwischen 12 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 7-17 ) bei LWK 1 und 17 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 11-27 mm) bei LWK 5. Der ID der Laminahöhe reichte von minimal 1 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 1 - 11 mm) bei LWK 2 bis zu einem Maximum von 17 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 3 - 17 mm) bei LWK 5. Im Mittel lag der ID der Laminahöhe bei den Männern zwischen 5 mm ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 2 - 10 mm) bei LWK 1 und 7 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 3 - 17 mm) bei LWK 5 (s. Tab. 4.6 auf S. 44).



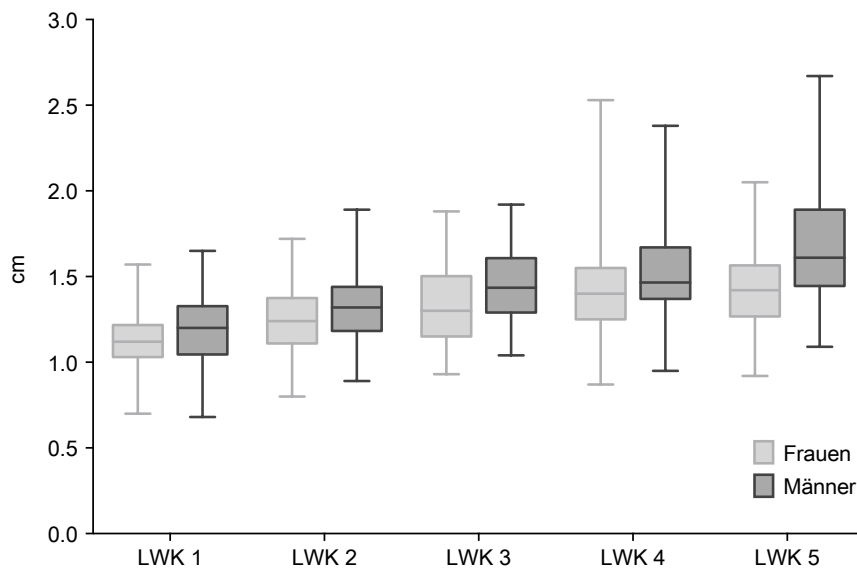
**Abbildung 4.4:** Äußerer Durchmesser der Laminabreite in cm als minimaler anteroposteriorer Durchmesser von äußerer Kortikalis zu äußerer Kortikalis, gemessen im eingestellten Querschnitt der Lamina für LWK 1 bis LWK 5 beidseits. Die Daten sind separiert nach Geschlecht. Jeweils  $n=100$ , bei Zusammenfassung der Messungen beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.

## 4 Ergebnisse

---

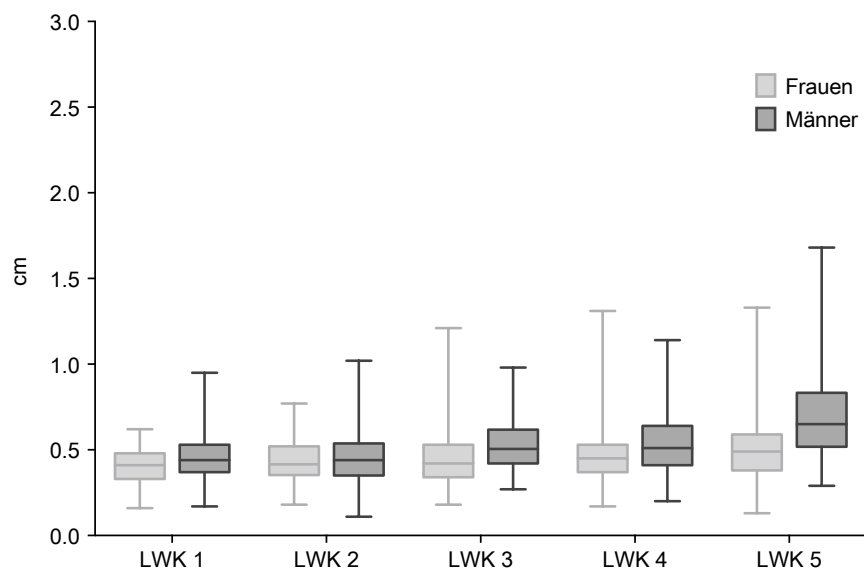


**Abbildung 4.5:** Innerer Durchmesser der Laminabreite in cm als minimaler anteroposteriorer Durchmesser von innerer Kortikalis zu innerer Kortikalis, gemessen im eingestellten Querschnitt der Lamina für LWK 1 bis LWK 5 beidseits. Die Daten sind separiert nach Geschlecht. Jeweils  $n=100$ , bei Zusammenfassung der Messungen beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.



**Abbildung 4.6:** Äußerer Durchmesser der Laminahöhe in cm als minimaler kraniokaudaler Durchmesser von äußerer Kortikalis zu äußerer Kortikalis, gemessen im eingestellten Querschnitt der Lamina für LWK 1 bis LWK 5 beidseits. Die Daten sind separiert nach Geschlecht. Jeweils  $n=100$ , bei Zusammenfassung der Messungen beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.





**Abbildung 4.7:** Innerer Durchmesser der Laminahöhe in cm als minimaler kraniokaudaler Durchmesser von innerer Kortikalis zu innerer Kortikalis, gemessen im eingestellten Querschnitt der Lamina für LWK 1 bis LWK 5 beidseits. Die Daten sind separiert nach Geschlecht. Jeweils  $n=100$ , bei Zusammenfassung der Messungen beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.

### 4.3.3 Räumliche Lage der Laminae im Verhältnis zum Wirbelkorporus

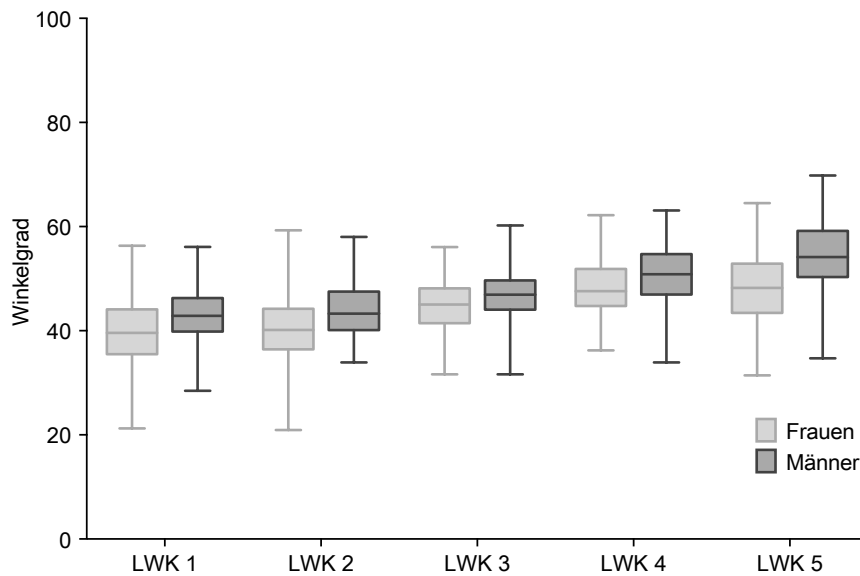
Die Winkelverhältnisse der Laminae in Bezug zum Wirbelkorporus waren durch zwei Winkelmaße gegeben. Zum einen der Winkel der Lamina zur Grundplatte des Wirbelkörpers als sagittaler Winkel. Zum anderen der Winkel der Lamina zur Medianlinie in der Transversalebene als axialer Winkel (s. Unterabschnitt 3.4.4 auf S.18).

#### 4.3.3.1 Sagittaler Winkel

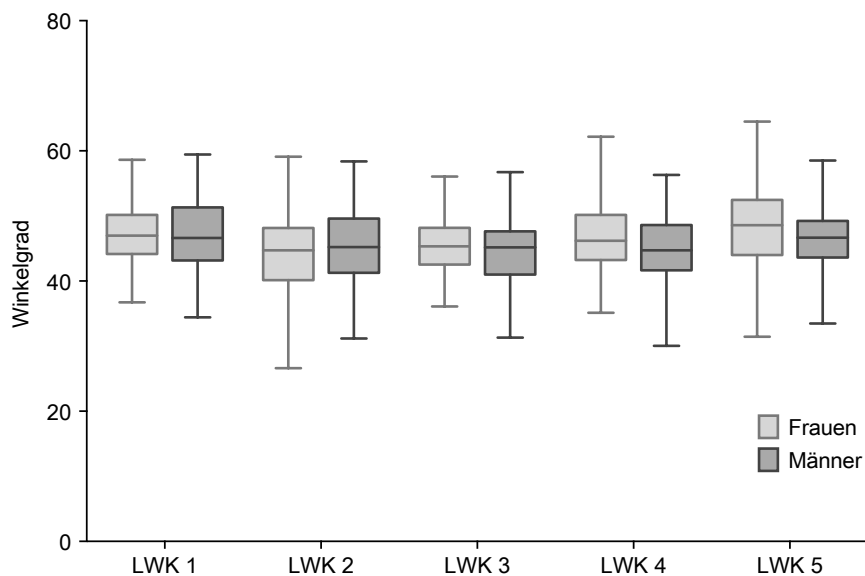
Von LWK 1 bis LWK 5 nahm der sagittale Winkel bei beiden Geschlechtern zu (s. Abb. 4.8 auf S. 37). Der minimale sagittale Winkel trat bei LWK 2 bei den Frauen mit  $20,92^\circ (\pm 6,06)$  auf und der maximalste sagittale Winkel bei LWK 5 mit  $64,51^\circ (\pm 7,14 \text{ SA})$  (s. Tab. 4.5 auf S. 42). Bei den Männern zeigte sich eine Spanne von  $28,47^\circ (\pm 5,20 \text{ SA})$  bei LWK 1 bis zu  $69,80^\circ (\pm 6,58 \text{ SA})$  bei LWK 5 (s. Tab. 4.6 auf S. 44). Der sagittale Winkel bei LWK 1 betrug im Mittel  $39,74^\circ (\pm 7,27 \text{ SA})$  bei den weiblichen Probandinnen und bei den männlichen Probanden bei LWK 1  $43,16^\circ (\pm 5,20 \text{ SA})$ . Die Winkelgrade nehmen bei beiden Geschlechtern kraniokaudal im Mittel bis auf  $48,17^\circ (\pm 7,14 \text{ SA})$  bei LWK 5 bei den Frauen und bei den Männern bis auf  $54,43^\circ (\pm 6,58 \text{ SA})$  bei LWK 5 zu (s. Tab. 4.5 auf S. 42 und Tab. 4.6 auf S. 44).

#### 4.3.3.2 Axialer Winkel

Der axiale Winkel nahm von LWK 1 bis zu LWK 3 bei beiden Geschlechtern ab und stieg danach bis LWK 5 an (s. Abb. 4.9 auf S. 37). Bei den männlichen Probanden lag bei LWK 1 die Lamina zur Mediansagittalachse bei  $46,93^\circ (\pm 5,76 \text{ SA})$  im Mittel gewinkelt und bei den weiblichen Probandinnen bei  $47,32^\circ (\pm 5,29 \text{ SA})$ . Die axialen Winkel nehmen bei beiden Geschlechtern im Durchschnitt bis LWK 3 auf  $43,82^\circ (\pm 4,15 \text{ SA})$  bei den weiblichen Probandinnen und  $44,66^\circ (\pm 4,85 \text{ SA})$  bei den männlichen Probanden leicht ab und bis LWK 5 mit  $47,64^\circ (\pm 5,44 \text{ SA})$  bei den Frauen und  $46,42^\circ (\pm 4,55 \text{ SA})$  bei den Männern wieder leicht zu (s. Tab. 4.5 auf S. 42 und Tab. 4.6 auf S. 44).



**Abbildung 4.8:** Winkel der Lamina zur Grundplatte des Wirbelkörpers als sagittaler Winkel für LWK 1 bis LWK 5 beidseits. Die Daten sind separiert nach Geschlecht. Jeweils  $n=100$ , bei Zusammenfassung der Messungen beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.



**Abbildung 4.9:** Der Winkel der Lamina zur Medianlinie in der Transversalebene als axialer Winkel für LWK 1 bis LWK 5 beidseits. Die Daten sind separiert nach Geschlecht. Jeweils  $n=100$ , bei Zusammenfassung der Messungen beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.

### 4.4 Pedikelmaße

Die Pedikel wurden in 2 Ebenen vermessen. Der kraniokaudale Durchmesser entsprach der Pedikelhöhe. Der laterale Durchmesser stellte die Pedikelbreite dar (s. Abs. 3.11 auf S. 22).

#### 4.4.1 Pedikelbreite

Die Breiten der Pedikel nahmen bei beiden Geschlechtern von LWK 1 bis LWK 5 zu, sowohl beim inneren als auch beim äußeren Durchmesser (s. Abb. 4.10 auf S. 42 und s. Abb. 4.11 auf S. 47). Bei den weiblichen Probandinnen lag der Mittelwert für LWK 1 bei 6,8 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 3 - 13 mm) für den äußeren Durchmesser und 3,2 mm ( $\pm 1$  mm SA, Spanne 1 - 9 mm) für den inneren Durchmesser (s. Tab. 4.5 auf S. 42). Für den inneren Durchmesser der Pedikelbreite bei LWK 3 und LWK 4 zeigte sich bei beiden Geschlechtern eine signifikante Größendifferenz zugunsten der linken Seite (s. Tab. 4.4 auf S. 41 und Tab. 4.3 auf S. 40). Ebenso zeigte sich der äußere Durchmesser der Pedikel von LWK 4 bei den weiblichen Probandinnen auf der linken Seite signifikant größer (s. Tab. 4.4 auf S. 41). Die mittlere Breite bei den männlichen Probanden lag für den äußeren Durchmesser bei LWK 1 bei 9 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 4 - 16 mm) und für den inneren Durchmesser bei 4 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 1-9 mm ) (s. Tab. 4.3 auf S. 40).

Die Breiten nahmen durchgehend bis LWK 5 zu und lagen bei den weiblichen Probandinnen bei LWK 5 für den äußeren Durchmesser im Mittel bei 15 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 5 - 22 mm) und für den inneren Durchmesser bei 9 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 3 - 15 mm) (s. Tab. 4.5 auf S. 42). Bei den männlichen Probanden lag die mittlere Pedikelbreite bei LWK 5 im Außendurchmesser bei 18 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 12 - 24 mm) und im Innendurchmesser des gleichen Wirbelkörpers bei 10 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 5 - 17 mm) (s. Tab. 4.5 auf S. 42).

#### 4.4.2 Pedikelhöhe

Die Höhe der Pedikel als kraniokaudaler Durchmesser des Pedikels war bei weiblichen Probandinnen und männlichen Probanden bei LWK 1 am größten und nahm durchgehend bis LWK 5 ab (s. Abb. 4.12 auf S. 48 und Abb.4.13 auf S.49). Die Höhe lag bei den Frauen im Mittel bei LWK 1 im äußeren Durchmesser bei 16 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 12 - 21 mm) und im inneren Durchmesser bei 8 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 3 - 12 mm) (s. Tab. 4.12 auf S. 48).

Bei den männlichen Probanden betrug die Höhe der Pedikel bei LWK 1 im äußeren Durchmesser im Mittel bei 17 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 10 - 27 mm) und im inneren Durchmesser im Mittel bei 9 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 5 - 13 mm). Bei LWK 5 betrug die Pedikelhöhen bei

den weiblichen Probandinnen nur noch 12 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 9 - 17 mm) im Mittel für die äußeren Durchmesser und 6 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 3 - 12 mm) für die inneren Durchmesser. Bei den männlichen Probanden hatten die Pedikelhöhen bei LWK 5 bis auf 14 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 10 - 22 mm) im Mittel für den äußeren Durchmesser und 7 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 4 - 14 mm) im Mittel für den inneren Durchmesser abgenommen. Es fanden sich bei den männlichen Probanden erneut auf der linken Seite signifikant größere innere Durchmesser der Pedikelhöhen bei LWK 4. Diese Differenz war bei den weiblichen Probandinnen jedoch nicht nachweisbar.

**Tabelle 4.3:** Pedikelmäße und deskriptive Statistik der männlichen Probanden. Maße sind angegeben in mm. Test auf Normalverteilung (NV): D’Agostino & Pearson omnibus normality test (n.s.: Nullhypothese wird angenommen,  $\alpha=0,05$ ), Test rechts vs. links: paired-T Test (parametrisch), Wilcoxon matched-pairs signed rank test (nichtparametrisch). SA: Standardabweichung, n = 50.

