

**Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie  
der Universität zu Köln  
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. P. Eysel**

**Computertomographie-basierte Analyse der Dornfortsätze und  
interspinösen Abstände der Lendenwirbelsäule**

**Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde  
der Hohen Medizinischen Fakultät  
der Universität zu Köln**

**vorgelegt von  
Thomas Kreitz  
aus Simmerath**

**promoviert am  
24. Juli 2013**

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln  
im Juli 2013 bei Copy-Star Druck und Werbung GmbH, 50937 Köln

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. Dr. h. c. Th. Krieg

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. med. R. Sobottke

2. Berichterstatter: Universitätsprofessor Dr. med. R. Goldbrunner

### **Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Köln, den 14.02.2013 Thomas Kreitz



Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Patientendaten betreffend Geschlecht, Alter, Größe, Gewicht und BMI wurden ohne meine Mitarbeit in dem Institut für Radiologische Diagnostik der Universität zu Köln ermittelt.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Messergebnisse sind nach entsprechender Anleitung durch Herrn Privatdozent Dr. Bangard und Herrn Privatdozent Dr. Sobottke von mir selbst ausgeführt worden.



# Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Direktor Universitätsprofessor Dr. med. Peer Eysel dafür, dass er mir die Promotion an seiner Klinik ermöglicht hat.

Ganz besonders danke ich meinem Doktorvater Herrn Privatdozent Dr. med. Rolf Sobottke für die Überlassung des Themas, die exzellente Betreuung und die ausdauernde Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Ein spezieller Dank geht an das Institut für radiologische Diagnostik der Universität zu Köln, insbesondere Herrn Privatdozent Dr. med. Christopher Bangard, für die konstruktiven Anregungen zur Auswertung der Bilder und die unkomplizierte Nutzung der CT-Schalträume.

Myriam Probst danke ich für alle Hilfe bei der graphischen Umsetzung.

Als letztes danke ich meinen Eltern, dass sie mir ermöglicht haben Arzt zu werden.



# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abkürzungsverzeichnis .....                   | 10 |
| 1. Einleitung .....                           | 11 |
| 1.1 Die Anatomie der Wirbelsäule.....         | 11 |
| 1.2 Die lumbale Spinalkanalstenose (LSS)..... | 14 |
| 1.2.1 Definiton .....                         | 14 |
| 1.2.2 Pathophysiologie.....                   | 15 |
| 1.2.3 Diagnostik .....                        | 15 |
| 1.2.4 Differenzialdiagnosen.....              | 16 |
| 1.2.5 Therapie.....                           | 16 |
| Konservativ .....                             | 16 |
| Operativ .....                                | 16 |
| 1.3 Ziel dieser Studie .....                  | 18 |
| 2. Material und Methoden.....                 | 19 |
| 2.1 Patienten .....                           | 19 |
| 2.2 Analyse der CT-Bildsätze .....            | 19 |
| 3. Ergebnisse .....                           | 23 |
| 3.1 Das Patientenkollektiv .....              | 23 |
| 3.2 Die Corticalis-Dicke .....                | 23 |
| 3.3 Der interspinöse Abstand.....             | 25 |
| 4. Diskussion .....                           | 29 |
| 5. Zusammenfassung .....                      | 33 |
| 6. Literaturverzeichnis .....                 | 35 |
| 7. Lebenslauf .....                           | 41 |

# Abkürzungsverzeichnis

|           |  |
|-----------|--|
| ALIF:     | anterior lumbar interbody fusion                   |
| ap =      | anterior-posterior                                 |
| BMI =     | Body Mass Index                                    |
| C 1-7 =   | Cervicalwirbelkörper 1-7                           |
| CT =      | Computertomographie                                |
| et al. =  | und andere   |
| HWS =     | Halswirbelsäule                                    |
| L 1-5 =   | Lendenwirbelkörper 1-5                             |
| Ligg. =   | Ligamenta  |
| LSS =     | lumbale Spinalkanalstenose                         |
| LWS =     | Lendenwirbelsäule                                  |
| M. =      | Musculus   |
| MRT =     | Magnet-Resonanz-Tomographie                        |
| PASW =    | predictive analysis software                       |
| PAVK =    | periphere arterielle Verschlusskrankheit           |
| PDI =     | pain disability index                              |
| PLIF =    | posterior lumbar interbody fusion                  |
| PMMA =    | Polymethylmethacrylat                              |
| ROM =     | range of motion                                    |
| SPSS =    | Softwarefirma für Statistik- und Datenbankanalysen |
| Th 1-12 = | Thorakalwirbelkörper 1-12                          |
| TLIF =    | transforaminal lumbar interbody fusion             |

# 1. Einleitung

## 1.1 Die Anatomie der Wirbelsäule

Die Wirbelsäule ist die zentrale, lasttragende Achse im menschlichen Körper. Die komplette Rumpfstabilität ist von dieser Säule abhängig. Sie besteht aus 7 Halswirbeln, 12 Brustwirbeln, 5 Lendenwirbeln und den verschmolzenen Segmenten Kreuz- und Steißbein. In der sagittalen Ebene ergibt sich aus der Anordnung die typische Doppel-S Form. In der Hals- und Lendenwirbelsäule liegt eine Lordose, d.h. eine nach ventral konvexe Krümmung, vor. Brustwirbelsäule und Kreuzbein bilden eine Kyphose, nach dorsal konvexe Krümmung, aus. [36]