Männer	rechts				links				p Wert	
	Parameter	Mittelwert	SA	Range	NV	Mittelwert	SA	Range		NV
LWK 1	ID Breite	4,1	1,7	1,2 - 7,9	n. s.	4,4	1,8	1,1 - 9,4	n. s.	n. s.
	ÄD Breite	8,5	2,2	3,9 - 13,9	n. s.	8,7	2,5	4,4 - 15,8	n. s.	n. s.
	ID Höhe	9,4	2,1	4,9 - 13,4	n. s.	9,1	1,8	5,3 - 13,3	n. s.	n. s.
	ÄD Höhe	17,6	2,3	13,2 - 26,9	n. s.	16,9	2,1	10,70 - 21,1	n. s.	n. s.
LWK 2	ID Breite	4,6	1,8	1,6 - 10,3	0,0423	4,8	1,8	1,7 - 9,0	n. s.	n. s. †
	ÄD Breite	9,0	2,2	4,6 - 13,9	n. s.	9,1	2,4	3,5 - 14,5	n. s.	n. s.
	ID Höhe	8,1	2,2	4,0 - 15,9	0,0083	8,3	2,4	4,9 - 16,0	0,0013	n. s. †
	ÄD Höhe	15,4	2,3	5,3 - 19,5	<0,0001	15,4	2,3	6,2 - 20,5	<0,0001	n. s. †
LWK 3	ID Breite	5,7	1,7	2,7 - 8,9	n. s.	6,3	1,6	2,5 - 10,2	n. s.	<0,0001
	ÄD Breite	11,1	2,2	7,2 - 15,8	n. s.	11,4	1,9	6,8 - 15,1	n. s.	n. s.
	ID Höhe	7,8	1,7	4,1 - 11,3	n. s.	8,2	1,7	5,6 - 13,0	0,0363	n. s. †
	ÄD Höhe	15,1	1,9	11,1 - 19,3	n. s.	15,5	2,1	11,5 - 20,9	n. s.	n. s.
LWK 4	ID Breite	6,6	1,7	3,2 - 10,2	n. s.	7,0	1,8	2,9 - 11,2	n. s.	0,031
	ÄD Breite	13,0	2,1	8,9 - 18,8	n. s.	12,8	2,4	8,6 - 18,7	n. s.	n. s.
	ID Höhe	7,1	1,6	3,5 - 11,1	n. s.	7,6	1,7	4,2 - 11,4	n. s.	0,034
	ÄD Höhe	14,5	1,6	10,6 - 18,9	n. s.	14,5	2,2	10,4 - 20,0	n. s.	n. s.
LWK 5	ID Breite	9,8	2,8	5,4 - 17,3	n. s.	10,0	2,7	5,5 - 15,4	0,0447	n. s. †
	ÄD Breite	17,8	3,2	12,1 - 24,1	n. s.	17,4	2,9	11,8 - 23,0	n. s.	n. s.
	ID Höhe	7,1	2,0	3,8 - 14,3	0,0005	7,0	2,0	3,8 - 11,2	n. s.	n. s. †
	ÄD Höhe	13,8	2,3	10,4 - 22,4	<0,0001	13,7	2,2	9,7 - 19,7	n. s.	n. s. †

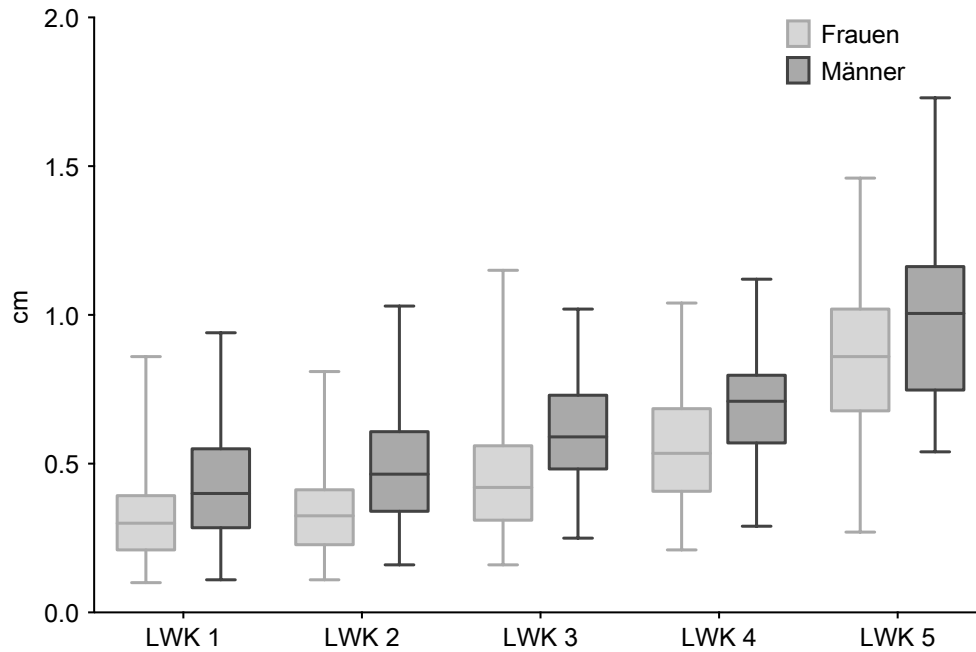
†Wilcoxon signed rank non-parametric test

**Tabelle 4.4:** Pedikelmaße und deskriptive Statistik der weiblichen Probandinnen. Maße sind angegeben in mm. Test auf Normalverteilung (NV): D'Agostino & Pearson omnibus normality test (n.s.: Nullhypothese wird angenommen,  $\alpha=0,05$ ), Test rechts vs. links: paired-T Test (parametrisch), Wilcoxon matched-pairs signed rank test (nichtparametrisch). SA: Standardabweichung, n = 50.

Frauen	rechts			links			p Wert			
	Parameter	Mittelwert	SA	Range	NV	Mittelwert		SA	Range	NV
LWK 1	Breite ID	3,2	1,3	1,0 - 6,8	n. s.	3,2	1,5	1,0 - 8,6	0,0002	n. s. †
	Breite ÄD	7,0	2,0	3,2 - 12,9	n. s.	6,7	1,9	2,7 - 11,8	n. s.	n. s.
	Höhe ID	8,5	1,7	2,5 - 12,1	0,0062	8,3	1,9	4,6 - 12,3	n. s.	n. s. †
	Höhe ÄD	15,6	2,6	2,1 - 21,2	<0,0001	15,6	1,7	12,9 - 20,0	n. s.	n. s. †
LWK 2	Breite ID	3,5	1,6	1,2 - 8,1	0,0063	3,4	1,5	1,1 - 7,5	0,0280	n. s. †
	Breite ÄD	7,2	2,0	4,2 - 12,2	n. s.	7,0	2,0	3,8 - 12,2	n. s.	n. s.
	Höhe ID	7,2	1,9	2,8 - 14,2	0,0001	7,2	2,0	4,0 - 15,9	<0,0001	n. s. †
	Höhe ÄD	14,3	2,0	5,7 - 18,4	<0,0001	14,2	2,1	5,4 - 18,4	<0,0001	n. s. †
LWK 3	Breite ID	4,3	1,9	1,6 - 12,5	<0,0001	4,8	1,9	2,3 - 11,5	0,0004	0,0106†
	Breite ÄD	8,5	2,3	3,8 - 13,7	n. s.	8,8	2,3	3,4 - 13,5	n. s.	n. s.
	Höhe ID	7,2	1,7	4,0 - 14,5	<0,0001	7,1	1,6	2,8 - 13,7	<0,0001	n. s. †
	Höhe ÄD	13,8	2,1	7,9 - 18,5	n. s.	13,8	2,2	4,7 - 17,8	<0,0001	n. s. †
LWK 4	Breite ID	5,3	1,9	2,3 - 10,4	0,0370	5,8	2,0	2,1 - 9,2	n. s.	0,0365 †
	Breite ÄD	10,7	2,4	6,9 - 18,1	0,0058	11,1	2,2	6,7 - 16,5	n. s.	0,0269 †
	Höhe ID	6,5	1,3	3,3 - 10,6	n. s.	6,4	1,3	3,0 - 8,8	n. s.	n. s.
	Höhe ÄD	13,4	1,6	9,9 - 17,7	n. s.	13,2	1,5	9,7 - 16,6	n. s.	n. s.
LWK 5	Breite ID	8,6	2,5	2,7 - 14,1	n. s.	8,6	2,5	3,3 - 14,6	n. s.	n. s.
	Breite ÄD	15,4	2,8	9,1 - 21,9	n. s.	15,4	3,2	5,3 - 21,6	n. s.	n. s.
	Höhe ID	6,3	1,7	3,5 - 12,4	0,0006	6,1	1,5	2,8 - 9,3	n. s.	n. s. †
	Höhe ÄD	12,2	1,9	9,2 - 16,7	n. s.	12,2	1,7	8,7 - 17,2	n. s.	n. s.

† Wilcoxon signed rank non-parametric test

## 4 Ergebnisse



**Abbildung 4.10:** Innerer Durchmesser der Pedikel in der axialen Ebene (Pedikelbreite) bei Männern und Frauen. Jeweils  $n = 100$ , bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.

**Tabelle 4.5:** Maße der Laminae, Pedikel, sowie Laminawinkelmaße und deskriptive Statistik der weiblichen Probandinnen. Maße sind angegeben in cm. Test auf Normalverteilung (NV): D'Agostino & Pearson omnibus normality test (n.s.: Nullhypothese wird angenommen,  $\alpha=0,05$ ). ID: Innerer Durchmesser (spongöser Durchmesser); ÄD: äußerer Durchmesser (kortikaler Durchmesser); SA: Standardabweichung.  $n = 100$ , bei Zusammenfassung der Maße beider Seiten.

	Parameter	Minimum	Maximum	Mittelwert	SA	NV
LWK 1	Laminalänge	2,86	3,97	3,40	0,27	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,37	0,9	0,60	0,11	n. s.
	Laminabreite ID	0,11	0,42	0,24	0,06	n. s.
	Laminahöhe ÄD	0,7	1,57	1,13	0,18	n. s.
	Laminahöhe ID	0,16	0,62	0,40	0,10	n. s.
	Pedikelbreite ÄD	0,27	1,29	0,68	0,20	0,0467
	Pedikelbreite ID	0,1	0,86	0,32	0,14	<0,0001
	Pedikelhöhe ÄD	1,21	2,12	1,57	0,17	n. s.

Fortsetzung auf der nächsten Seite



**Tabelle 4.5:** Fortsetzung Maße der Laminae, Pedikel, sowie Laminawinkelmaße und deskriptive Statistik der weiblichen Probandinnen.

	Parameter	Minimum	Maximum	Mittelwert	SA	NV
	Pedikelhöhe ID	0,25	1,23	0,84	0,18	n. s.
	Winkel ap [°]	36,72	58,63	47,32	5,29	n. s.
	Winkel sag [°]	21,25	56,31	39,74	7,27	n. s.
LWK 2	Laminalänge	2,64	4,24	3,54	0,29	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,27	0,91	0,61	0,09	0,0035
	Laminabreite ID	0,12	0,51	0,23	0,07	<0,0001
	Laminahöhe ÄD	0,8	1,72	1,24	0,20	n. s.
	Laminahöhe ID	0,18	0,77	0,44	0,12	n. s.
	Pedikelbreite ÄD	0,38	1,22	0,71	0,20	n. s.
	Pedikelbreite ID	0,11	0,81	0,34	0,16	0,0005
	Pedikelhöhe ÄD	1,09	1,84	1,44	0,16	n. s.
	Pedikelhöhe ID	0,28	1,42	0,71	0,17	<0,0001
	Winkel ap [°]	32,45	59,17	46,36	4,93	n. s.
	Winkel sag [°]	20,92	59,29	40,28	6,06	n. s.
LWK 3	Laminalänge	2,66	4,46	3,71	0,33	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,33	1,24	0,62	0,13	<0,0001
	Laminabreite ID	0,11	1,2	0,25	0,12	<0,0001
	Laminahöhe ÄD	0,93	1,88	1,34	0,23	n. s.
	Laminahöhe ID	0,18	0,73	0,43	0,11	n. s.
	Pedikelbreite ÄD	0,47	1,37	0,88	0,22	n. s.
	Pedikelbreite ID	0,16	0,89	0,45	0,17	0,0279
	Pedikelhöhe ÄD	1,03	1,85	1,40	0,17	n. s.
	Pedikelhöhe ID	0,28	1,04	0,70	0,13	n. s.
	Winkel ap [°]	34,76	54,65	43,82	4,15	n. s.
	Winkel sag [°]	31,63	56,06	44,97	4,71	n. s.
LWK 4	Laminalänge	2,72	4,85	3,79	0,37	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,27	0,98	0,59	0,13	0,0464
	Laminabreite ID	0,08	0,4	0,22	0,07	n. s.
	Laminahöhe ÄD	0,87	2,53	1,41	0,25	<0,0001
	Laminahöhe ID	0,17	1,31	0,47	0,18	<0,0001
	Pedikelbreite ÄD	0,67	1,81	1,09	0,23	0,009

Fortsetzung auf der nächsten Seite

## 4 Ergebnisse

**Tabelle 4.5:** Fortsetzung Maße der Laminae, Pedikel, sowie Laminawinkelmaße und deskriptive Statistik der weiblichen Probandinnen.

	Parameter	Minimum	Maximum	Mittelwert	SA	NV
	Pedikelbreite ID	0,21	1,04	0,56	0,19	n. s.
	Pedikelhöhe ÄD	0,97	1,77	1,33	0,15	n. s.
	Pedikelhöhe ID	0,3	1,06	0,64	0,13	n. s.
	Winkel ap [°]	33,12	54,49	43,99	4,48	n. s.
	Winkel sag [°]	36,22	62,18	47,90	5,01	n. s.
LWK 5	Laminalänge	3,17	5,12	4,01	0,42	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,18	1,04	0,55	0,16	n. s.
	Laminabreite ID	0,08	0,45	0,21	0,08	0,0065
	Laminahöhe ÄD	0,92	2,05	1,43	0,24	n. s.
	Laminahöhe ID	0,13	1,33	0,51	0,21	<0,0001
	Pedikelbreite ÄD	0,53	2,19	1,54	0,30	n. s.
	Pedikelbreite ID	0,27	1,46	0,86	0,25	n. s.
	Pedikelhöhe ÄD	0,87	1,72	1,22	0,18	n. s.
	Pedikelhöhe ID	0,28	1,24	0,62	0,16	0,001
	Winkel ap [°]	35,65	61,22	47,64	5,44	n. s.
	Winkel sag [°]	31,44	64,51	48,17	7,14	n. s.

**Tabelle 4.6:** Maße der Laminae, Pedikel, sowie Laminawinkelmaße und deskriptive Statistik der männlichen Probanden. Maße sind angegeben in cm: Test auf Normalverteilung (NV): D'Agostino & Pearson omnibus normality test (n.s.: Nullhypothese wird angenommen,  $\alpha=0,05$ ). ID: Innerer Durchmesser (spongöser Durchmesser); ÄD: äußerer Durchmesser (kortikaler Durchmesser); SA: Standardabweichung. n = 100, bei Zusammenfassung der Maße beider Seiten.

	Parameter	Minimum	Maximum	Mittelwert	SA	NV
LWK 1	Laminalänge	2,78	4,60	3,60	0,33	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,30	1,02	0,66	0,13	n. s.
	Laminabreite ID	0,10	0,43	0,26	0,07	n. s.
	Laminahöhe ÄD	0,68	1,65	1,21	0,21	n. s.
	Laminahöhe ID	0,17	0,95	0,45	0,13	0,0004
	Pedikelbreite ÄD	0,39	1,58	0,86	0,24	n. s.
	Pedikelbreite ID	0,11	0,94	0,42	0,17	n. s.
	Pedikelhöhe ÄD	1,07	2,69	1,72	0,22	0,0002

Fortsetzung auf der nächsten Seite

**Tabelle 4.6:** Fortsetzung Maße der Laminae, Pedikel sowie Laminawinkelmaße und deskriptive Statistik der männlichen Probanden.

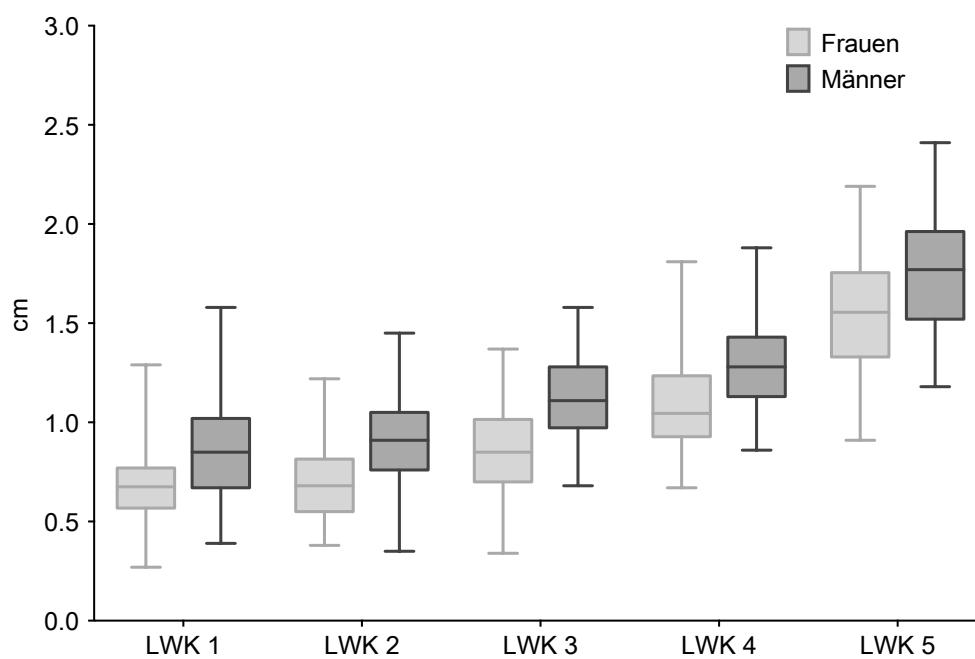
	Parameter	Minimum	Maximum	Mittelwert	SA	NV
	Pedikelhöhe ID	0,49	1,34	0,92	0,20	n. s.
	Winkel ap [°]	34,42	59,45	46,93	5,76	n. s.
	Winkel sag [°]	28,47	56,10	43,16	5,20	n. s.
LWK 2	Laminalänge	2,91	4,75	3,76	0,38	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,23	0,99	0,69	0,14	0,0027
	Laminabreite ID	0,11	0,80	0,28	0,10	<0,0001
	Laminahöhe ÄD	0,89	1,89	1,33	0,20	<0,0001
	Laminahöhe ID	0,11	1,07	0,47	0,18	<0,0001
	Pedikelbreite ÄD	0,35	1,45	0,91	0,23	n. s.
	Pedikelbreite ID	0,16	1,03	0,47	0,18	n. s.
	Pedikelhöhe ÄD	0,53	2,05	1,54	0,23	<0,0001
	Pedikelhöhe ID	0,40	1,60	0,82	0,23	<0,0001
	Winkel ap [°]	31,17	58,39	45,44	5,67	n. s.
	Winkel sag [°]	33,92	58,02	43,72	5,07	n. s.
LWK 3	Laminalänge	2,99	4,84	3,97	0,37	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,42	0,97	0,67	0,13	n. s.
	Laminabreite ID	0,03	0,51	0,25	0,09	0,026
	Laminahöhe ÄD	1,04	1,92	1,45	0,21	n. s.
	Laminahöhe ID	0,27	0,98	0,52	0,14	n. s.
	Pedikelbreite ÄD	0,68	1,58	1,12	0,20	n. s.
	Pedikelbreite ID	0,25	1,02	0,60	0,16	n. s.
	Pedikelhöhe ÄD	1,11	2,09	1,53	0,20	n. s.
	Pedikelhöhe ID	0,41	1,30	0,80	0,17	n. s.
	Winkel ap [°]	31,31	56,74	44,66	4,85	n. s.
	Winkel sag [°]	31,63	60,22	46,77	4,60	n. s.
LWK 4	Laminalänge	3,10	4,85	4,12	0,38	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,36	0,93	0,66	0,13	n. s.
	Laminabreite ID	0,06	0,48	0,25	0,08	n. s.
	Laminahöhe ÄD	0,95	2,38	1,52	0,26	0,0003
	Laminahöhe ID	0,20	1,14	0,53	0,18	0,0063
	Pedikelbreite ÄD	0,86	1,88	1,29	0,23	n. s.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

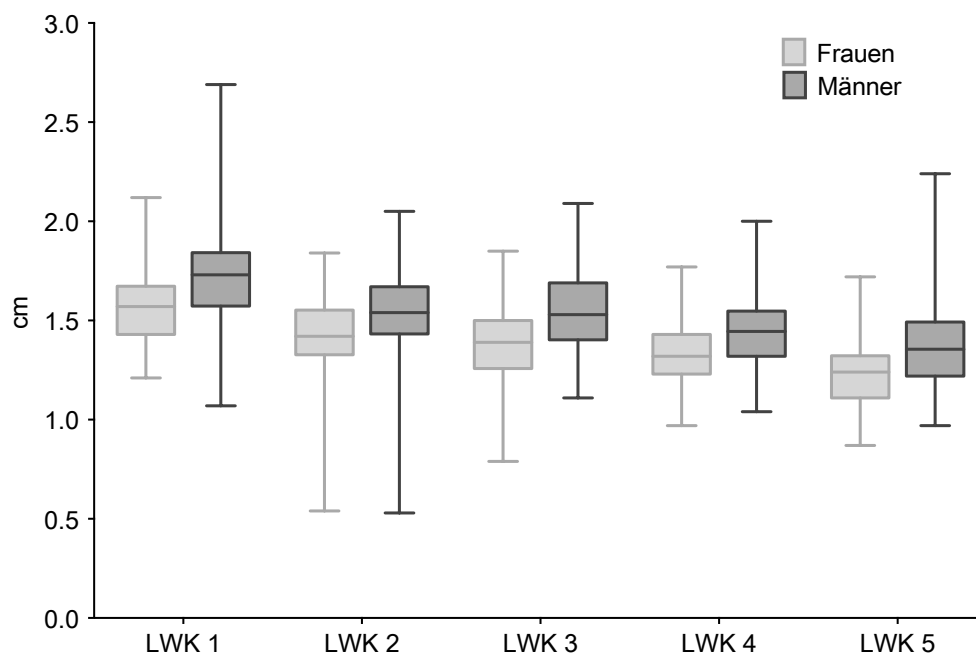
## 4 Ergebnisse

**Tabelle 4.6:** Fortsetzung Maße der Laminae, Pedikel sowie Laminawinkelmaße und deskriptive Statistik der männlichen Probanden.

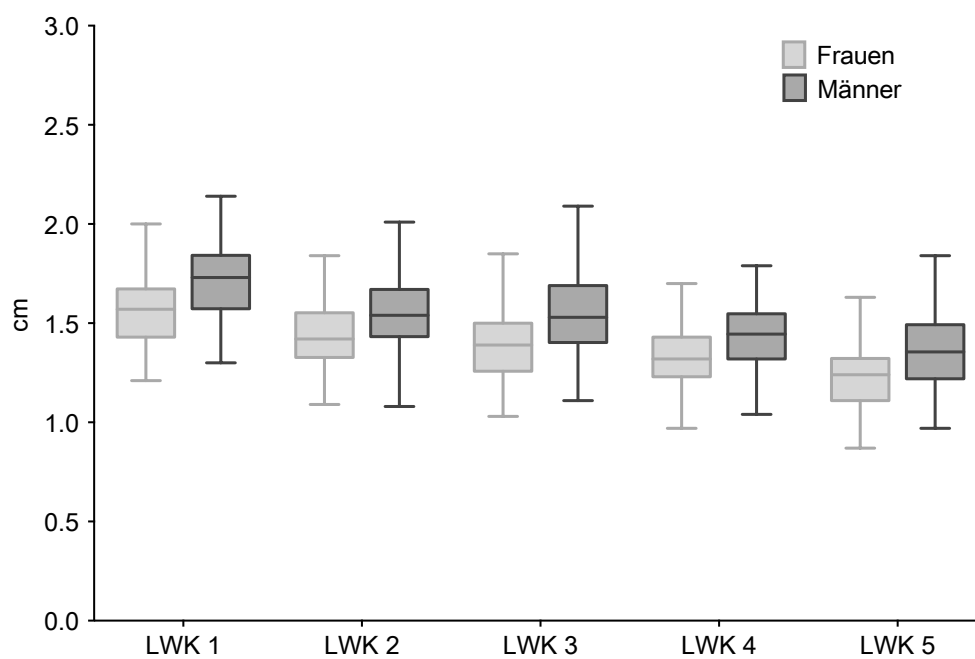
	Parameter	Minimum	Maximum	Mittelwert	SA	NV
	Pedikelbreite ID	0,29	1,12	0,68	0,18	n. s.
	Pedikelhöhe ÄD	1,04	2,00	1,45	0,19	0,0158
	Pedikelhöhe ID	0,35	1,14	0,74	0,16	n. s.
	Winkel ap [°]	30,04	56,31	45,00	4,68	n. s.
	Winkel sag [°]	33,90	63,10	50,43	5,60	n. s.
LWK 5	Laminallänge	3,57	5,82	4,58	0,46	n. s.
	Laminabreite ÄD	0,36	1,08	0,65	0,15	n. s.
	Laminabreite ID	0,01	0,55	0,26	0,10	n. s.
	Laminahöhe ÄD	1,09	2,67	1,70	0,34	n. s.
	Laminahöhe ID	0,29	1,68	0,70	0,25	<0,0001
	Pedikelbreite ÄD	1,18	2,41	1,76	0,30	n. s.
	Pedikelbreite ID	0,54	1,73	0,99	0,27	n. s.
	Pedikelhöhe ÄD	0,97	2,24	1,37	0,22	<0,0001
	Pedikelhöhe ID	0,38	1,43	0,71	0,20	0,0033
	Winkel ap [°]	33,48	58,51	46,42	4,55	n. s.
	Winkel sag [°]	34,69	69,80	54,43	6,58	n.s.



**Abbildung 4.11:** Äußerer Durchmesser der Pedikelbreite bei Frauen und Männern. Jeweils  $n = 100$ , bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.



**Abbildung 4.12:** Äußerer Durchmesser der Pedikel in sagittaler Ebene (Pedikelhöhe) bei Frauen und Männern. Jeweils  $n = 100$ , bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.



**Abbildung 4.13:** Innerer Durchmesser der Pedikel in sagittaler Ebene (Pedikelhöhe) bei Frauen und Männern. Jeweils  $n = 100$ , bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten. Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.

### 4.5 Dornfortsatzmaße

Der ÄD der Höhe der Dornfortsätze reichte bei den weiblichen Probandinnen von im Minimum 12 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 12 - 24 mm) bei LWK 5 bis zu einem Maximum von 27 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 14 - 27 mm) bei LWK 1 (s. Tab. 4.7 auf S. 51).

Der Durchschnitt des ÄD der Dornfortsätze bei den Frauen lag zwischen 16 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 12 - 24 mm) bei LWK 5 und 19 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 12 - 25 mm) bei LWK 3 (s. Abb. 4.14 auf S. 52).

Der ID der Dornfortsatzhöhe der weiblichen Probandinnen reichte von 3 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 3 - 13 mm ) bei LWK 5 bis 15 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 4 - 15 mm) bei LWK 3 (s. Tab. 4.7 auf S. 51). Im Durchschnitt betrug der ID zwischen 8 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 3 - 13 mm) bei LWK 5 und 9 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 4 - 15 mm ) bei LWK 3 (s. Tab. 4.14 auf S. 52).

Bei den männlichen Probanden reichte der ÄD der Dornfortsätze von einem Minimum von 10 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 10 - 27 mm) bei LWK 2 bis maximal 28 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 10 - 28 mm) bei LWK 5. Die Mittelwerte der ÄD der Dornfortsätze bei den Männern nahmen nach kraniokaudal ab (s. Abb. 4.14 auf S. 52).

Der ID reichte von minimal 4 mm ( $\pm 3$  mm SA, Spanne 4 - 22 mm) bei LWK 2 bis zu einem Maximum von 22 mm bei dem gleichen Wirbelkörper. Im Mittel betrug der ID der Dornfortsätze 10 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 5- 15 mm) bei LWK 1 und 8 mm ( $\pm 2$  mm SA, Spanne 5 - 17 mm) bei dem fünften LWK (s. Tab. 4.8 auf S. 51).



**Tabelle 4.7:** Dornfortsatzmaße und deskriptive Statistik der weiblichen Probandinnen. Maße sind angegeben in cm. Test auf Normalverteilung (NV): D'Agostino & Pearson omnibus normality test (n.s.: Nullhypothese wird angenommen,  $\alpha=0,05$ ). ID: Innerer Durchmesser (spongiöser Durchmesser); ÄD: äußerer Durchmesser (kortikaler Durchmesser); SA: Standardabweichung. n= 50.

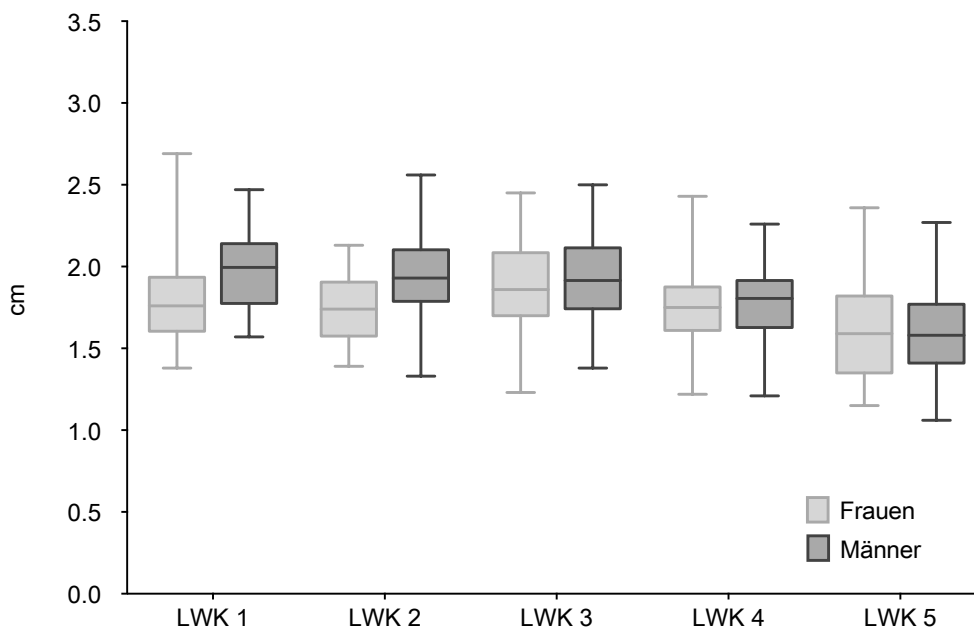
Wirbelkörper	Parameter	Mittelwert	SA	Spanne	NV
LWK 1	Höhe DF ÄD	1,78	0,26	1,38 - 2,69	0,0012
	Höhe DF ID	0,87	0,18	0,45 - 1,37	n.s.
LWK 2	Höhe DF ÄD	1,73	0,24	1,39 - 2,13	0,0052
	Höhe DF ID	0,81	0,23	0,33 - 1,35	n.s.
LWK 3	Höhe DF ÄD	1,89	0,28	1,23 - 2,45	n.s.
	Höhe DF ID	0,90	0,26	0,37 - 1,51	n.s.
LWK 4	Höhe DF ÄD	1,76	0,25	1,22 - 2,43	n.s.
	Höhe DF ID	0,82	0,22	0,34 - 1,40	n.s.
LWK 5	Höhe DF ÄD	1,60	0,28	1,15 - 2,36	n.s.
	Höhe DF ID	0,76	0,20	0,32 - 1,32	n.s.

**Tabelle 4.8:** Dornfortsatzmaße und deskriptive Statistik der männlichen Probanden. Maße sind angegeben in cm. Test auf Normalverteilung (NV): D'Agostino & Pearson omnibus normality test (n.s. : Nullhypothese wird angenommen,  $\alpha=0,05$ ). ID: Innerer Durchmesser (spongiöser Durchmesser); ÄD: äußerer Durchmesser (kortikaler Durchmesser); SA: Standardabweichung. n = 50.

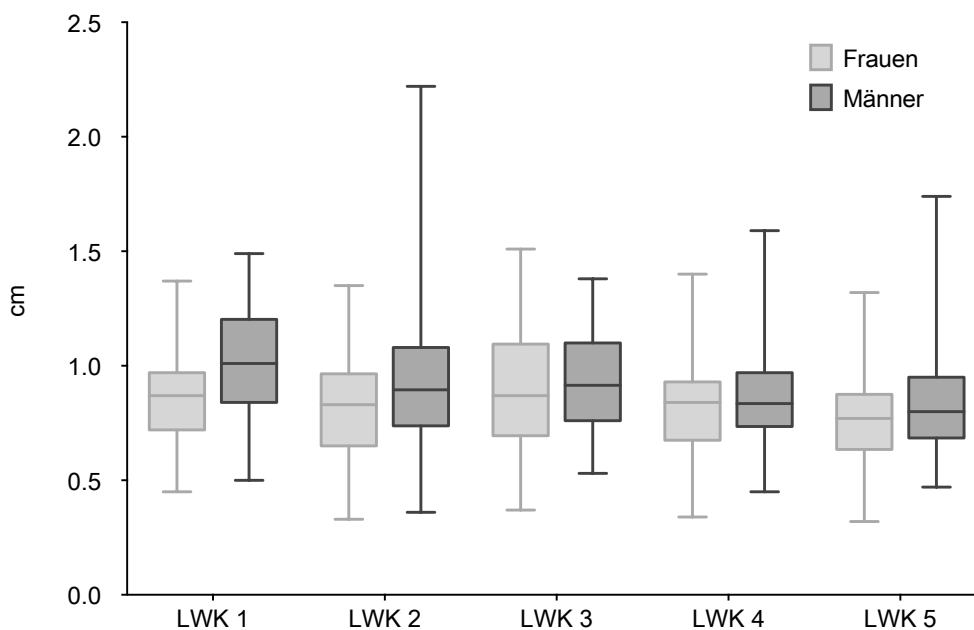
Wirbelkörper	Parameter	Mittelwert	SA	Spanne	NV
LWK 1	Höhe DF ÄD	2,00	0,25	1,57 - 2,47	n.s.
	Höhe DF ID	1,01	0,23	0,50 - 1,49	n.s.
LWK 2	Höhe DF ÄD	1,92	0,31	0,98 - 2,69	n.s.
	Höhe DF ID	0,94	0,30	0,36 - 2,22	<0.0001
LWK 3	Höhe DF ÄD	1,93	0,26	1,38 - 2,75	n.s.
	Höhe DF ID	0,93	0,24	0,53 - 1,38	n.s.
LWK 4	Höhe DF ÄD	1,80	0,26	1,21 - 2,76	0,0008
	Höhe DF ID	0,87	0,24	0,45 - 1,59	0,0026
LWK 5	Höhe DF ÄD	1,60	0,31	1,06 - 2,78	<0.0001
	Höhe DF ID	0,81	0,23	0,47 - 1,74	<0.0001

## 4 Ergebnisse

---



**Abbildung 4.14:** Äußerer Durchmesser der Dornfortsatzhöhe,  $n = 50$ . Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.



**Abbildung 4.15:** Innerer Durchmesser der Dornfortsatzhöhe,  $n = 50$ . Die Boxplots zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil, die Whiskers zeigen den maximalen und minimalen Datenpunkt an.

## 4.6 Validierung

Die Validierung der Messmethode erfolgte durch Jonas Müller. Der Vergleich von manuell mit Hilfe eines digitalen Messschiebers (Mitutoyo, Serie 500 Genauigkeit 0,01 mm) vermessenen anatomischen Präparaten, mit dreidimensional rekonstruierten CT-Messdaten dieser Wirbelkörper ergab für 30 Wirbelkörper von zehn Kadavern eine Abweichung von 0,08 cm bzw. einen Variationskoeffizient von 5,35%<sup>82</sup>. Die Abweichung war für alle registrierten Daten nicht signifikant<sup>82</sup>.