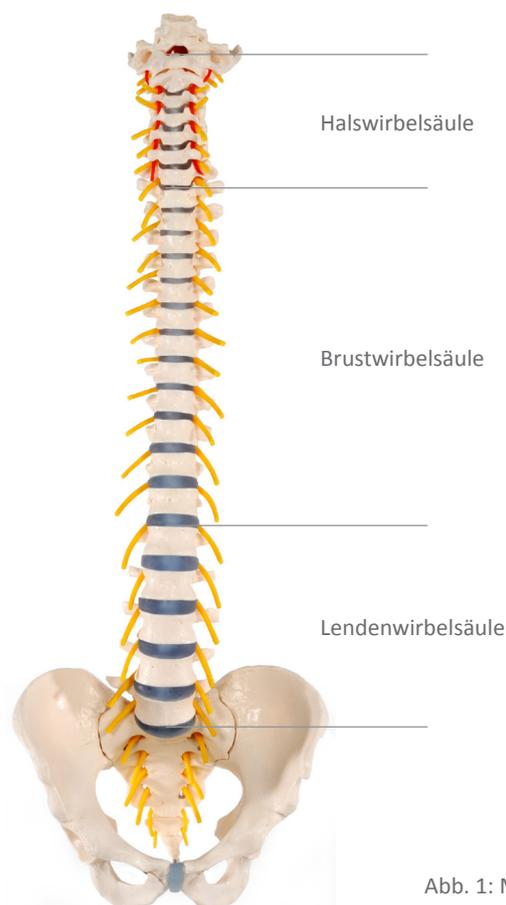


Abb. 1: Modell Wirbelsäule von ventral

Der Wirbelsäule kommen 3 wesentliche Aufgaben zu. Sie ist das zentrale Halte- und Stützorgan, dient der dynamischen Stabilisierung im Wechselspiel zwischen Schwerkraft und Muskeln und bietet dem empfindlichen Rückenmark einen Schutzkanal. Dieser Kanal entsteht durch die Unterteilung in Wirbelkörper und Wirbelbogen, zu sehen in Abbildung 2.

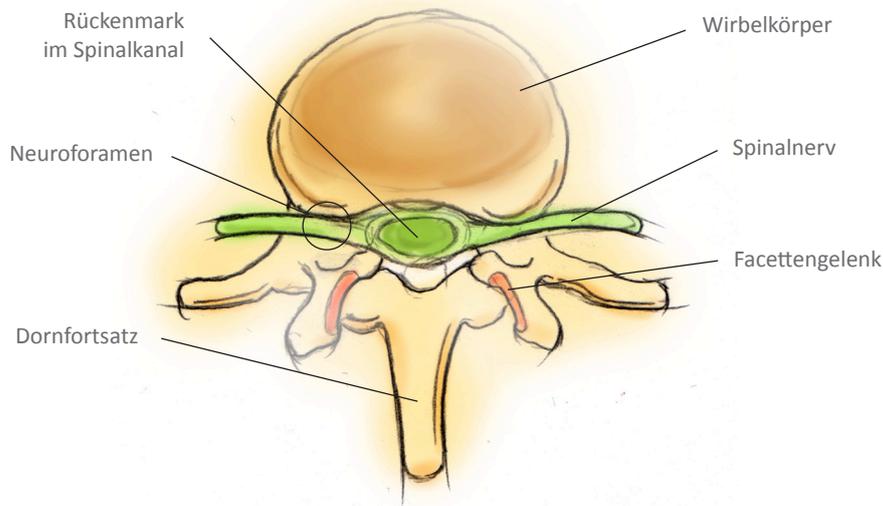


Abb. 2: Transversalschnitt durch die Wirbelsäule

Ab dem 3. Cervicalwirbel ist der grundsätzliche Aufbau aller Wirbelkörper gleich. Die Brustwirbel sind über den Querfortsatz mit den Rippen verbunden und halten damit den Brustkorb. Die Lendenwirbel haben noch die Reste des Querfortsatzes. [36]

Der Wirbelbogen setzt sich aus oberem und unterem Gelenkfortsatz, der Lamina und dem Dornfortsatz zusammen. Der Dornfortsatz ist der am weitest dorsal gelegene Teil des Wirbelbogens. Zwei benachbarte Wirbelkörper und die dazwischenliegende Bandscheibe bilden ein Segment. Schmerzempfindliche Strukturen sind die Gelenkkapsel, dorsale Bandanteile und gereizte Spinalnervenwurzeln. Als zusätzliche Gelenkverbindung gibt es dorsal die Facettengelenke, die jeweils zwischen oberem und unterem Gelenkfortsatz der benachbarten Wirbel entstehen. [36, 50, 51]