## 4.7 Korrelation der Lamina- und Pedikeldurchmesser

Bei den weiblichen Probandinnen zeigten sich nur die Pedikelhöhen bei LWK 3 ( $r=0,33$ ), LWK 4 ( $r=0,42$ ) bis LWK 5 ( $r=0,31$ ) mit den Laminahöhen korrelierend (s. Tab. 4.9 auf S. 54 und s. Abb. 4.16 auf S. 55). Die Breiten korrelierten nicht bzw. nur schwach (s. Abb. 4.17 auf S. 56). Bei den männlichen Probanden zeigten sich sowohl für die Breiten als auch für die Höhen deutliche Korrelation bei LWK 1 bis LWK 4 (s. Abb. 4.18 auf S. 57), mit Ausnahme der Breiten bei LWK 3 und Breite und Höhe bei LWK 5 (s. Abb. 4.18, S. 57 und s. Tab.4.10 auf S.54).

## 4 Ergebnisse

**Tabelle 4.9:** Korrelation der Pedikelmaße vs. der Laminamaße bei den weiblichen Probandinnen. Jeweils  $n = 100$  bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten.

Wirbelkörper	Parameter	r	R <sup>2</sup>	p Wert
LWK 1	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	0,24*		0,0189
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,12	0,01	n. s.
LWK 2	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	0,28*		0,0046
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,14	0,02	n. s.
LWK 3	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	0,09*		n. s.
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,33	0,11	0,0008
LWK 4	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	0,05*		n. s.
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,42*		<0.0001
LWK 5	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	0,15	0,02	n. s.
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,31	0,10	0,002

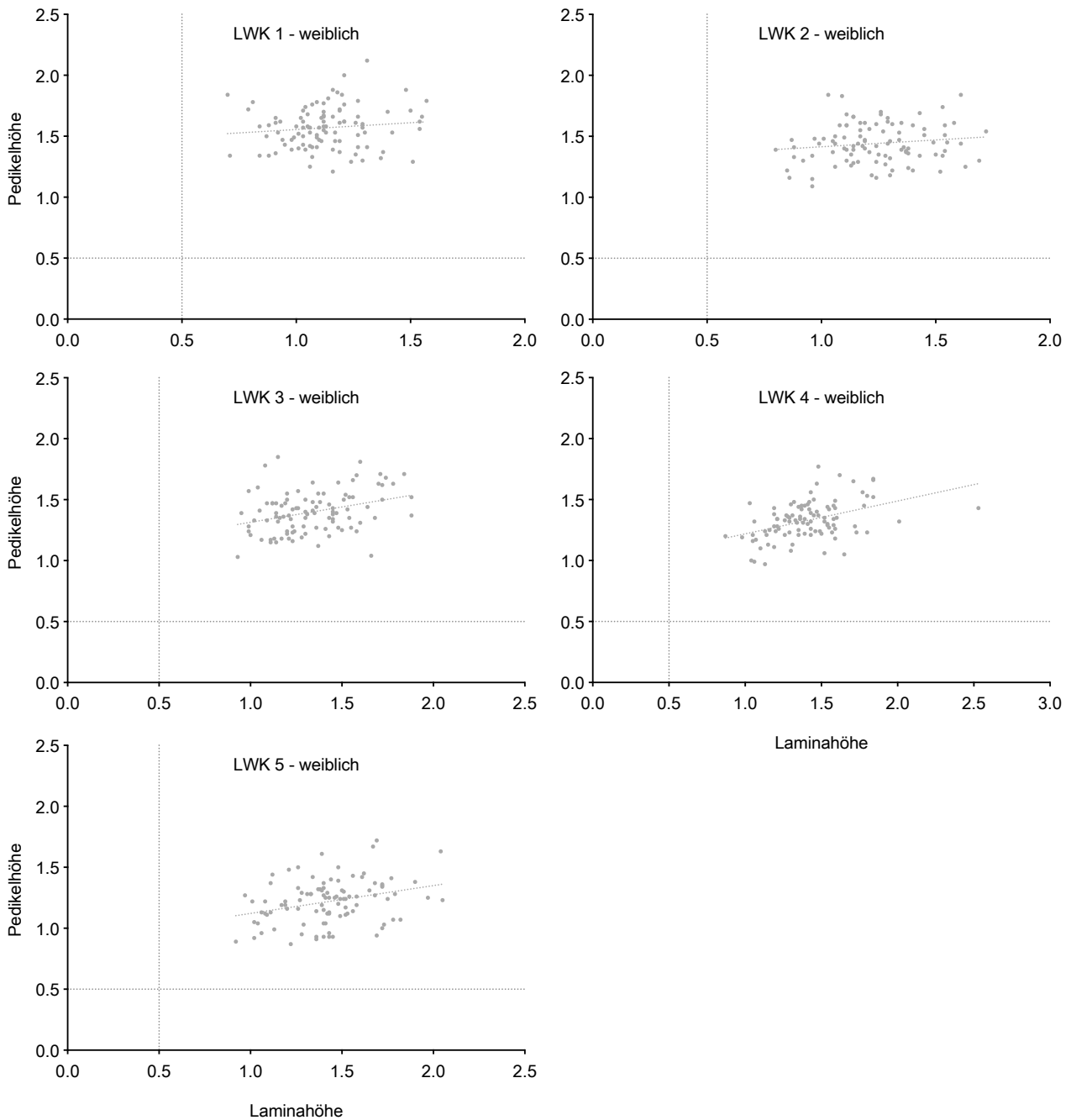
\*Spearman Korrelation

**Tabelle 4.10:** Korrelation der Pedikelmaße vs. der Laminamaße bei den männlichen Probanden. Jeweils  $n = 100$  bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten.

Wirbelkörper	Parameter	r	R <sup>2</sup>	p Wert
LWK 1	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	0,46	0,21	<0.0001
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,50*		<0.0001
LWK 2	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	0,38*		<0.0001
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,41*		<0.0001
LWK 3	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	0,28*		0,0048
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,46	0,21	<0.0001
LWK 4	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	0,34	0,12	0,0006
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,32*		0,0013
LWK 5	Korrelation Pedikelbreite vs. Laminabreite	-0,08	0,007	n. s.
	Korrelation Pedikelhöhe vs. Laminahöhe	0,29*		0,0039

\*Spearman Korrelation

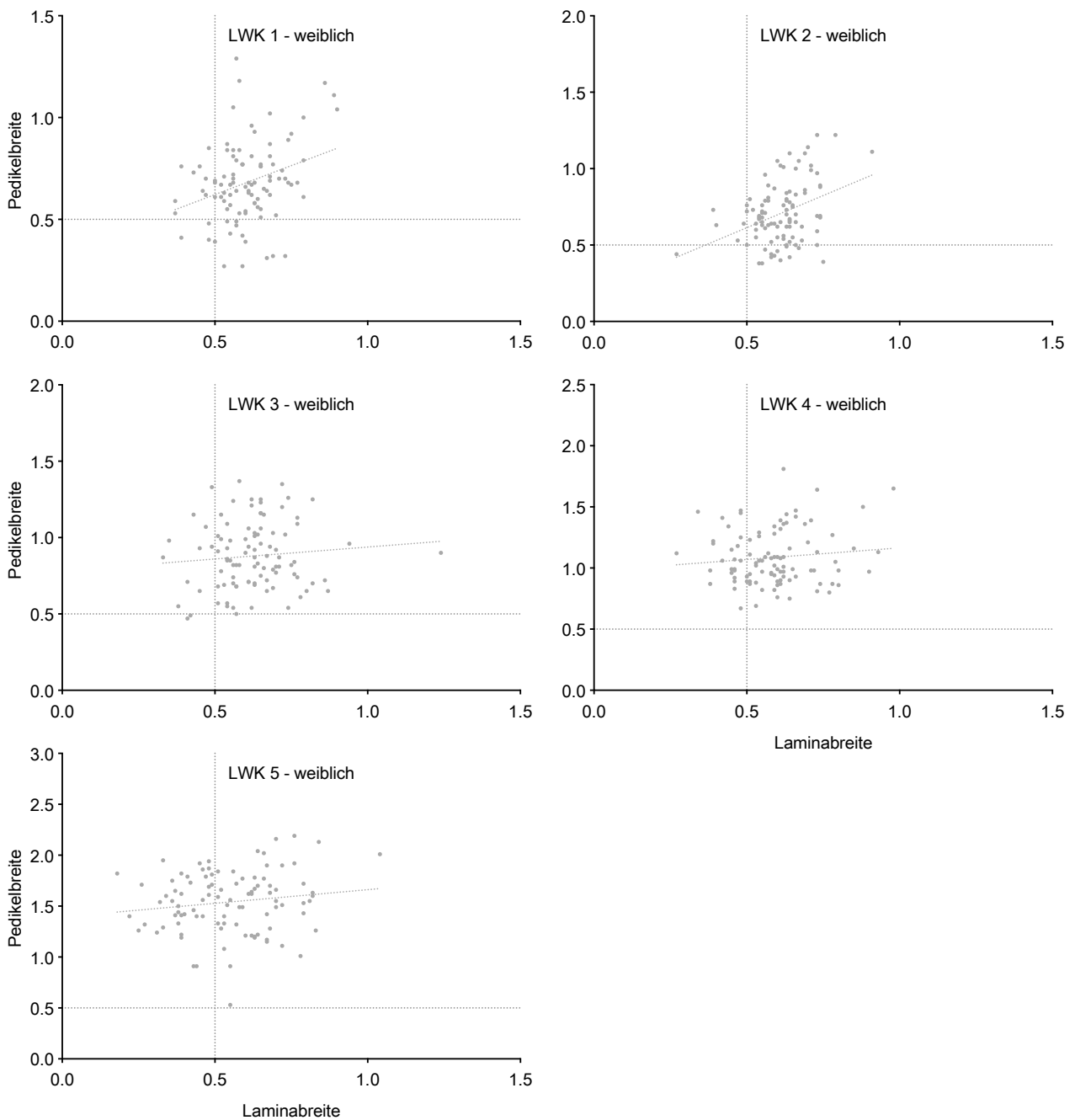
## 4.7 Korrelation der Lamina- und Pedikeldurchmesser



**Abbildung 4.16:** Höhen der Pedikel und der Laminae bei den weiblichen Probandinnen als XY Streudiagramm von Datenpaaren. In der Y Achse sind die Pedikelhöhen in cm aufgetragen. In der X Achse sind die Laminahöhen in cm aufgetragen.  $n=100$  bei Zusammenfassung der Daten von rechts und links. Die gestrichelten Linien zeigen die untere Grenze für die Instrumentierbarkeit an, in diesem Fall 5 mm.

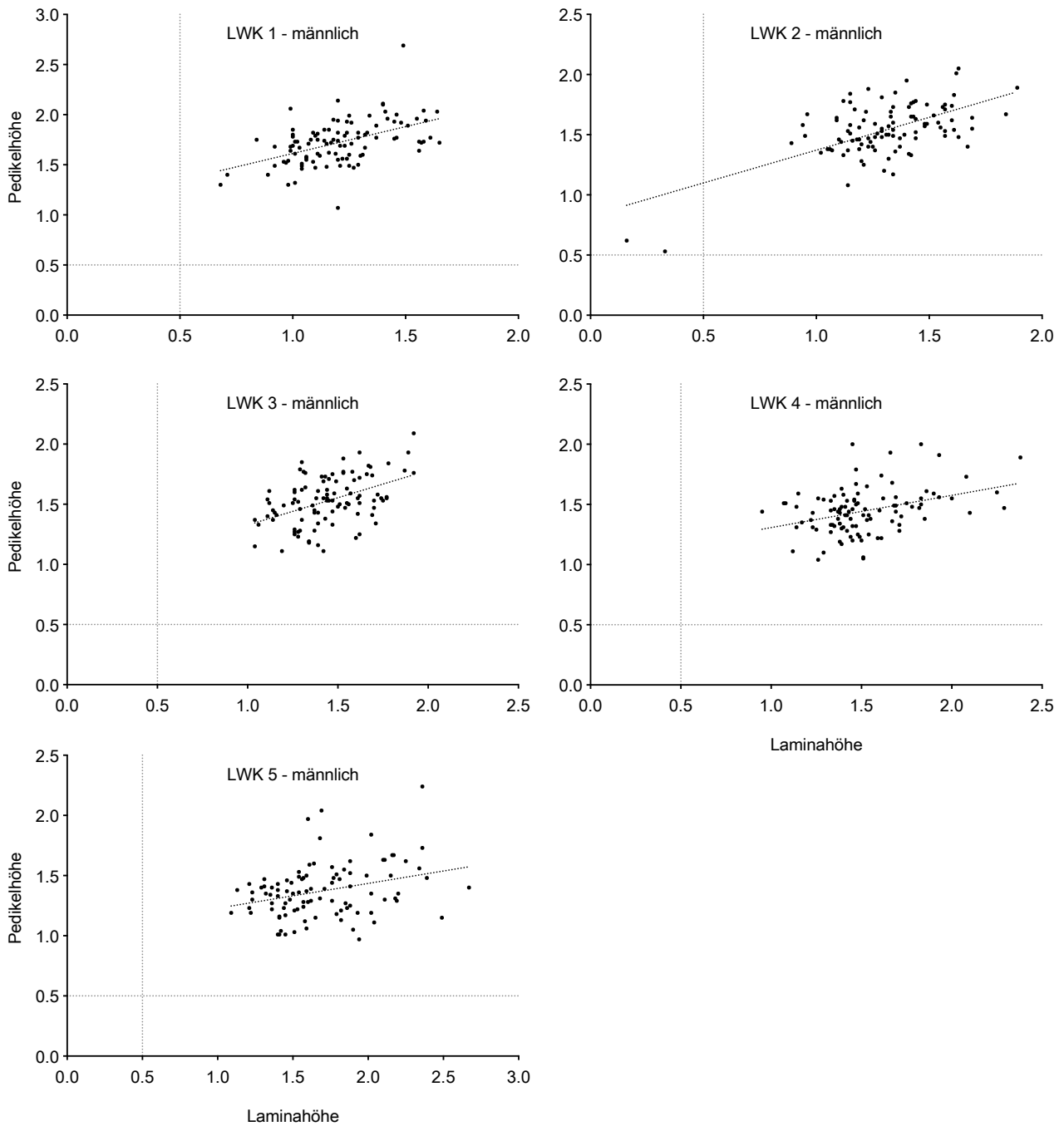
## 4 Ergebnisse

---



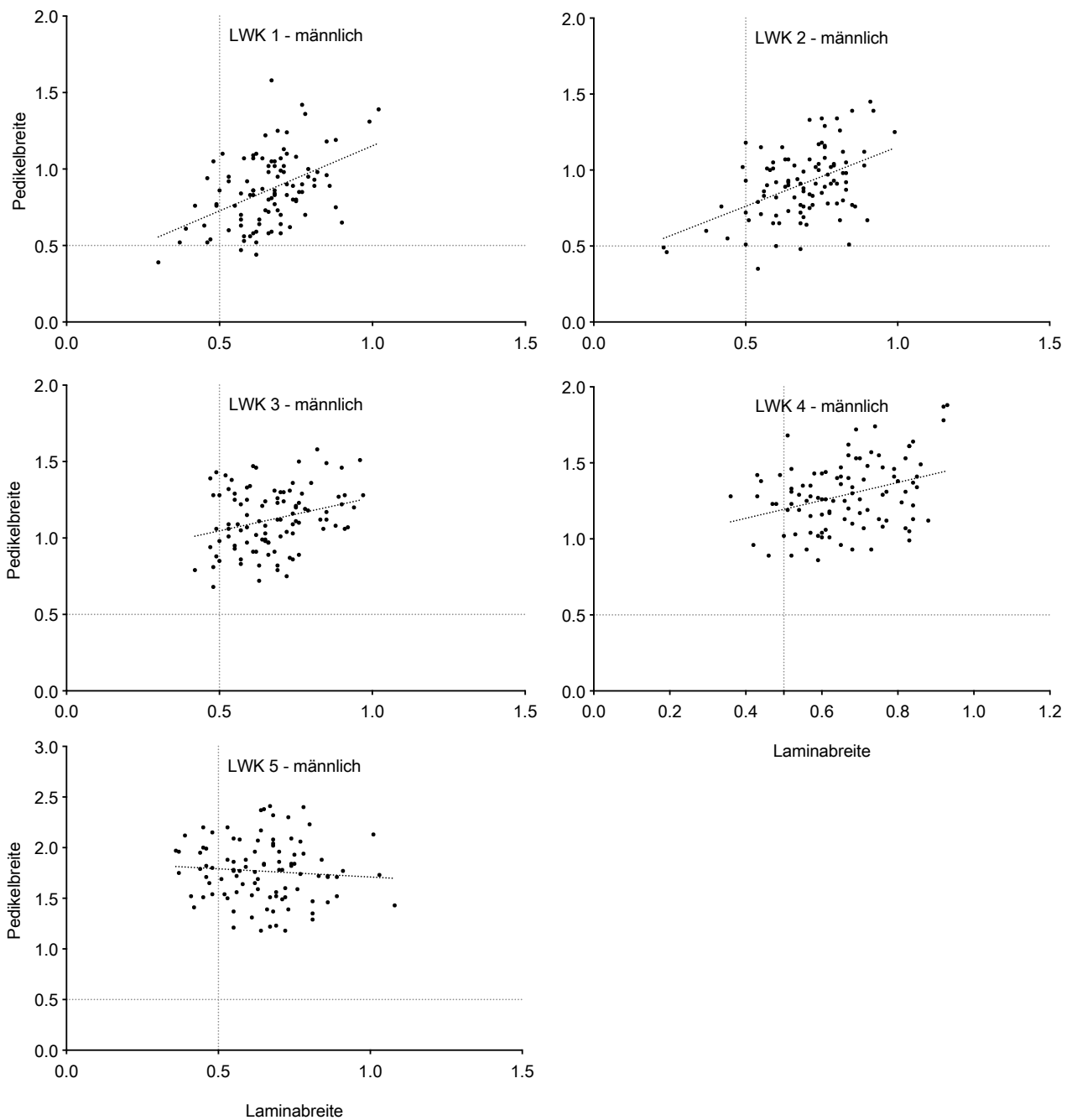
**Abbildung 4.17:** Breiten der Pedikel und der Laminae bei den weiblichen Probandinnen als XY Streudiagramm von Datenpaaren. In der Y Achse sind die Pedikelbreiten in cm aufgetragen. In der X Achse sind die Laminabreiten in cm aufgetragen.  $n = 100$  bei Zusammenfassung der Daten von rechts und links. Die gestrichelten Linien zeigen die untere Grenze für die Instrumentierbarkeit an, in diesem Fall 5 mm.