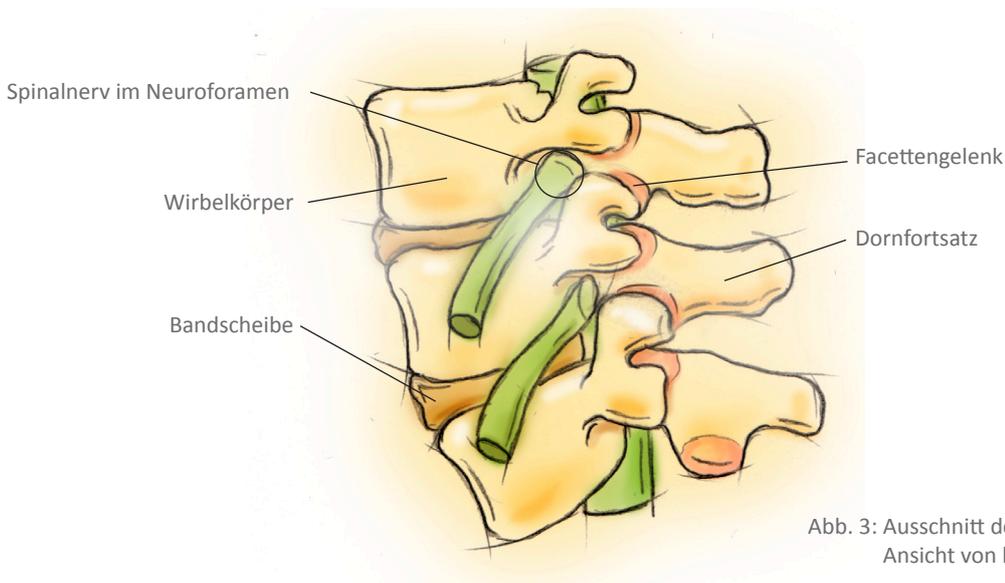
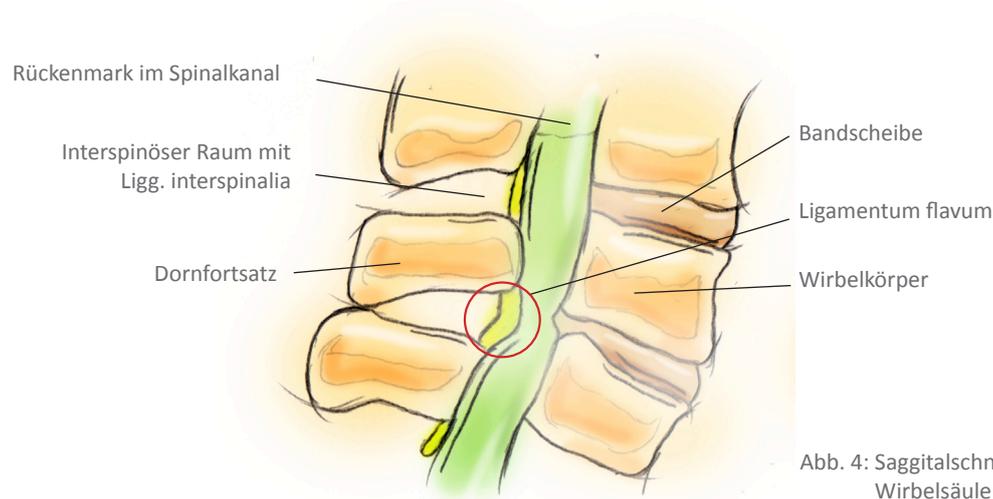


Abb. 3: Ausschnitt der Wirbelsäule, Ansicht von lateral

Zwischen Wirbelbogen und Wirbelkörper befindet sich der Spinalkanal. Dieser enthält das empfindliche Rückenmark. Dieses zieht beim Erwachsenen kaudal bis zum 1. bzw. 2. Lendenwirbelkörper und endet dort in der Regel als Conus medullaris, danach laufen die einzelnen Fasern als Cauda equina nach distal. Zwischen den einzelnen Wirbelbögen liegen die Neuroforamina, welche als Austritt der einzelnen Nervenwurzeln dienen. [36]

Die Bänder und Muskeln an der Wirbelsäule dienen der Stabilisierung, dem Schutz und der Beweglichkeitseinschränkung. Durch den M. erector spinae kommt dabei nach dem Bogensehnenprinzip eine dorsale Zuggurtung der gesamten Tragachse zustande. Zusätzlich kann über die Bauchmuskulatur eine ventrale Zuggurtung erreicht werden. Pathophysiologisch bilden schwache Muskulatur und verdickte Bänder eine der Grundlagen zur Entstehung der Lumbalen Spinalkanalstenose. [55]



Zwischen den einzelnen Dornfortsätzen liegen die Ligg. interspinalia, dorsal das Lig. supraspinale. Ausserdem dienen die Dornfortsätze zahlreichen Muskeln im Lendenwirbelbereich als Ursprung und Ansatz. Hier ist zunächst als Anteil der oberflächlichen, autochthonen Rückenmuskulatur der M. iliocostalis lumborum zu nennen. Ausserdem setzen als Anteil der tiefen autochthonen Rückenmuskulatur die Mm. interspinales, die Mm. rotatores und die Mm. multifidi an den Dornfortsätzen an. Dadurch ergibt sich für die Dornfortsätze eine zentrale Rolle bei der Stabilisierung der gesamten Lendenwirbelsäule, sowie den Extensions-, Lateralflexions- und Rotationsbewegungen. Dadurch ergeben sich im Sinne der Zuggurtung für die Dornfortsätze vor allem Zugkräfte. So-bottke et al. konnten aber nachweisen, dass diese ständigen Zugkräfte nicht zu einer Größenzunahme der Dornfortsätze im Alter führen. Auf die Bedeutung des erschlafften Bandapparats und fehlender Muskulatur, welche an den Dornfortsätzen ansetzen wird im Abschnitt Pathophysiologie näher eingegangen. [45, 47]

Die Bandscheiben liegen zwischen 2 Wirbelkörpern und dienen vornehmlich der Druckverteilung auf die Wirbelkörperendplatten. Im Kern liegt der Nucleus pulposus mit einem Wassergehalt von bis zu 90%, im Aussenbereich der Anulus fibrosus, welcher aus kollagenen und elastischen Fasern besteht. Durch den hohen Anteil an Polyglykanen und dementsprechend gebundenem Wasser kann der Nucleus sehr gut Druckbelastungen, vor allem Druckspitzen gleichmässig verteilen. Der Anulus fibrosus kann durch seine Faser-Architektur vor allem Scherkräfte aufnehmen. [55]

Allerdings sinkt mit dem Alter die Wasserbindungsfähigkeit und somit auch die Elastizität der Bandscheibe. Der Intervertebralraum wird schmaler und die Wahrscheinlichkeit für einen Bandscheibenvorfall steigt. Auf die Bedeutung der Bandscheibe bei der Entstehung der Spinalkanalstenose wird später genauer eingegangen. [36, 55]