## 4.7 Korrelation der Lamina- und Pedikeldurchmesser



**Abbildung 4.18:** Höhen der Pedikel und der Laminae bei den männlichen Probanden als XY Streudiagramm von Datenpaaren. In der Y Achse sind die Pedikelhöhen in cm aufgetragen. In der X Achse sind die Laminahöhen in cm aufgetragen.  $n = 100$  bei Zusammenfassung der Daten von rechts und links. Die gestrichelten Linien zeigen die untere Grenze für die Instrumentierbarkeit an, in diesem Fall 5 mm.

## 4 Ergebnisse



**Abbildung 4.19:** Breiten der Pedikel und der Laminae bei den männlichen Probanden als XY Streudiagramm von Datenpaaren. In der Y Achse sind die Pedikelbreiten in cm aufgetragen. In der X Achse sind die Laminabreiten in cm aufgetragen.  $n = 100$  bei Zusammenfassung der Daten von rechts und links. Die gestrichelten Linien zeigen die untere Grenze für die Instrumentierbarkeit an, in diesem Fall 5 mm.



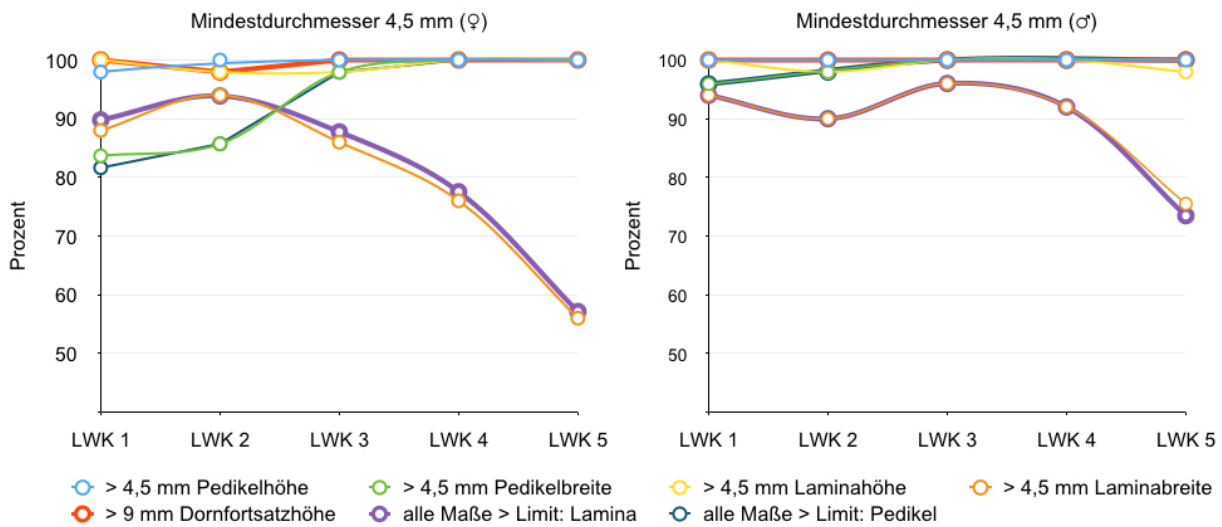
## 4.8 Beurteilung der Schraubenplatzierung

Zur Beurteilung der Platzierbarkeit von ILS wurden die Anteile der Laminae und zum Vergleich der Pedikel berechnet. Dabei wurden als Grenzen die äußeren Durchmesser gewählt, die dem Durchmesser von häufig verwendeten Schraubensystemen entsprechen. Es wurden die Grenzen von 4,5 mm und 5 mm ausgewertet. Bei der Auswertung zeigten sich die Laminabreiten und Pedikelbreiten als limitierende Größen (s. Abb. 4.20 auf S. 60 und s. Abb. 4.21 auf S. 60). Bei den weiblichen Probandinnen waren 89,8 % der Wirbelkörper bei LWK 1 für die Insertion eines 4,5 mm Schraubendurchmessers möglich (s. Abb. 4.12 auf S. 61). Bei den Pedikelmaßen bei LWK 1 nur in 81,6% der Wirbelkörper für eine 4,5 mm große Schraube (s. Abb. 4.12 auf S. 61). Bei den Männern zeigte sich in den Gesamtmaßen die Pedikelmaße den Laminamaßen überlegen, sowohl bei allen Lendenwirbelkörpern als auch bei einem 4,5 mm und 5 mm großen Schraubendurchmesser (s. Abb. 4.12 auf S. 61 und s. Abb. 4.14 auf S. 61). Der Anteil der übergrenzwertigen Laminamaße stieg bei LWK 2 auf 93,9% an, desgleichen für die Pedikelmaße auf 85,7%. Bei LWK 2 bei einem 4,5 mm und 5 mm Schraubendurchmesser waren die gesamten Laminamaße prozentual den Pedikelmaßen überlegen.

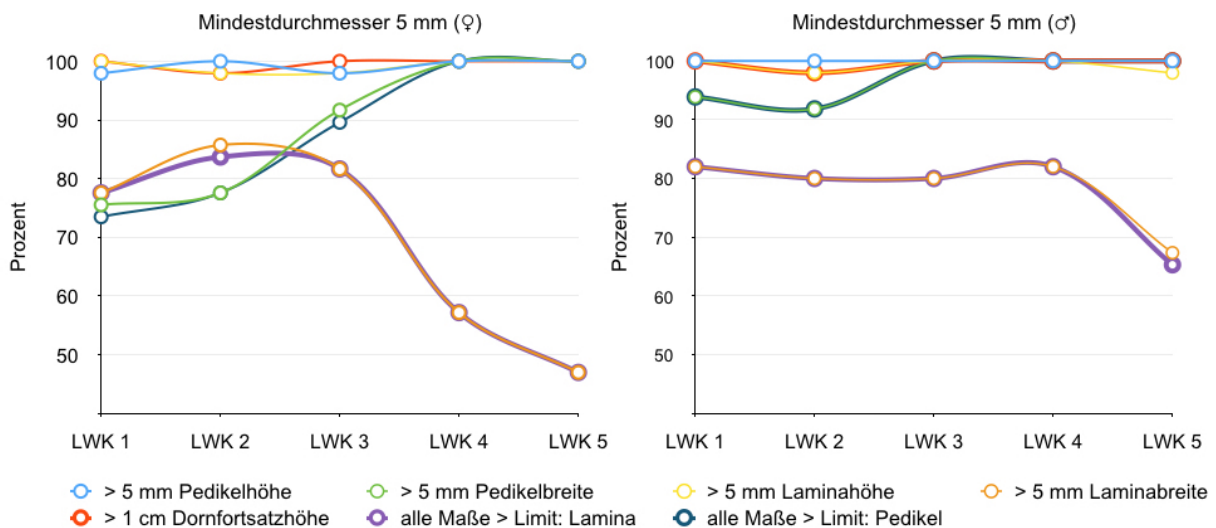
**Tabelle 4.11:** Anteile der Wirbel mit übergrenzwertigen Maßen bzgl. der angegebenen Parameter für Lamina, Pedikel und Dornfortsatz bzw. zusammengefasst aller Parameter für die Laminae und die Pedikel. Die Tabelle zeigt die Daten der weiblichen Probandinnen. Grenzwert 5 mm. n = 100, bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten.

Parameter	LWK 1	LWK 2	LWK 3	LWK 4	LWK 5
>5 mm Pedikelhöhe	98,0	100,0	98,0	100,0	100,0
>5 mm Pedikelbreite	75,5	77,6	91,7	100,0	100,0
>5 mm Laminahöhe	100,0	98,0	98,0	100,0	100,0
>5 mm Laminabreite	77,6	85,7	81,6	57,1	46,9
>1 cm Dornfortsatzhöhe	100,0	98,0	100,0	100,0	100,0
alle Maße >Limit: Lamina	77,6	83,7	81,6	57,1	46,9
alle Maße >Limit: Pedikel	73,5	77,6	89,6	100,0	100,0

## 4 Ergebnisse



**Abbildung 4.20:** Anteile der Wirbel mit übergrenzwertigen Maßen bzgl. der angegebenen Parameter für Lamina, Pedikel und Dornfortsatz bzw. zusammengefasst aller Parameter für die Laminae und die Pedikel. Grenzwert 4,5 mm. n = 100, bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten. Abbildung links zeigt die weiblichen Probandinnen, rechts die männlichen Probanden.



**Abbildung 4.21:** Anteile der Wirbel mit übergrenzwertigen Maßen bzgl. der angegebenen Parameter für Lamina, Pedikel und Dornfortsatz bzw. zusammengefasst aller Parameter für die Laminae und die Pedikel. Grenzwert 5 mm. n = 100, bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten. Abbildung links zeigt die weiblichen Probandinnen, rechts die männlichen Probanden.

## 4.8 Beurteilung der Schraubenplatzierung

**Tabelle 4.12:** Anteile der Wirbel mit übergrenzwertigen Maßen bzgl. der angegebenen Parameter für Lamina, Pedikel und Dornfortsatz bzw. zusammengefasst aller Parameter für die Laminae und die Pedikel. Die Tabelle zeigt die Daten der weiblichen Probandinnen. Grenzwert 4,5 mm. n = 100, bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten.

Parameter	LWK 1	LWK 2	LWK 3	LWK 4	LWK 5
>4,5 mm Pedikelhöhe	98,0	100,0	100,0	100,0	100,0
>4,5 mm Pedikelbreite	83,7	85,7	97,9	100,0	100,0
>4,5 mm Laminahöhe	100,0	98,0	98,0	100,0	100,0
>4,5 mm Laminabreite	88,0	94,0	86,0	76,0	56,0
>9 mm Dornfortsatzhöhe	100,0	98,0	100,0	100,0	100,0
alle Maße >Limit: Lamina	89,8	93,9	87,8	77,6	57,1
alle Maße >Limit: Pedikel	81,6	85,7	97,9	100,0	100,0

**Tabelle 4.13:** Anteile der Wirbel mit übergrenzwertigen Maßen bzgl. der angegebenen Parameter für Lamina, Pedikel und Dornfortsatz bzw. zusammengefasst aller Parameter für die Laminae und die Pedikel. Die Tabelle zeigt die Daten der männlichen Probanden. Grenzwert 5 mm. n = 100, bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten.

Parameter	LWK 1	LWK 2	LWK 3	LWK 4	LWK 5
>5 mm Pedikelhöhe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
>5 mm Pedikelbreite	93,9	91,8	100,0	100,0	100,0
>5 mm Laminahöhe	100,0	98,0	100,0	100,0	98,0
>5 mm Laminabreite	82,0	80,0	80,0	82,0	67,3
>1 cm Dornfortsatzhöhe	100,0	98,0	100,0	100,0	100,0
alle Maße >Limit: Lamina	82,0	80,0	80,0	82,0	65,3
alle Maße >Limit: Pedikel	93,9	91,8	100,0	100,0	100,0

**Tabelle 4.14:** Anteile der Wirbel mit übergrenzwertigen Maßen bzgl. der angegebenen Parameter für Lamina, Pedikel und Dornfortsatz bzw. zusammengefasst aller Parameter für die Laminae und die Pedikel. Die Tabelle zeigt die Daten der männlichen Probanden. Grenzwert 4,5 mm. n = 100, bei Zusammenfassung der Daten beider Seiten.

Parameter	LWK 1	LWK 2	LWK 3	LWK 4	LWK 5
>4,5 mm Pedikelhöhe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
>4,5 mm Pedikelbreite	95,9	98,0	100,0	100,0	100,0
>4,5 mm Laminahöhe	100,0	98,0	100,0	100,0	98,0
>4,5 mm Laminabreite	94,0	90,0	96,0	92,0	75,5

Fortsetzung auf der nächsten Seite

## 4 Ergebnisse

---

**Tabelle 4.14:** Fortsetzung Anteil übergrenzwertiger Maße bei einem Grenzwert von 4,5 mm der männlichen Probanden.

Parameter	LWK 1	LWK 2	LWK 3	LWK 4	LWK 5
>9 mm Dornfortsatzhöhe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
alle Maße >Limit: Lamina	94,0	90,0	96,0	92,0	73,5
alle Maße >Limit: Pedikel	95,9	98,0	100,0	100,0	100,0

# 5 Diskussion

Die Zielsetzung dieser radiologisch-anatomischen Studie war es, anhand einer anatomischen Beschreibung die Anwendbarkeit von ILS in der lumbalen Wirbelsäule zu beurteilen. Die Studie wurde an einer repräsentativen Kohorte von lumbalen Computertomographien durchgeführt, welche mittels einer Software in Hinsicht auf die Platzierbarkeit von ILS vermessen wurden. Die dreidimensionale Rekonstruktion gab die Möglichkeit, die Laminae in ihrer räumlichen Lage und in allen drei Raummaßen zu vermessen. Die empirische Beschreibung der Größe und Lage der Laminae in Abhängigkeit von Geschlecht und dem zu instrumentierenden Wirbelkörper ermöglichte die Bewertung der Platzierbarkeit von ILS mit gängigen Schrauben-Stab-Systemen zur Wirbelsäuleninstrumentierung.

## 5.1 Studie

### 5.1.1 Studiengruppe

In der Studiengruppe war die Altersverteilung zwischen den Geschlechtern statistisch indifferent und zeichnete sich durch eine gute Homogenität aus. Durch die Verwendung von Computertomographien, die zum Zwecke der Diagnostik bei Polytraumaverdacht durchgeführt wurden, wurden systematische Fehler durch Selektion und dadurch eine Datenschiefe bzw. negativer Einfluß auf die Repräsentativität vermieden. Kritisch betrachtet, berücksichtigt die Studie jedoch nur Probanden mit mitteleuropäischer Herkunft, im Alter zwischen 20 und 60 Jahren. Damit sind Einschränkungen der Aussagekraft für niedrigeres oder höheres Alter limitiert und ebenso können die Daten nicht auf Menschen anderer Herkunft übertragen werden.

Die Anwendung einer großen Anzahl von CT-Patientenscans ermöglichte eine repräsentative Bestimmung anatomischer Daten. Durch die Ausschlusskriterien ist die vorliegende Studie limitiert und berücksichtigt keine Patienten mit Spondylolysen, knöchernen Verletzungen oder Deformitäten sowie Fehl- oder Normabweichungen der LWS (s.Abs. 2.1 auf S.11). Eine Übertragung der Daten ohne Validierung ist daher nicht möglich.

### 5.1.2 Methodik

Die dreidimensionale Rekonstruktion ermöglichte eine genaue Beurteilung der anatomischen Verhältnisse und die dünne Schichtlegung die Analyse in hoher Auflösung. Die Messungen waren dadurch wenig abhängig von der Lage der interessierenden Struktur im Raum. Diese Methode ist der Vermessung einfacher zweidimensionaler computertomographischer Studien überlegen.

Die Maße wurden mittels einer Software an digitalen Daten erhoben und entsprechen daher nicht vollständig den tatsächlichen Durchmessern und Längen, die in Wirbelkörpern gefunden werden. Diesem systematischen Fehler wurde durch eine vergleichende Messung an Kadavern Rechnung getragen. Bei den 30 Wirbelkörpern aus zehn Kadavern ergaben sich eine Messabweichung von 0,08 cm bzw. 5,35% und fiel für die erhobenen Maße nicht signifikant aus<sup>82</sup>.

Eine weitere Quelle für systematische und zufällige Fehler sind durch den Untersucher bedingt. Alle Messungen wurden daher im Vorfeld durch den Untersucher trainiert und in der Studie anhand der etablierten Methodik durchgeführt. Der Variationskoeffizient der Messungen wurde bestimmt und lag bei 3,5% (s. Abs. 4.2 auf S.26). Somit wurde eine sehr gute Reproduzierbarkeit und Validität der Methode bestätigt.

Beim Vergleich mit anderen Publikationen von anatomischen Beschreibungen der Laminae wurden in zwei Fällen bei CT-Analysen nur zwei Wirbelkörper (BWK 1 und BWK 2) ausgewertet<sup>22,92</sup> oder es fehlte der direkte Vergleich mit den dazugehörigen Pedikeln<sup>3,20</sup>.

In vier Studien wurden CT Scans benutzt<sup>3,20,22,92</sup>, die jedoch eine geringe Fallzahl<sup>20,22</sup> aufwiesen oder die deutlich grobere Schichtabstände wählten (3mm)<sup>20,92</sup>.