## 1.2 Die lumbale Spinalkanalstenose (LSS)

### 1.2.1 Definiton

Es gibt verschiedene Ansätze einer Definition der lumbalen Spinalkanalstenose, welche eine der häufigsten Indikationen für einen wirbelsäulenchirurgischen Eingriff im Alter darstellt. Allgemein wird es als knöchern-ligamentäre Einengung des Spinalkanals, die mit einem klinischen Beschwerdekomples aus Rückenschmerz und belastungsabhängigen Symptomen in den Beinen (neurogene Claudicatio) verbunden ist, verstanden. Klassisch sind hierbei Hyp- bzw. Parästhesien sowie ein Schweregefühl der Beine. [1, 26, 29, 39, 42, 57]

Man unterscheidet bei der LSS zentrale Stenosen sowie laterale Recessusstenosen. Bei der zentralen LSS ist der Durchmesser des Spinalkanals in ap-Richtung entscheidend, die foraminale Stenose bezieht sich auf die austretende Nervenwurzel im Recessus lateralis. [29, 39, 42] Die Degenerationen finden sich in absteigender Häufigkeit in den Segmenten L4-5, L3-4, L5-S1, L1-2. [42]

Die LSS kann in eine relative bzw. eine absolute Form unterteilt werden. Bei einer normalen Weite des Spinalkanals von 22-25mm ist die relative Stenose zwischen 10-14mm definiert. Von einer absoluten Stenose spricht man bei einem Durchmesser von <10mm, welche meistens mit klinischen Symptomen einhergeht. Allerdings besteht keine klare Korrelation zwischen Spinalkanalweite und klinischen Symptomen. [13, 19, 42, 46] Betrachtet man die Stenose im lateralen Recessus, so spricht man bei <2mm von einer Stenose. Physiologisch gelten hier Werte von 3-5mm. [42]

### 1.2.2 Pathophysiologie

Verantwortlich für 90% der Stenosen sind degenerative Veränderungen wie Degeneration der Bandscheiben, ossäre Anbauten bzw. Hypertrophien und ligamentäre Verdickung, und als weiteres die degenerative Spondylolisthese. [13, 29, 39, 57]

Durch die Degeneration der Bandscheibe kommt es zur erhöhten Beweglichkeit und einer Höhenminderung im Bewegungssegment. Der erschlaffte Muskel- und Bandapparat, welcher wie bereits erwähnt zu einem großen Teil an den Dornfortsätzen ansetzt, kann seine Stützfunktion nicht mehr ausüben und führt so zur vermehrten, segmentalen Beweglichkeit. [18, 39, 45]

Diese Beweglichkeit führt durch Facettengelenkshypertrophie, -arthrose und osteophytäre Anbauten zu klinischer Symptomatik. Ausserdem steigt der Stress in den Facettengelenken. Zusätzlich kommt es im Alter zu einer vermehrten Fibrosierung des Ligamentum flavum. [26, 28, 33, 37]

Bei der degenerativen Spondylolisthese tritt durch die ventrale Verschiebung eine Zunahme der Stenose ein. Ausserdem führt das Wirbelgleiten wiederum zu vermehrter Instabilität und die oben beschriebenen Prozesse werden verstärkt. [38]

Sowohl Bandscheibendegeneration als auch Übergewicht und insuffiziente Bauchmuskulatur führen zu einer Hyperlordosierung. Ligamentäre Foraminalstenosen werden in Flexionshaltung aufgedehnt und die verdickten Bänder gespannt, in Extensionshaltung nimmt der Druck auf die Nervenwurzeln zu. Dies führt auch zu einer klinischen Besserung, dieser Effekt lässt sich bei der ossären Stenose jedoch nicht beobachten. [13, 30]

### 1.2.3 Diagnostik

Bei der Anamnese und klinischen Untersuchung geht es um eine genaue Differenzierung der Schmerzlokalisations- und -qualitäten. Die meisten Patienten berichten über progrediente Rückenschmerzen mit Ausstrahlung in die Beine beim Gehen und Stehen. Dadurch ist die Gehstrecke deutlich reduziert und die Patienten sind zu Pausen gezwungen (Schaufensterkrankheit - Claudicatio). [53, 57]

Wichtig bei der klinischen Untersuchung ist die Differenzierung zwischen neurogener bzw. vaskulärer Claudicatio. Die Symptome wie Beinschmerzen, Kribbelparästhesien oder Kraftminderungen bleiben bei der neurogenen Claudicatio in entlordisierenden Positionen, wie beispielsweise Fahrrad fahren, nicht bestehen. Als bildgebende Diagnostik der LSS sieht man die Kernspintomographie heute als Goldstandard, zusätzlich liefern

Funktionsaufnahmen der LWS Aussagen über Bewegungsausmaße und Instabilitäten. [13, 39, 57]

#### **1.2.4 Differenzialdiagnosen**

Als Differentialdiagnosen der LSS werden Bandscheibenprolaps, Spondylolisthese, spinale Tumoren, Facettengelenks-Syndrom, Wirbelkörperfrakturen und entzündliche Prozesse genannt. [39, 53]

Zusätzlich können aber auch Erkrankungen außerhalb der LWS ähnliche Symptomata hervorrufen. Zu erwähnen sind dabei Arthrosen im Iliosakral- oder Hüftgelenk, die Claudicatio intermittens im Rahmen einer pAVK oder auch das Bauchaortenaneurysma. [38]

#### **1.2.5 Therapie**

##### **Konservativ**

Neben Krankengymnastik, Physiotherapie, Ergotherapie, Verhaltenstherapie und Akupunktur gibt es medikamentöse Therapiemöglichkeiten. Es handelt sich um eine Kombination aus entlordosierender Krankengymnastik, antiinflammatorischen oralen Arzneimitteln (NSAR) und Infiltrationen mit Lokalanästhetika und Steroiden an die Facettengelenke, periradikulär und epidural [1, 12, 21, 42, 48, 50, 51, 57]