Darüber hinaus haben alle diese Studien nur zweidimensionale CT-Scans ausgewertet, und es wurde keine Durchführbarkeit einer beidseitigen Schraubenplatzierung untersucht, die im Vergleich zur einseitigen Schraubenfixierung ein größeres Trajektorienfenster im Bereich des Dornfortsatzes erfordert<sup>95</sup>. Bei Messungen mit nur zweidimensionalen CT Bildern konnten die genauen Laminalängen nicht gemessen werden, da die Lamina sich in der gebräuchlichen Schichtlegung bei einer CT- Bildgebung der Wirbelsäule nicht in einem einzelnen Bild darstellt und auf Basis dieser Darstellung nicht korrekt vermessen werden kann<sup>20,22,63</sup>.

### 5.1.3 Strahlenbelastung

Bei Wirbelsäulenoperationen spielt die Strahlenbelastung des Patienten und des Chirurgen eine wichtige Rolle. So wird bei der Insertion der Pedikel regelhaft ein radiologisches Kontrollbild zur Lage der Pedikelschraube angefertigt. Slomczykowski et al. stellte in einer Studie die Strahlenbelastung vor<sup>97</sup>. Er verglich die entstehende Strahlenbelastung durch Computertomographen

und die erzeugte Strahlung durch die Durchleuchtung mittels Bildverstärker. Es wurde eine mittlere Expositionszeit pro Pedikelschraube mit 63 Sekunden ermittelt<sup>97</sup>.

Bei der Anwendung von ILS entfällt die Notwendigkeit einer intraoperativen Fluoroskopie, um die Schraubenplatzierung zu kontrollieren, folglich reduziert sich die Strahlenbelastung und ebenso die Operationszeit<sup>68</sup>.

## 5.2 Bewertung der Laminamaße

### 5.2.1 Laminalänge

Für eine erfolgreiche Anwendung von ILS in der LWS benötigt der Operateur Daten zu den anatomischen Gegebenheiten. In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die gemessenen Laminalängen die Insertion von ILS in der LWS in einer Länge im Mittel zwischen 34 mm und 46 mm ermöglichen. Die minimalsten im Durchschnitt gemessenen Laminalängen fanden sich bei bei LWK 1 mit 36 mm bei den männlichen Probanden und 34 mm bei den weiblichen Probandinnen. In über 90% der Laminae beträgt deren Länge über 30 mm bei beiden Geschlechtern und allen LWK. In der Literatur wurden Laminalängen zwischen 25 mm und 30 mm in 82% der Fälle beschrieben, bei denen ebenfalls LWK 1 die minimalste Länge aufwies<sup>56</sup>. Die Größendiskrepanz ist dabei am ehesten auf methodische Unterschiede in der Vermessung der Laminae, die nur in der axialen Ebene erfolgte, zurückzuführen<sup>56</sup>. Da jedoch die Lamina zur axialen Schichtlegung der CT Bildgebung gekippt verläuft, ist eine Messung nur in axialer Schichtung fehlerbehaftet und führt systematisch zu geringen Längenmaßen. Der Vorteil der Vermessung nach dreidimensionaler Rekonstruktion ermöglichte die Längenvermessung der Laminae im tatsächlichen Lamina- bzw. Schraubenverlauf und ist daher einer Messung in der axialen Schicht überlegen.

Folglich sollten 30 mm (in der vorliegenden Kohorte in >90% der Fälle) bis 35 mm lange Schrauben für eine Anwendung von ILS an der LWS in den meisten Fällen angemessen sein.

### 5.2.2 Laminabreite und Laminahöhe

Die Höhen der Laminae, gemessen als minimaler kraniokaudaler Durchmesser gegen die Laminalängsachse, zeigten für die äußeren Durchmesser (ÄD) minimal >5 mm und im Mittel >10 mm bei beiden Geschlechtern für alle Lendenwirbelkörper. Demgegenüber fielen die inneren Durchmesser im Vergleich deutlicher ab, als bei allen anderen Maßen zwischen dem inneren und äußeren Durchmesser. Ursächlich hierfür sind zum einen Limitationen der Methodik, da

die Auflösung der Computertomographien hier an Grenzen kommt und bei der längsovalen Form der Lamina die Dicke der Kortikalis in diesem Bereich nicht exakt abgrenzbar ist. Zum anderen ist davon auszugehen, dass die Kortikalis aufgrund der spitz zulaufenden Form der Lamina im Längsdurchschnitt deutlich dicker ist als im anteroposterioren Querdurchmesser.

Für eine Verwendung von ILS in der LWS zeigten die vorliegenden Daten, dass Limitationen für die Anwendung von Schrauben insbesondere durch die Laminabreite entstehen. Bei LWK 4 (57,1%) und LWK 5 (46,9%) bei den Frauen und bei LWK 5 (67,3%) bei den Männern waren bedeutsame Anteile mit geringen Laminabreiten unter 5 mm. Es sollte daher, analog zum Vorgehen bei Pedikelschrauben, im Vorfeld anhand einer Bildgebung überprüft werden, ob Laminaschrauben platzierbar sind.

In der Literatur wurde eine minimale Laminabreite von 5 mm gefordert, die den Gebrauch von ILS mit einem Durchmesser von 4 mm bei einer Toleranz von 1 mm erlauben<sup>20, 25, 72, 93</sup>. In der zervikalen Wirbelsäule sind diese Kriterien (minimaler Laminadurchmesser von 5 mm) nur bei 72% der Laminae des HWK 2 erfüllt<sup>26</sup>.

### 5.2.3 Räumliche Lage der Laminae

Die sagittale und laterale Winkelung der Laminae im Verhältnis zum Wirbelkorpus und zur Achse der Wirbelsäule ist bisher nicht für die LWS beschrieben worden. Die Kenntnis dieser Winkel sind für die Platzierung von ILS von Bedeutung.

### 5.2.4 Pedikel

Zur Fixierung von Wirbelkörpern ist die Insertion von Pedikelschrauben die am häufigsten angewendete Methode. Die in der Studie angewendete Methode konnte die Pedikelmaße anderer Studien reproduzieren, wobei trotz methodischer Unterschiede der einzelnen Publikationen, wie die Vermessung von Kadavern, vergleichbare Ergebnissen erbrachte (s. Tab. 5.1 auf S.67). Einschränkung muss für diese internationalen Studien jedoch gelten, dass die Ergebnisse nur für die entsprechende Population am Standort der Untersuchung repräsentativ sind.

Der Vergleich der Maße der Laminae und der Pedikel ergab, dass bei den weiblichen Probanden die Pedikelquerschnitte bei LWK 1 und LWK 2 im Durchschnitt kleiner sind als die Querschnitte der Laminae dieser Wirbelkörper (s. Abs. 4.8 auf S. 59). Hinzu kommt, dass die Korrelationsanalyse der Lamina- und Pedikelmaße bei den Frauen keine bzw. nur sehr schwach ausgeprägte Korrelationen ergaben (s. Abs. 4.7 auf S. 53). Daraus ist ableitbar, dass die Laminae bei Wirbeln mit hypoplastischen Pedikeln häufig einen größeren Querschnitt bieten und daher als Alternative zur Schraubenplatzierung infrage kommen. Bei den männlichen Proban-



den zeigte sich trotz hoher Korrelation zwischen Pedikel- und Laminamaßen, dass häufig im Fall sehr schmaler Pedikel, die Laminae deutlich größere Querschnitte aufweisen und daher ebenfalls als Alternative möglich sind.

**Tabelle 5.1:** Zusammenstellung radiologischer und anatomischer Studien zu Pedikelmaßen.

Wirbel	Männer		Frauen		Methodik	Studiengröße	Quelle
	Breite	Höhe	Breite	Höhe			
LWK 1	8,6	15,8	6,3	11,7	Kadaver	20	Attar et al. <sup>7</sup>
	7,4	14,1	7,5	14,0	Kadaver	50	Ebraheim et al. <sup>33</sup> .
	8,6	17,2	7,0	15,7	CT	100	aktuelle Studie
LWK 2	9,3	15,0	6,4	12,4	Kadaver	20	Attar et al. <sup>7</sup>
	8,4	14,2	7,9	13,8	Kadaver	50	Ebraheim et al. <sup>33</sup> .
	9,1	15,4	7,1	14,4	CT	100	aktuelle Studie
LWK 3	11,3	14,7	7,3	11,9	Kadaver	20	Attar et al. <sup>7</sup>
	9,8	13,9	9,7	13,8	Kadaver	50	Ebraheim et al. <sup>33</sup> .
	11,2	15,3	8,8	14,0	CT	100	aktuelle Studie
LWK 4	13,9	14,4	8,1	11,1	Kadaver	20	Attar et al. <sup>7</sup>
	12,8	12,7	12,5	12,8	Kadaver	50	Ebraheim et al. <sup>33</sup> .
	12,9	14,5	10,9	13,3	CT	100	aktuelle Studie
LWK 5	18,2	14,3	13,4	10,6	Kadaver	20	Attar et al. <sup>7</sup>
	18,3	11,4	17,6	11,4	Kadaver	50	Ebraheim et al. <sup>33</sup> .
	17,6	13,7	15,4	12,2	CT	100	aktuelle Studie

### 5.2.5 Bewertung der Platzierbarkeit von intralaminären Schrauben

Die Anwendung von ILS innerhalb der lumbalen Wirbelsäule setzt intakte posteriore Verhältnisse am Wirbelkörper, einen ausreichenden Laminaquerschnitt und anatomische Kenntnisse der Laminae voraus, um eine sichere Platzierung von ILS zu gewährleisten und Fehlplatzierungen, beispielsweise durch einen Übertritt der Schraube durch die ventrale Kortikalis mit dem Risiko einer Verletzung nervaler Strukturen zu vermeiden.

Die gewonnenen Daten könnten als Referenz für die zukünftige Anwendung von ILS dienen. In allen Lendenwirbelkörpern ist die Platzierung bilateraler ILS prinzipiell möglich. Die Dornfortsätze waren durchgehend ausreichend hoch, um zwei kreuzende Laminaschrauben aufzunehmen. Das anatomische Maß der Lamina, das für die Platzierung von ILS am kritischsten ist, ist der anteroposteriore Querschnitt der Lamina (Laminabreite). Bei LWK 5 fanden sich

## 5 Diskussion

---

bei beiden Geschlechtern am häufigsten geringe Laminabreiten, die eine Anwendung von ILS verhindern. Bei den Frauen zeigten sich bei LWK 4 ebenfalls häufig nur geringe Laminabreiten. Demgegenüber erlaubten die Dimensionen der Laminae von LWK 1 und LWK 2 bei den Frauen größere Schraubendurchmesser als die Pedikel. Folglich stellt die Anwendung von ILS bei Frauen im Fall hypoplastischer Pedikel bei LWK 1 und LWK 2 eine Alternative dar (s. Unterabs. 5.2.4 auf S. 66).

Die Winkelung der Trajektorien bei Laminaschrauben und die Lateralität der Eintrittspunkte unterscheiden sich von denen der Pedikelschrauben deutlich. Daher kommt es bei einer Kombination von Pedikelschrauben und ILS in benachbarten Segmenten zu einer großen Nähe der Schraubenköpfe. Zudem stehen die Schraubenköpfe nicht im gleichen lateralen Abstand zum Dornfortsatz, was bei mehrsegmentaler Instrumentierung das Einbringen eines Längsträgers deutlich erschwert. Die kombinierte Verwendung von ILS und Pedikelschrauben ist jedoch durch die Verwendung von sogenannten Offset Konnektoren technisch umsetzbar.

Einer vergleichenden Beurteilung von Laminalänge und Pedikellänge bzw. einem Vergleich der verwendbaren Schraubenlängen zwischen Lamina- und Pedikelschrauben sollten einige Vorüberlegungen vorangestellt werden.

Pedikelschrauben werden über den Pedikel bis in den Wirbelkörper eingebracht. Der Pedikel ist ein relativ kurzer Röhrenknochen, dessen spongiöser Raum in den spongiösen Wirbelkörper mündet. Untersuchungen der biomechanischen Belastbarkeit von Pedikelschrauben haben ergeben, dass die biomechanische Stabilität von Pedikelschrauben hauptsächlich über den Halt im Pedikel und weniger durch die Lage bzw. den Verlauf im Wirbelkörper entsteht<sup>59,60</sup>. Erst wenn die Pedikelschraube in die ventrale Kompakta des Wirbelkörpers vorgedrungen ist, steigt die biomechanische Festigkeit weiter an<sup>59,60</sup>.

Aus diesen und anderen Beobachtungen der Biomechanik wurde abgeleitet, dass die Stabilität vom Verhältnis des Durchmessers des Röhrenknochens zum Durchmesser der Schraube abhängt, und je besser eine Schraube den spongiösen Querschnitt ausfüllt, desto stabiler ist der Sitz des Implantats. Laminaschrauben verlaufen demgegenüber über die gesamte Länge in einem Röhrenknochen. Dadurch ist ihre biomechanische Festigkeit direkter von der eingebrachten Länge der Schraube abhängig. Die maximal verwendbare Schraubenlänge sowie der Schraubendurchmesser von Pedikelschrauben und Laminaschrauben sind daher nicht direkt vergleichbar. In der Studie wurden potentielle Schraubendurchmesser von 4,5 bzw. 5 mm angenommen in Anlehnung an vergleichbare Studien in anderen Wirbelsäulenabschnitten<sup>14,26,82</sup>. Ob diese Schraubendurchmesser für ILS an der Lendenwirbelsäule adäquat sind, ist bisher nicht untersucht. Tendenziell muss jedoch von einer höheren Belastung ausgegangen werden, je weiter lumbal die Instrumentierung durchgeführt wird.

Es liegen wenige biomechanische Studien bezüglich ILS vor. Für die LWS existieren bisher keine Studien. Die bisher verfügbaren Arbeiten konzentrieren sich auf zervikale ILS und umfassen relativ kurze Segmentkonstruktionen zwischen Atlas und Axis oder etwas längere zervikale Segmentkonstrukte mit ILS am Ende des Konstruktes<sup>65,103</sup>. Viele Studien haben die biomechanischen Eigenschaften von laminären Schrauben in der oberen BWS im Vergleich zu Pedikelschrauben betrachtet<sup>22,62,75</sup>. Anhand von neun Kadavern wurden BWK 1 und BWK 2 für Laminabreiten und Pedikelbreiten beschrieben und gleichzeitig biomechanische Eigenschaften bewertet<sup>22</sup>. Es wurden in dieser Arbeit jedoch keine weiteren thorakalen Wirbel bzw. lumbale Wirbel betrachtet. Jedoch wurde die biomechanische Stabilität von Pedikelschrauben und ILS an der oberen Brust- und unteren Halswirbelsäule als gleichwertig beschrieben<sup>49,63</sup>. Kretzer et al. schränkt jedoch ein, dass bei der Anwendung von Osteosynthesetechniken bei Verletzungen der Wirbelsäule in Bezug auf die Stabilität zwischen Zwei- und Dreisäulenverletzungen unterschieden werden muss<sup>62</sup>. Bei einer Zweisäulenverletzung zwischen HWK 7 und BWK 2 beschrieben Kretzer et. al, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen Pedikel- und ILS in Hinsicht auf die biomechanische Stabilität gab<sup>62</sup>. Bei einer Dreisäulenverletzung war bei beiden Methoden in axialer Rotation keine Unterschiede hinsichtlich der Stabilität feststellbar. Dennoch hatten Konstrukte mit Pedikelschrauben eine deutlich höhere Stabilität in Flexion und Extension im Gegensatz zu Konstrukten mit Laminaschrauben<sup>62</sup>. Eine zusätzliche anteriore Gegenstabilisation führte zu einer gleichwertigen Stabilität bei beiden Techniken<sup>62</sup>.

Lapsiwala et al. untersuchten an Kadavern die Steifigkeit von ILS-basierten Instrumentierungen und kamen zu dem umgekehrten Ergebnis, dass bei ILS eine ähnliche Rigidität wie bei Pedikelschrauben bezüglich Flexion und Extension bestünde, ILS aber weniger Widerstandskraft in der Rotation aufwiesen<sup>65</sup>.

Lehman et al. untersuchte anhand von zehn Kadavern die biomechanische Belastbarkeit und verglich Pedikelschrauben und ILS in Rotation, Flexion und Extension bei HWK 2, wobei kein Unterschied festgestellt werden konnte<sup>66</sup>.

Anhand von 13 Kadavern testete Ilgenfritz et al. die Belastbarkeit von ILS und Pedikelschrauben beim HWK 7 Wirbelkörper mittels eines Ausreißversuches und erhielt ebenfalls vergleichbare Werte<sup>49</sup>.

Die vorliegende Evidenz zur biomechanischen Belastbarkeit spricht für eine vergleichbare Stabilität von Pedikelschrauben und ILS für die untersuchten Anwendungsfälle in den untersuchten Wirbelsäulenabschnitten.

### Fazit

Die anatomischen Daten, die biomechanische Evidenz, sowie Evidenz aus untersuchten klini-

## 5 Diskussion

---

schen Anwendungen zeigen ILS als eine Alternative bei der spinalen Fixationstechnik, wenn Pedikelschrauben nicht zur Anwendung kommen können<sup>99</sup>. Als alternative Fixationsmöglichkeit ILS anzuwenden, ist bisher weltweit wenig verbreitet<sup>63,73,87</sup>. Durch die Beschreibung der anatomischen Verhältnisse der Laminae der Lendenwirbelkörper in Hinsicht auf eine anatomische Realisierbarkeit von ILS im Bereich der LWS kann diese Studie Grundlage für eine gezielte Anwendung sein. Das Einbringen der ILS ist technisch einfacher und ermöglicht dadurch eine steile Lernkurve<sup>14</sup>. Ein weiterer Vorteil von ILS ist, dass diese unter direkter Sicht platziert werden können<sup>63</sup>. Der Chirurg hat die Möglichkeit, die Eintrittspunkte und die Trajekturen zu sehen und diese mit direktem Austasten der anatomischen Verhältnisse zu identifizieren<sup>36,63,68</sup>. Dies macht auch den Einsatz eines Navigationssystems nicht erforderlich und die fluoroskopische Kontrolle häufig unnötig<sup>102</sup>.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der stabilisierenden Wirbelsäulenchirurgie ist es, einen ausreichend langfristigen, suffizienten Implantatsitz zu gewährleisten und damit den instrumentierten Wirbelsäulenabschnitt ruhigzustellen, um ein Abheilen der Pathologie bzw. eine knöcherne Fusion herbeizuführen. In einigen Fällen können jedoch Bedingungen vorliegen, die die standardmäßige Instrumentierung mit Pedikelschrauben verhindern. So können beispielsweise anatomische Varianten, vorherige transpedikuläre Zementanwendungen oder Lockerungen von zuvor angewendetem Osteosynthesematerial, die üblicherweise angewendete Stabilisierung mittels Pedikelschrauben in den betreffenden Wirbelkörpern unmöglich machen. Vor dem Hintergrund der hohen, beziehungsweise weiter steigenden Zahlen an Wirbelsäuleneingriffen, sind alternative Instrumentierungstechniken zunehmend gefragt. Dabei stellt die Platzierung von intralaminären Schrauben zur Osteosynthese von Wirbelkörpern eine mögliche Alternative zu Pedikelschrauben dar.

Zur Beschreibung der Anatomie der Laminae wurden anhand von Selektionskriterien ausgewählte anonymisierte Computertomographien mittels einer Planungs- und Analysesoftware für radiologische Bildgebungen nach Kriterien für die Platzierung von ILS vermessen. Dabei wurden die Wirbelkörperlaminae, die Dornfortsätze und zum Vergleich die Pedikel analysiert und ausgewertet und zur Qualitätssicherung die Richtigkeit und Reproduzierbarkeit der erhobenen Daten gezeigt.

Die vergleichenden statistischen Analysen zeigten, dass intralaminäre Schrauben eine alternative Fixierungsmöglichkeit im Lendenwirbelsäulenbereich darstellen können. Mehr als 90% der Laminae aller Lendenwirbelkörper hatten eine Länge über 30 mm bei beiden Geschlechtern. Dadurch ist die Laminalänge für eine Anwendung im gesamten Lendenwirbelsäulenbereich möglich. Jedoch zeigten sich für die Laminabreiten Limitationen. Bei LWK 4 (57,1%) und LWK 5 (46,9%) bei den Frauen und bei LWK 5 (67,3%) bei den Männern waren bedeutsame Anteile der Laminae mit geringen Breiten unter 5 mm messbar. Im Vergleich zu den standardmäßig zur Instrumentierung belegten Pedikeln hatten die Lamina vom LWK 1 und vom LWK 2 bei dem weiblichen Geschlecht im Durchschnitt einen größeren Querschnitt. Demgegenüber fanden sich bei LWK 4 und LWK 5 bei den Frauen und bei LWK 5 bei den Männern in einem bedeutsamen Anteil der Fälle zu kleine Querschnitte der Laminae, um eine Instrumentierung zu ermöglichen. Diese Einschränkung könnte im Vorfeld anhand einer Bildgebung überprüft wer-

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

den, um festzustellen, ob intralaminäre Schrauben bei dem jeweiligen Patienten, im Gegensatz zu der etablierten Methode der Pedikelschraubenfixierung, platzierbar und möglich sind. In der Mehrzahl der Fälle kann bei einer Hypoplasie der Pedikel oder Laminae auf die jeweils andere Struktur ausgewichen werden.

Biomechanische und klinische Langzeitstudien sollten vor dem Einsatz von intralaminären Schrauben erfolgen, um die technische Machbarkeit und den Nutzen von intralaminären Schrauben an der Lendenwirbelsäule zu beurteilen. Die vorgelegte anatomisch-radiologische Studie der lumbalen Laminae kann als Referenz für zukünftige Anwendungen dienen.

# Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria. 7
Abb.	Abbildung. 13–15, 17–20, 22, 25–27, 32, 36, 38, 50, 53, 59
Abs.	Abschnitt. 25, 38, 63, 64
BWS	Brustwirbelsäule. 1, 8, 69
bzw.	beziehungsweise. 1, 3, 4, 32, 53, 64, 69, 71
ca.	circa. 4
cm	Zentimeter. 27–30, 33–35, 53, 55–58, 64
CT	Computertomographie. 11, 23, 53, 63–65
et al.	und andere. 5, 6, 64, 65, 69
FSU	Functional Spine Unit. 2
HWK	Halswirbelkörper. 7, 8
HWS	Halswirbelsäule. 7, 8
ILS	Intralaminäre Schrauben. vii, 7–9, 11, 13, 14, 18, 59, 63, 65–72
Lig.	Ligamentum. 2
LWK	Lendenwirbelkörper. 2, 4, 9, 13, 27, 28, 32–39, 50, 53, 59, 65, 68, 71
LWS	Lendenwirbelsäule. 1, 4–6, 8, 9, 11, 13, 65, 66, 69, 70, 72

## Abkürzungsverzeichnis

---

mm	Millimeter. x, xi, 6, 11, 32, 33, 38, 39, 41, 50, 53, 55–61, 65
S.	Seite. 13–15, 17–20, 22, 25–27, 32, 33, 36, 38, 50, 53, 59
s.	siehe. 13–15, 17–20, 25–27, 32, 33, 36, 38, 50, 53, 59, 64, 68
SA	Standardabweichung. 25, 26, 29, 30, 32, 33, 36, 38–41, 44, 50, 51
SWK	Sakralwirbelkörper. 2
Tab.	Tabelle. 26, 27, 32, 33, 36, 38, 50, 53, 66
TLS	Translaminäre Schrauben. 7
Unterabs.	Unterabschnitt. 32, 68
vs.	versus. xi, 23, 41, 54
WHO	Weltgesundheitsorganisation. 3
z.B.	zum Beispiel. 6



# Literaturverzeichnis

- [1] ADAMS, M. A., FREEMAN, B. J. C., MORRISON, H. P., NELSON, I. W., AND DOLAN, P. Mechanical Initiation of Intervertebral Disc Degeneration. *Spine* 25, 13, 1625.
- [2] AEBI, M., ETTER, C., KEHL, T., AND THALGOTT, J. The internal skeletal fixation system. A new treatment of thoracolumbar fractures and other spinal disorders. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 227 (Feb. 1988), 30–43.
- [3] AKASH J PATEL, JACOB CHERIAN, DANIEL H FULKERSON, BENJAMIN D FOX, JOSHUA J CHERN, WILLIAM E WHITEHEAD, DANIEL J CURRY, THOMAS G LUERSSSEN, AND ANDREW JEA. Computed tomography morphometric analysis for translaminar screw fixation in the upper thoracic spine of the pediatric population. *dx.doi.org* 7, 4 (Apr. 2011), 383–388.
- [4] ALVIN, M. D., ABDULLAH, K. G., STEINMETZ, M. P., LUBELSKI, D., NOWACKI, A. S., BENZEL, E. C., AND MROZ, T. E. Translaminar Screw Fixation in the Subaxial Cervical Spine: Quantitative Laminar Analysis and Feasibility of Unilateral and Bilateral Translaminar Virtual Screw Placement. *Spine* 37, 12 (May 2012), E745–E751.
- [5] AMIOT, L.-P., LANG, K., PUTZIER, M., ZIPPEL, H., AND LABELLE, H. Comparative Results Between Conventional and Computer-Assisted Pedicle Screw Installation in the Thoracic, Lumbar, and Sacral Spine. *Spine* 25, 5 (Mar. 2000), 606–614.
- [6] ARAND, M., HARTWIG, E., HEBOLD, D., KINZL, L., AND GEBHARD, F. Präzisionsanalyse navigationsgestützt implantierter thorakaler und lumbaler Pedikelschrauben Eine prospektive klinische Studie. *Der Unfallchirurg* 104, 11 (2001), 1076–1081.
- [7] ATTAR, A., UGUR, H. C., UZ, A., TEKDEMIR, I., EGEMEN, N., AND GENÇ, Y. Lumbar pedicle: surgical anatomic evaluation and relationships. *European Spine Journal* 10, 1 (Feb. 2001), 10–15.

## Literaturverzeichnis

---

- [8] BARNES, D., STEMPER, B. D., YOGANANAN, N., BAISDEN, J. L., AND PINTAR, F. A. Normal coupling behavior between axial rotation and lateral bending in the lumbar spine - biomed 2009. *Biomedical sciences instrumentation* 45 (2009), 131–136.
- [9] BEGGS, I., AND ADDISON, J. Posterior vertebral rim fractures. *The British Journal of Radiology* 71, 845 (Jan. 2014), 567–572.
- [10] BHATNAGAR, R., YU, W. D., BERGIN, P. F., MATTEINI, L. E., AND O'BRIEN, J. R. The anatomic suitability of the C2 vertebra for intralaminar and pedicular fixation: a computed tomography study. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 10, 10 (Oct. 2010), 896–899.
- [11] BLATTERT, P. D. M. T. R., AND BÜHREN, P. D. M. V. Frakturen der unteren LWS (L3 bis L5). In *Chirurgie der verletzten Wirbelsäule*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 245–266.
- [12] BOHLMAN, H. H. Treatment of fractures and dislocations of the thoracic and lumbar spine. *American Journal of Surgery* 67, 1 (Jan. 1985), 165.
- [13] BONNAIRE, F., AND RÖHL, H. Epidemiologie und historischer Abriss der Behandlung. *Trauma und Berufskrankheit* 7, 2 (2005), S334–S339.
- [14] BÖRM, W., MEYER, F., BULLMANN, V., AND KNOP, C. *Wirbelsäule interdisziplinär. Operative und konservative Therapie*. Schattauer Verlag, Mar. 2017.
- [15] BOUCHER, H. H. A method of spinal fusion. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 41-B, 2 (May 1959), 248–259.
- [16] BRADFORD, D. S., AND IZA, J. Repair of the defect in spondylolysis or minimal degrees of spondylolisthesis by segmental wire fixation and bone grafting. *Spine* 10, 7 (Sept. 1985), 673–679.
- [17] BRAGA, B. P., MORAIS, J. V. D., AND VILELA, M. D. Free-hand placement of high thoracic pedicle screws with the aid of fluoroscopy: evaluation of positioning by CT scans in a four-year consecutive series. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria* 68, 3, 390–395.
- [18] BUCK, J. E. Direct repair of the defect in spondylolisthesis. preliminary report. *J Bone Joint Surg Br* 52, 3 (Aug 1970), 432–7.
- [19] BÜHREN, V., AND JOSTEN, C. Chirurgie der verletzten Wirbelsäule . *Springer Verlag* (Oct. 2012), 1–454.

- [20] CAMILO MOLINA, DANIEL M SCIUBBA, CHRISTOPHER CHAPUT, P JUSTIN TORTOLANI, GEORGE I JALLO, AND RYAN M KRETZER. A computed tomography–based feasibility study of translaminar screw placement in the pediatric thoracic spine. *dx.doi.org* 9, 1 (Dec. 2011), 27–34.
- [21] CARBONE, J. J., TORTOLANI, P. J., AND QUARTARARO, L. G. Fluoroscopically assisted pedicle screw fixation for thoracic and thoracolumbar injuries: technique and short-term complications. *Spine* 28, 1 (Jan. 2003), 91–97.
- [22] CARDOSO, M. J., DMITRIEV, A. E., LEHMAN, R. A., HELGESON, M., COOPER, P., AND ROSNER, M. K. Computed Tomography and Biomechanical Evaluation of Screw Fixation Options at the Cervicothoracic Junction. *Spine* 33, 24 (Nov. 2008), 2612–2617.
- [23] CASTRO, W. H., HALM, H., JEROSCH, J., MALMS, J., STEINBECK, J., AND BLASIUS, S. Accuracy of pedicle screw placement in lumbar vertebrae. *Spine* 21, 11 (June 1996), 1320–1324.
- [24] CHAMOUN, R. B., RELYEA, K. M., JOHNSON, K. K., WHITEHEAD, W. E., CURRY, D. J., LUERSSSEN, T. G., DRAKE, J. M., AND JEA, A. Use of axial and subaxial translaminar screw fixation in the management of upper cervical spine instability in a series of 7 children. *Neurosurgery* 64, 4 (Apr. 2009), 734–739.
- [25] CHERN, J. J., CHAMOUN, R. B., WHITEHEAD, W. E., CURRY, D. J., LUERSSSEN, T. G., AND JEA, A. Computed tomography morphometric analysis for axial and subaxial translaminar screw placement in the pediatric cervical spine. *J Neurosurg Pediatr* 3, 2 (Feb 2009), 121–8.
- [26] DEAN, C. L., LEE, M. J., ROBBIN, M., AND CASSINELLI, E. H. Correlation between computed tomography measurements and direct anatomic measurements of the axis for consideration of c2 laminar screw placement. *Spine J* 9, 3 (Mar 2009), 258–62.
- [27] DENIS, F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine* 8, 8 (Nov. 1983), 817–831.
- [28] DICK, W. The "fixateur interneäs a versatile implant for spine surgery. *Spine* 12, 9 (Nov. 1987), 882–900.
- [29] DICK, W. *Internal fixation of thoracic and lumbar spine fractures*. Verlag Hans Huber, Bern, 1989.

- [30] DICK, W., AND RICKERT, M. Geschichte des Fixateur interne. *Der Unfallchirurg* 118, 1 (2015), 66–72.
- [31] DICKMAN, C. A., FESSLER, R. G., MACMILLAN, M., AND HAID, R. W. Transpedicular screw-rod fixation of the lumbar spine: operative technique and outcome in 104 cases. *Journal of neurosurgery* 77, 6 (Dec. 1992), 860–870.
- [32] DORWARD, I. G., AND WRIGHT, N. M. Seven Years of Experience With C2 Translaminar Screw Fixation: Clinical Series and Review of the Literature. *Neurosurgery* 68, 6 (June 2011), 1491–1499.
- [33] EBRAHEIM, N. A., ROLLINS, JR, J. R., XU, R., AND YEASTING, R. A. Projection of the lumbar pedicle and its morphometric analysis. *Spine (Phila Pa 1976)* 21, 11 (Jun 1996), 1296–300.
- [34] FELDMANN, P. H., AND WITTENBERG, R. H. Geschichte der Behandlung von Wirbelsäulenerkrankungen. *Der Orthopäde* 30, 10 (Oct. 2001), 776–783.
- [35] FUJII, R., SAKAURA, H., MUKAI, Y., HOSONO, N., ISHII, T., IWASAKI, M., YOSHIKAWA, H., AND SUGAMOTO, K. Kinematics of the lumbar spine in trunk rotation: in vivo three-dimensional analysis using magnetic resonance imaging. *European Spine Journal* 16, 11 (June 2007), 1867–1874.
- [36] GARDNER, A., MILLNER, P., LIDDINGTON, M., AND TOWNS, G. Translaminar screw fixation of a kyphosis of the cervical and thoracic spine in neurofibromatosis. *Bone & Joint Journal* 91-B, 9 (Sept. 2009), 1252–1255.
- [37] GERTZBEIN, S. D., AND ROBBINS, S. E. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine* 15, 1 (Jan. 1990), 11–14.
- [38] GIORDANO, B. D., BAUMHAUER, J. F., MORGAN, T. L., AND RECHTINE, G. R. Cervical spine imaging using standard c-arm fluoroscopy: patient and surgeon exposure to ionizing radiation. *Spine (Phila Pa 1976)* 33, 18 (Aug 2008), 1970–6.
- [39] GIORDANO, B. D., BAUMHAUER, J. F., MORGAN, T. L., AND RECHTINE, 2ND, G. R. Cervical spine imaging using mini-c-arm fluoroscopy: patient and surgeon exposure to direct and scatter radiation. *J Spinal Disord Tech* 22, 6 (Aug 2009), 399–403.
- [40] GIORDANO, B. D., BAUMHAUER, J. F., MORGAN, T. L., AND RECHTINE, 2ND, G. R. Patient and surgeon radiation exposure: comparison of standard and mini-c-arm fluoroscopy. *J Bone Joint Surg Am* 91, 2 (Feb 2009), 297–304.