##### **Operativ**

Als operative Therapiemöglichkeiten stehen alle Formen der Dekompression eventuell mit kombinierter Stabilisierung zur Verfügung. Als Zugang stehen die Mittellinien-Inzision über den Dornfortsätzen sowie der paramediane Zugang zur Verfügung. Um möglichst wenig Material entfernen zu müssen, bieten sich die uni- bzw. bilaterale Laminotomie, die Laminoplastie und die Foraminotomie an [24, 38, 43, 53]

Bei radiologisch gesicherter zentraler Stenose ist die bilaterale mikrochirurgische Laminotomie heutzutage der Goldstandard. Vor allem dank besserer Stabilitätsverhältnisse der Wirbelsäule ist die Laminotomie der Laminektomie überlegen. [11, 17, 43, 52]

Zusätzlich kann bei bestehender oder drohender Instabilität eine instrumentelle Stabilisierung (ALIF, PLIF, TLIF) durchgeführt werden, welche vor allem bei präoperativer Instabilität zu besseren Ergebnissen führt. [15, 38, 43]

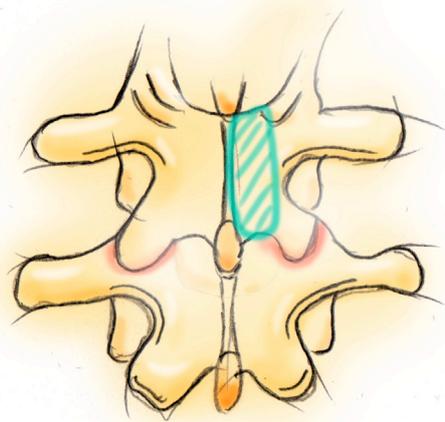


Abb. 5: Wirbelsäule von dorsal, Resektionsfläche der Hemilaminektomie

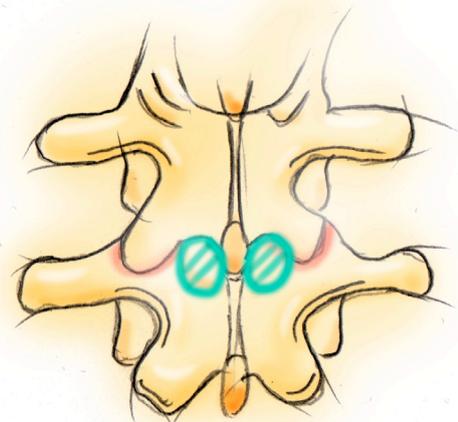


Abb. 6: Wirbelsäule von dorsal, Resektionsfläche der bilateralen Laminotomie

Die Empfehlung der konservativen Therapie bezieht sich zunächst auf einen Zeitraum von 12 Wochen. Bei gescheiterter konservativer Therapie muss dann die Operation erwogen werden, wobei die Entscheidung jeweils sehr individuell zu treffen ist. In vielen Studien wird die chirurgische Intervention als überlegen dargestellt. [1, 4, 19, 42, 44, 54]

Wie bereits beschrieben, gibt es für die Patienten Komfortpositionen, die sich in Flexion bzw. Entlordosierung darstellen, weil sich die Foramina in diesen Positionen erweitern bzw. die verdickten Bandstrukturen gestrafft werden. Hieraus resultiert die Idee für die interspinösen Spacer, in denen man über Implantate eine Flexion der LWS bzw. zumindest einen Extensionsstop mechanisch herbeiführt. Dies führt zu einer Dekompression der Foramina und Erweiterung des Spinalkanals in verschiedenen Ebenen. [35, 46]

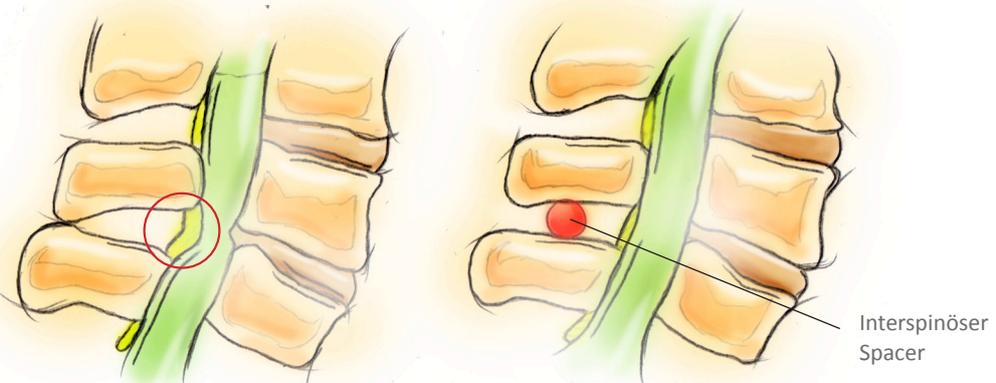


Abb. 7: Saggitalschnitt durch die Wirbelsäule mit Stenose (links), Korrekturstellung durch Spacer (rechts)

In der groben Unterteilung differenziert man zwischen harten und weichen Spacern und zwischen „stand alone“ Spacern und Spacern, die zusätzlich zu einer offenen Dekompression eingesetzt werden. Mittlerweile gibt es eine große Anzahl von interspinösen Spacern, die sich in Form, Material und Zugangsweg unterscheiden. [46]

Die Vorteile der interspinösen Spacer beziehen sich zum großen Teil auf die Operation. Die OP-Zeit für die Implantation eines Spacers ist deutlich kürzer bei ähnlichem klinischen Outcome. [8, 34] In der Patientenzufriedenheit sowie der Schmerzreduktion zeigen viele Studien, dass die Spacerimplantation der konservativen Therapie deutlich überlegen ist. [3, 27, 40, 41, 56, 59]