- [41] GIORDANO, B. D., GRAUER, J. N., MILLER, C. P., MORGAN, T. L., AND RECHTINE, 2ND, G. R. Radiation exposure issues in orthopaedics. *J Bone Joint Surg Am* 93, 12 (Jun 2011), e69(1–10).
- [42] GREINER-PERTH, R., BOEHM, H., ALLAM, Y., ELSAGHIR, H., AND FRANKE, J. Re-operation rate after instrumented posterior lumbar interbody fusion: a report on 1680 cases. *Spine* 29, 22 (Nov. 2004), 2516–2520.
- [43] GROB, D., AND HUMKE, T. Translaminar screw fixation in the lumbar spine: technique, indications, results. *European Spine Journal* 7, 3 (1998), 178–186.
- [44] HAAKER, R. G., EICKHOFF, U., SCHOPPHOFF, E., STEFFEN, R., JERGAS, M., AND KRÄMER, J. Verification of the position of pedicle screws in lumbar spinal fusion. *European Spine Journal* 6, 2 (1997), 125–128.
- [45] HARSTALL, R., HEINI, P. F., MINI, R. L., AND ORLER, R. Radiation exposure to the surgeon during fluoroscopically assisted percutaneous vertebroplasty: a prospective study. *Spine (Phila Pa 1976)* 30, 16 (Aug 2005), 1893–8.
- [46] HEMPFING, A., ZENNER, J., FERRARIS, L., MEIER, O., AND KOLLER, H. [restoration of sagittal balance in treatment of thoracic and lumbar vertebral fractures]. *Orthopade* 40, 8 (Aug 2011), 690–702.
- [47] HONG, J. T., SUNG, J. H., SON, B. C., LEE, S. W., AND PARK, C. K. Significance of laminar screw fixation in the subaxial cervical spine. *Spine* 33, 16 (July 2008), 1739–1743.
- [48] HOSTEN, N., AND LIEBIG, T. *Computertomographie von Kopf und Wirbelsäule*. Georg Thieme Verlag, 2007.
- [49] ILGENFRITZ, R. M., GANDHI, A. A., FREDERICKS, D. C., GROSLAND, N. M., AND SMUCKER, J. D. Considerations for the use of c7 crossing laminar screws in subaxial and cervicothoracic instrumentation. *Spine (Phila Pa 1976)* 38, 4 (Feb 2013), E199–204.
- [50] JEROSCH, J., MALMS, J., CASTRO, W. H. M., WAGNER, R., AND WIESNER, L. Lagekontrolle von Pedikelschrauben nach instrumentierter dorsaler Fusion der Lendenwirbelsäule. *Zeitschrift für Orthopadie und ihre Grenzgebiete* 130, 06 (Mar. 2008), 479–483.
- [51] JUNGHANNS, H. Die funktionelle Pathologie der Zwischenwirbelscheiben als Grundlage für klinische Betrachtungen. *Langenbecks Archiv für klinische Chirurgie* 267, 1 (1951), 393–417.

- [52] JUTTE, P., AND CASTELEIN, R. Complications of pedicle screws in lumbar and lumbosacral fusions in 105 consecutive primary operations. *European Spine Journal* 11, 6 (Oct. 2002), 594–598.
- [53] KAMIMURA, M., EBARA, S., ITOH, H., TATEIWA, Y., KINOSHITA, T., AND TAKAOKA, K. Cervical Pedicle Screw Insertion: Assessment of Safety and Accuracy with Computer-Assisted Image Guidance. *Clinical Spine Surgery* 13, 3 (June 2000), 218.
- [54] KING, D. Internal fixation for lumbosacral fusion. *The American Journal of Surgery* 66, 3 (Dec. 1944), 357–361.
- [55] KINNARD, P., GHIBELY, A., GORDON, D., TRIAS, A., AND BASORA, J. Roy-Camille plates in unstable spinal conditions. A preliminary report. *Spine* 11, 2 (Mar. 1986), 131–135.
- [56] KOMURCU, E., KAYMAZ, B., ADAM, G., GOLGE, U. H., GOKSEL, F., AND OZDEN, R. Safety and feasibility of lumbar spine for intralaminar screw fixation: Computed tomography based morphometric study. *Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica* 49, 5 (2015), 522–529.
- [57] KOSE, K. C., INANMAZ, M. E., ATMACA, H., BASAR, H., ISIK, C., AND BAL, E. The Use of Intralaminar Screws in Patients With Spinal Deformity. *Journal of spinal disorders & techniques* 26, 8 (Dec. 2013), E299–E305.
- [58] KOSMOPOULOS, V., AND SCHIZAS, C. Pedicle Screw Placement Accuracy. *Spine* 32, 3 (Feb. 2007), E111–E120.
- [59] KRAG, M. H., BEYNNON, B. D., POPE, M. H., AND DECOSTER, T. A. Depth of insertion of transpedicular vertebral screws into human vertebrae: effect upon screw-vertebra interface strength. *J Spinal Disord* 1, 4 (1988), 287–94.
- [60] KRAG, M. H., WEAVER, D. L., BEYNNON, B. D., AND HAUGH, L. D. Morphometry of the thoracic and lumbar spine related to transpedicular screw placement for surgical spinal fixation. *Spine (Phila Pa 1976)* 13, 1 (Jan 1988), 27–32.
- [61] KRÄMER, R., MATUSSEK, J., AND THEODORIDIS, T. *Bandscheibenbedingte Erkrankungen*. Ursachen, Diagnose, Behandlung, Vorbeugung, Begutachtung. Georg Thieme Verlag, Dec. 2013.

- [62] KRETZER, R. M., HU, N., KIKKAWA, J., GARONZIK, I. M., JALLO, G. I., TORTOLANI, P. J., MCAFEE, P. C., AND CUNNINGHAM, B. W. Surgical management of two-versus three-column injuries of the cervicothoracic junction: biomechanical comparison of translaminar screw and pedicle screw fixation using a cadaveric model. *Spine* 35, 19 (Sept. 2010), E948–54.
- [63] KRETZER, R. M., SCIUBBA, D. M., BAGLEY, C. A., WOLINSKY, J.-P., GOKASLAN, Z. L., AND GARONZIK, I. M. Translaminar screw fixation in the upper thoracic spine. *Journal of neurosurgery. Spine* 5, 6 (Dec. 2006), 527–533.
- [64] LAINE, T., MÄKITALO, K., SCHLENZKA, D., TALLROTH, K., POUSSA, M., AND ALHO, A. Accuracy of pedicle screw insertion: a prospective CT study in 30 low back patients. *European Spine Journal* 6, 6 (1997), 402–405.
- [65] LAPSIWALA, S. B., ANDERSON, P. A., OZA, A., AND RESNICK, D. K. Biomechanical Comparison of Four C1 to C2 Rigid Fixative Techniques: Anterior Transarticular, Posterior Transarticular, C1 to C2 Pedicle, and C1 to C2 Intralaminar Screws. *Neurosurgery* 58, 3 (Mar. 2006), 516–521.
- [66] LEHMAN, R. A., DMITRIEV, A. E., AND WILSON, K. W. Biomechanical analysis of the C2 intralaminar fixation technique using a cross-link and offset connector for an unstable atlantoaxial joint. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 12, 2 (Feb. 2012), 151–156.
- [67] LEKOVIC, G. P., POTTS, E. A., KARAHALIOS, D. G., AND HALL, G. A comparison of two techniques in image-guided thoracic pedicle screw placement: a retrospective study of 37 patients and 277 pedicle screws. *Journal of neurosurgery. Spine* 7, 4 (Oct. 2007), 393–398.
- [68] LEWIS, S. J., CANAVESE, F., AND KEETBAAS, S. Intralaminar Screw Insertion of Thoracic Spine in Children With Severe Spinal Deformities. *Spine* 34, 7 (Apr. 2009), E251–E254.
- [69] LINDEMANN-SPERFELD L., H. A. *Operative Therapie von Wirbelkörpermetastasen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [70] LOTZ, J. C., AND CHIN, J. R. Intervertebral Disc Cell Death Is Dependent on the Magnitude and Duration of Spinal Loading. *Spine* 25, 12 (June 2000), 1477.

- [71] MAGERL, F. P. Stabilization of the Lower Thoracic and Lumbar Spine with External Skeletal Fixation. *Clinical Orthopaedics and Related Research &NA;*, 189 (Oct. 1984), 125–141.
- [72] MANDEL, I. M., KAMBACH, B. J., PETERSILGE, C. A., JOHNSTONE, B., AND YOO, J. U. Morphologic considerations of c2 isthmus dimensions for the placement of transarticular screws. *Spine (Phila Pa 1976)* 25, 12 (Jun 2000), 1542–7.
- [73] MARCO TÚLIO REIS, ERIC W NOTTMEIER, PHILLIP M REYES, SEUNGWON BAEK, AND NEIL R CRAWFORD. Biomechanical analysis of a novel hook-screw technique for C1–2 stabilization. *dx.doi.org* 17, 3 (Aug. 2012), 220–226.
- [74] MARIO J CARDOSO, ANTON E DMITRIEV, MELVIN D HELGESON, FREDERICK STEPHENS, VICTORIA CAMPBELL, RONALD A LEHMAN, PATRICK COOPER, AND MICHAEL K ROSNER. Using lamina screws as a salvage technique at C-7: computed tomography and biomechanical analysis using cadaveric vertebrae. *dx.doi.org* 11, 1 (June 2009), 28–33.
- [75] MCGIRT, M. J., SUTTER, E. G., XU, R., SCIUBBA, D. M., WOLINSKY, J.-P., WITHAM, T. F., GOKASLAN, Z. L., AND BYDON, A. Biomechanical Comparison of Translaminar Versus Pedicle Screws at T1 and T2 in Long Subaxial Cervical Constructs. *Operative Neurosurgery* 65 (Dec. 2009), ons167–ons172.
- [76] MERLOZ, P., TONETTI, J., CINQUIN, P., LAVALLÉE, S., TROCCAZ, J., AND PITTET, L. [Computer-assisted surgery: automated screw placement in the vertebral pedicle]. *Chirurgie; memoires de l'Academie de chirurgie* 123, 5 (Nov. 1998), 482–490.
- [77] MERLOZ, P., TONETTI, J., PITTET, L., COULOMB, M., LAVALLE, S., AND SAUTOT, P. Pedicle Screw Placement Using Image Guided Techniques. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 354 (Sept. 1998), 39–48.
- [78] MEYER, D., MEYER, F., KRETSCHMER, T., AND BÖRM, W. Translaminar screws of the axis—an alternative technique for rigid screw fixation in upper cervical spine instability. *Neurosurgical review* 35, 2 (Apr. 2012), 255–61– discussion 261.
- [79] MILLER, J. A., SCHMATZ, C., AND SCHULTZ, A. B. Lumbar disc degeneration: correlation with age, sex, and spine level in 600 autopsy specimens. *Spine* 13, 2 (Feb. 1988), 173–178.



- [80] MOK, J. M., CLOYD, J. M., BRADFORD, D. S., HU, S. S., DEVIREN, V., SMITH, J. A., TAY, B., AND BERVEN, S. H. Reoperation after primary fusion for adult spinal deformity: rate, reason, and timing. *Spine (Phila Pa 1976)* 34, 8 (Apr 2009), 832–9.
- [81] MOSKOPP, D., AND WASSMANN, H. *Neurochirurgie*. Handbuch für die Weiterbildung und interdisziplinäres Nachschlagewerk. Schattauer Verlag, Dec. 2014.
- [82] MÜLLER, J., MÜLLER, J.-U., KOPPE, T., NOWAK, S., SCHROEDER, H. W. S., AND BALDAUF, J. A radiological and anatomic examination of intralaminar screws in the thoracic spine—a theoretical feasibility study. *Acta Neurochir (Wien)* 160, 11 (11 2018), 2229–2236.
- [83] MUTSCHLER, W.-E., KOHN, D., AND POHLEMANN, T. *Praxis der Orthopädie und Unfallchirurgie*. Georg Thieme Verlag, Dec. 2013.
- [84] OKUDA, S., MIYAUCHI, A., ODA, T., HAKU, T., YAMAMOTO, T., AND IWASAKI, M. Surgical complications of posterior lumbar interbody fusion with total facetectomy in 251 patients. *Journal of neurosurgery. Spine* 4, 4 (Apr. 2006), 304–309.
- [85] PADUA, M. R. A., YEOM, J. S., EM, H. T., KIM, H.-J., CHANG, B.-S., LEE, C.-K., AND RIEW, K. D. Feasibility of laminar screw placement in the upper thoracic spine: analysis using 3-dimensional computed tomographic simulation. *Spine* 38, 13 (June 2013), 1146–1153.
- [86] PEARCY, M. J., AND TIBREWAL, S. B. Axial rotation and lateral bending in the normal lumbar spine measured by three-dimensional radiography. *Spine* 9, 6 (Sept. 1984), 582–587.
- [87] ROBERTO, R., DEZFULI, B., DEUEL, C., CURTISS, S., AND HAZELWOOD, S. A biomechanical comparison of three spondylolysis repair techniques in a calf spine model. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 99, 1 (Feb. 2013), 66–71.
- [88] ROBERTO MASFERRER, CARLOS H GOMEZ, DEAN G KARAHALIOS, AND VOLKER K H SONNTAG. Efficacy of pedicle screw fixation in the treatment of spinal instability and failed back surgery: a 5-year review. *dx.doi.org* 89, 3 (June 2009), 371–377.
- [89] ROMPE, J. D., EYSEL, P., AND HOPF, C. Clinical efficacy of pedicle instrumentation and posterolateral fusion in the symptomatic degenerative lumbar spine. *European Spine Journal* 4, 4 (1995), 231–237.

- [90] ROY-CAMILLE, R. Osteosynthese du rachis dorsal, lombaire et lombo-sacre par plaques metalliques vissees dans les pedicules vertebraux et les apophyses articulaires. *Presse Med* 78 (1970), 1447.
- [91] ROY-CAMILLE, R., SAILLANT, G., AND MAZEL, C. Internal fixation of the lumbar spine with pedicle screw plating. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 203 (Feb. 1986), 7–17.
- [92] RYAN M KRETZER, CHRISTOPHER CHAPUT, DANIEL M SCIUBBA, IRA M GARONZIK, GEORGE I JALLO, PAUL C MCAFEE, BRYAN W CUNNINGHAM, AND P JUSTIN TORTOLANI. A computed tomography–based feasibility study of translaminar screw fixation in the upper thoracic spine. *dx.doi.org* 12, 3 (Feb. 2010), 286–292.
- [93] RYAN M KRETZER, CHRISTOPHER CHAPUT, DANIEL M SCIUBBA, IRA M GARONZIK, GEORGE I JALLO, PAUL C MCAFEE, BRYAN W CUNNINGHAM, AND P JUSTIN TORTOLANI. A computed tomography–based feasibility study of translaminar screw fixation in the upper thoracic spine. *dx.doi.org* 12, 3 (Feb. 2010), 286–292.
- [94] SCIUBBA, D. M., NOGGLE, J. C., VELLIMANA, A. K., CONWAY, J. E., KRETZER, R. M., LONG, D. M., AND GARONZIK, I. M. Laminar screw fixation of the axis. *J Neurosurg Spine* 8, 4 (Apr 2008), 327–34.
- [95] SHIN, S. I., YEOM, J. S., KIM, H.-J., CHANG, B.-S., LEE, C.-K., AND RIEW, K. D. The feasibility of laminar screw placement in the subaxial spine: analysis using 215 three-dimensional computed tomography scans and simulation software. *The Spine Journal* 12, 7 (July 2012), 577–584.
- [96] SJÖSTRÖM, L., JACOBSSON, O., KARLSTRÖM, G., PECH, P., AND RAUSCHNING, W. Ct analysis of pedicles and screw tracts after implant removal in thoracolumbar fractures. *J Spinal Disord* 6, 3 (Jun 1993), 225–31.
- [97] SŁOMCZYKOWSKI, M., ROBERTO, M., SCHNEEBERGER, P., OZDOBA, C., AND VOCK, P. Radiation dose for pedicle screw insertion. fluoroscopic method versus computer-assisted surgery. *Spine (Phila Pa 1976)* 24, 10 (May 1999), 975–82; discussion 983.
- [98] THEOCHAROPOULOS, N., PERISINAKIS, K., DAMILAKIS, J., PAPADOKOSTAKIS, G., HADJIPAVLOU, A., AND GOURTISOYIANNIS, N. Occupational exposure from common fluoroscopic projections used in orthopaedic surgery. *J Bone Joint Surg Am* 85, 9 (Sep 2003), 1698–703.

- [99] UĞUR, H. Ç., ATTAR, A., UZ, A., TEKDEMİR, İ., EGEMEN, N., AND GENÇ, Y. Thoracic Pedicle: Surgical Anatomic Evaluation and Relations. *Journal of Spinal Disorders* 14, 1 (Feb. 2001), 39–45.
- [100] UHLENBROCK, D. *MR Imaging of the Spine and Spinal Cord*. Thieme, Stuttgart, Jan. 2011.
- [101] UL HAQUE, M., SHUFFLEBARGER, H. L., O'BRIEN, M., AND MACAGNO, A. Radiation exposure during pedicle screw placement in adolescent idiopathic scoliosis: is fluoroscopy safe? *Spine (Phila Pa 1976)* 31, 21 (Oct 2006), 2516–20.
- [102] WANG, M. Y. Cervical Crossing Laminar Screws: Early Clinical Results and Complications. *Operative Neurosurgery* 61 (Nov. 2007), ONS311–ONS316.
- [103] WRIGHT, N. M. Posterior C2 Fixation Using Bilateral, Crossing C2 Laminar Screws. *Journal of Spinal Disorders* 17, 2 (Apr. 2004), 158–162.
- [104] WRIGHT, N. M. Translaminar rigid screw fixation of the axis. Technical note. *Journal of neurosurgery. Spine* 3, 5 (Nov. 2005), 409–414.
- [105] ZUCHERMAN, J., HSU, K., WHITE, A., AND WYNNE, G. Early results of spinal fusion using variable spine plating system. *Spine* 13, 5 (May 1988), 570–579.



# Danksagung

Sehr herzlich möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. med. Henry Schroeder für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit in seiner Klinik und das damit in mich gesetzte Vertrauen bedanken.

Meinem jederzeit ansprechbaren Betreuer, Herrn PD Dr. med. Jörg Baldauf, der mich fachlich engagiert immer unterstützte, mir Mut und Motivation gab, danke ich von ganzem Herzen.

Herr Dr. med. Jan-Uwe Müller und Herr Dr. med. Jonas Müller begleiteten mich mit ihrer Begeisterung für das interessante Thema und leisteten konstruktive Vorarbeit, für die ich mich herzlich bedanke.

Ebenso danke ich Herrn Professor Dr. med. dent. Thomas Koppe für die Beteiligung an dieser Arbeit.

Für die externe Übernahme zur Begutachtung dieser Arbeit möchte ich ebenfalls herzlichen Dank sagen.

Meiner Familie, die mich begleitet und unterstützte, gebührt ein Herzliches Hab Dank!