Eine mögliche Komplikation ist die Fraktur des Dornfortsatzes. Zwar konnte gezeigt werden, dass intraoperativ die Kräfte für eine Frakturierung kaum erreicht werden, allerdings stellt Osteoporose mit einem T-Score  $< -2,5$  eine klare Kontraindikation für den Einsatz dar. [49]

Einige Autoren beschreiben das Phänomen des Einsinterns des Spacers in die Dornfortsätze. Dadurch kommt es zur Aufhebung des Effektes der Entlordisierung, aber die Spinalkanalstenose muss trotzdem adäquat versorgt werden. [6, 22, 31]

### 1.3 Ziel dieser Studie

Es handelt sich bei dieser Arbeit um eine retrospektive anatomisch-radiologische Studie, um detaillierte Informationen über den posterioren Komplex zu erhalten. Ziel ist ein besseres Verständnis der anatomischen Zusammenhänge im Bereich der Dornfortsätze der Lendenwirbelsäule.

Im Mittelpunkt unserer Untersuchungen stehen dabei zum einen die Corticalisdicke, zum anderen die Weite des interspinösen Abstands. Unsere radiologische Untersuchung mit einer Fallzahl von 565 Patienten liefert dabei Informationen über alle Alters-, Gewichts- und Größenklassen sowie beide Geschlechter.

Klinischer Hintergrund dieser Fragestellung ist die operative Therapie mit interspinösen Spacern, um die oben beschriebene Komplikation der Dornfortsatzfraktur durch stabilere Positionierung zu minimieren.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Patienten

Die vorliegende retrospektiv-deskriptive Studie basiert auf einem Patientenkollektiv von 565 Patienten der Radiologie der Universitätsklinik Köln. In den Jahren 2008-2009 haben diese aus unterschiedlichen Gründen eine CT-Aufnahme des Abdomens bekommen. Auf diesen Bildern ist immer die Lendenwirbelsäule abgebildet, so dass diese in unserer Studie ausgewertet werden konnte. Es wurden keine speziellen Wirbelsäulenaufnahmen analysiert, damit orthopädische bzw. neurochirurgische Pathologien keinen Einfluss haben.

Es handelt sich um eine willkürliche Auswahl an Patienten beider Geschlechter und aller Altersklassen. Zum Untersuchungszeitpunkt der CT-Aufnahme wurden zusätzlich das Geschlecht, das Alter, Größe und Gewicht sowie daraus resultierend der BMI erfasst.

### 2.2 Analyse der CT-Bildsätze

Es wurden ausschließlich Sagittalschnitte verwendet, die mittels des Gerätes Brilliance CT 16 slice® (Philipps, Hamburg) erstellt wurden. Die Schnittbildserien wurden mit einer Dicke von 2mm gefahren, für jeden Dornfortsatz wurde anschliessend einzeln das Bild ausgesucht, welches den jeweiligen Dornfortsatz am besten abbildet. Die Bilder wurden im Spine-Fenster bei C=530 und W=1720 betrachtet. Bei einer Pixelgröße von 0,59mm x 0,59mm – 0,68mm x 0,68mm war es dann möglich, die jeweiligen Corticalisdicken bzw. den interspinösen Abstand genau auszumessen.

Um diese Messungen untereinander vergleichbar zu machen, wurde ein standardisiertes Messsystem mit dem Grafikprogramm Adobe Illustrator CS3 entwickelt. Das Design der Messschablone war darauf ausgelegt, maximale Ausdehnungen der Dornfortsätze abzubilden. Diese Schablone ist in Abbildung 8 dargestellt.

Linie 1 ist die definierende Linie der ganzen Schablone und wurde immer tangential an die craniale Corticalis der einzelnen Dornfortsätze angelegt. Die Länge dieser Linie gibt die Raumtiefe der Dornfortsätze an. Alle anderen Linien ergeben sich aus der Lage von Linie 1, so dass die gleichen Punkte an den einzelnen Dornfortsätzen ausgemessen werden.

Die gelben Linien stehen senkrecht zu Linie 1. Von links nach rechts liegen die Linien 2, 3 und 4 bei 25, 50 bzw. 75% der Länge von Linie 1. Dadurch misst man abhängig von

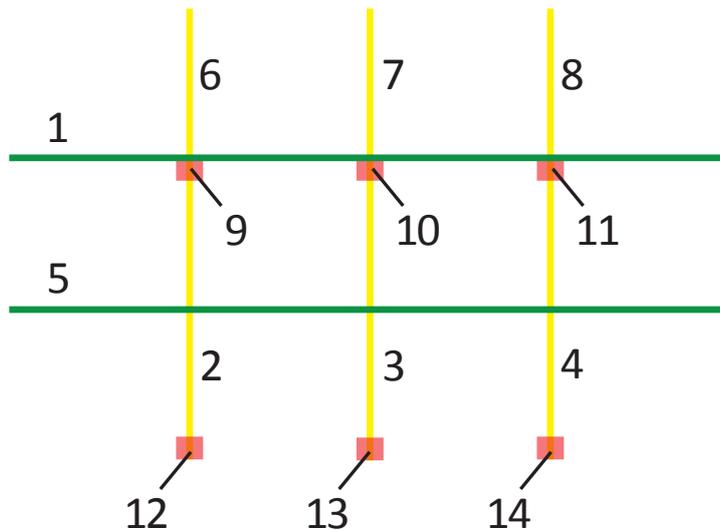


Abbildung 8:  
Messschablone

der Tiefenausdehnung für jeden Dornfortsatz die gleichen Schnittpunkte aus. Die gelben Linien geben also die Höhe des Dornfortsatzes bei 25, 50 und 75% seiner Tiefe an.

Die zweite waagerechte Linie in der Schablone ist Linie 5. Diese ist abhängig von Linie 3. Deren Schnittpunkt liegt immer bei 50% der Länge von Linie 3, so dass Linie 5 die Tiefe bei halber Höhe abbildet.

Durch die Linien 6, 7 und 8 wird der interspinöse Abstand ausgemessen. Diese liegen auch jeweils bei 25, 50 und 75% der Länge von Linie 1 dar und bilden einen wesentlichen Aspekt dieser Arbeit ab.

Die anderen für unsere Studie entscheidenden Linien sind die rot markierten Linien 9-14. Diese bestimmen die Corticalisdicke; Linien 9-11 für die craniale, 12-14 für die caudale Corticalis. Auch diese sind nach dem oben beschriebenen Prinzip an Linie 1 gekoppelt. Dies wurde durch Gruppenbildung im Programm Adobe Illustrator CS3 erreicht. Dadurch ist man auch für die Bestimmung der Corticalis-Dicke in der Lage, immer gleich definierte Punkte auszumessen.

Das Ganze ist an einem Beispiel in den Abbildungen 9 und 10 veranschaulicht. Zunächst wird die Schablone an Hand von Linie 1 tangential zur cranialen Corticalis des jeweiligen Dornfortsatzes ausgerichtet.

In einem zweiten Arbeitsschritt werden die einzelnen Linien auf ihre jeweilige Länge eingestellt. Jetzt bilden alle Linien die Größe der zu untersuchenden Distanz ab und können einfach abgelesen werden. Dies geschieht standardisiert für jeden Dornfortsatz einzeln.

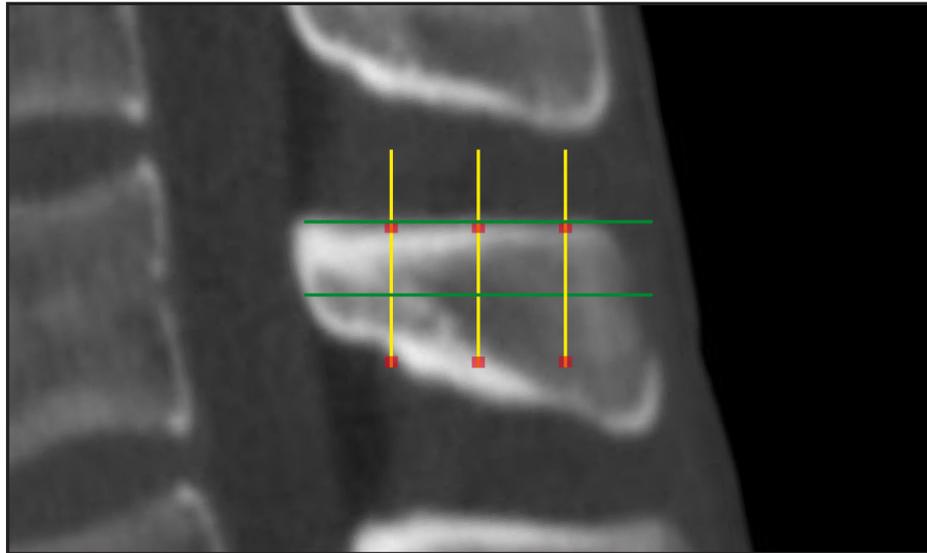


Abbildung 9: Messschablone tangential angelegt



Abbildung 10: Messschablone nach Einstellen der einzelnen Längen

Zur statistischen Auswertung der gemessenen Parameter wurde das Programm PASW Statistics 18 (IBM® SPSS® Statistics 18, SPSS Inc., IBM Company Headquarters, Chicago, IL, USA) verwendet. Relevanz lag vor bei einer Wahrscheinlichkeit von 95% ( $p < 0.05$ ).

In Tabelle 1 sind alle Linien und ihre zu untersuchende Größe aufgelistet. Die Prozentzahlen beziehen sich auf die Länge von Linie 1.

|          |                                  |
|----------|----------------------------------|
| Linie 1  | Tiefe des Dornfortsatzes cranial |
| Linie 2  | Höhe bei 25%                     |
| Linie 3  | Höhe bei 50%                     |
| Linie 4  | Höhe bei 75%                     |
| Linie 5  | Tiefe bei 50% der Höhe           |
| Linie 6  | Interspinöser Abstand bei 25%    |
| Linie 7  | Interspinöser Abstand bei 50%    |
| Linie 8  | Interspinöser Abstand bei 75%    |
| Linie 9  | Craniale Corticalisdicke bei 25% |
| Linie 10 | Craniale Corticalisdicke bei 50% |
| Linie 11 | Craniale Corticalisdicke bei 75% |
| Linie 12 | Caudale Corticalisdicke bei 25%  |
| Linie 13 | Caudale Corticalisdicke bei 50%  |
| Linie 14 | Caudale Corticalisdicke bei 75%  |

Tabelle 1: Einzelne Linienbezeichnungen der Messschablone

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Das Patientenkollektiv

Insgesamt wurden 340 männliche und 225 weibliche Patienten analysiert. Dies ergibt ein Verhältnis von 1,5:1. In Tabelle 2 sind die durchschnittlichen Parameter inklusive der Standardabweichungen hinsichtlich der untersuchten Parameter dargestellt.

| Patientenkollektiv |                    |           |            |              |                          |
|--------------------|--------------------|-----------|------------|--------------|--------------------------|
| Geschlecht         |                    | Alter (J) | Größe (cm) | Gewicht (kg) | BMI (kg/m <sup>2</sup> ) |
| m                  | Mittelwert         | 60,2      | 177,7      | 82,3         | 26                       |
|                    | N                  | 340       | 340        | 340          | 340                      |
|                    | Standardabweichung | 14,6      | 7,5        | 15,7         | 4,4                      |
| w                  | Mittelwert         | 58,1      | 165        | 68,2         | 25                       |
|                    | N                  | 225       | 225        | 225          | 225                      |
|                    | Standardabweichung | 13,9      | 6,7        | 15,3         | 5,4                      |
| Insgesamt          | Mittelwert         | 59,4      | 172,7      | 76,7         | 25,6                     |
|                    | N                  | 565       | 565        | 565          | 565                      |
|                    | Standardabweichung | 14,3      | 9,5        | 17           | 4,8                      |

Tabelle 2: Durchschnittswerte der Patienten nach Alter, Größe, Gewicht und BMI

### 3.2 Die Corticalis-Dicke

Die durchschnittliche Corticalis-Dicke aller Dornfortsätze war  $2,5 \pm 0,5$ mm.

Die männlichen Patienten haben für alle Dornfortsätze eine stärkere Corticalis. Dieser Unterschied ist signifikant ( $r = 0,2$  und  $p < 0,01$ ). Die Durchschnittswerte für alle Dornfortsätze L1-L5 sind in Tabelle 3 dargestellt.

| Mittlere Corticalisdicken im Vergleich [mm] |                    |      |      |      |      |      |
|---|--------------------|------|------|------|------|------|
| Geschlecht                                  |                    | L1   | L2   | L3   | L4   | L5   |
| m   | Mittelwert         | 2,7  | 2,76 | 2,78 | 2,57 | 2,18 |
|   | N                  | 340  | 340  | 340  | 340  | 340  |
|   | Standardabweichung | 0,49 | 0,49 | 1,17 | 1,31 | 0,46 |
| w   | Mittelwert         | 2,46 | 2,54 | 2,49 | 2,28 | 1,99 |
|   | N                  | 225  | 225  | 225  | 225  | 225  |
|   | Standardabweichung | 0,33 | 0,33 | 0,31 | 0,29 | 0,29 |
| Insgesamt                                   | Mittelwert         | 2,61 | 2,67 | 2,66 | 2,45 | 2,1  |
|   | N                  | 565  | 565  | 565  | 565  | 565  |
|   | Standardabweichung | 0,45 | 0,45 | 0,94 | 1,04 | 0,41 |

Tabelle 3: Die einzelnen Corticalis-Dicken der Dornfortsätze im Vergleich m/w

Mit  $2,67 \pm 0,45\text{mm}$  für L2 sowie  $2,66 \pm 0,94\text{mm}$  für L3 ist die Corticalis-Dicke für die beiden Lendenwirbelkörper signifikant ( $p < 0,001$ ) stärker als für die anderen Wirbelkörper. Für L5 ergeben sich mit  $2,1 \pm 0,41\text{mm}$  signifikant schwächere Werte. Diese Unterschiede zeigt Abbildung 11.

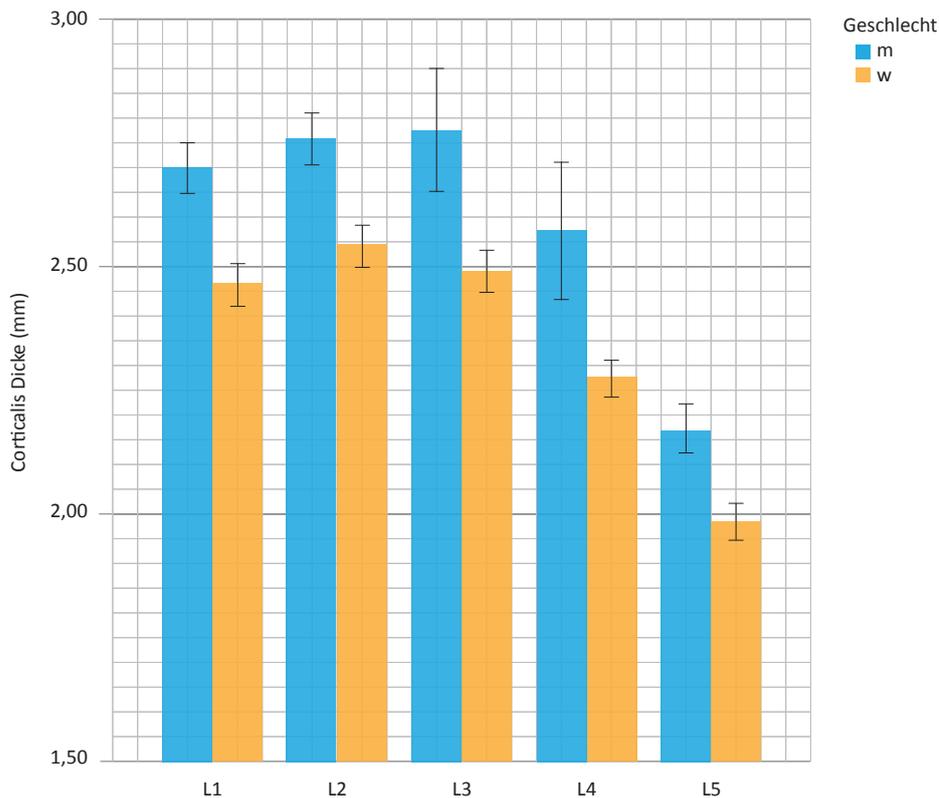


Abbildung 11: Die Corticalis-Dicke (in mm) der einzelnen Dornfortsätze der Lendenwirbel L1-L5 getrennt nach Geschlecht männlich/weiblich.

Es zeigte sich eine positive Korrelation der Corticalis-Dicke mit der Körpergröße ( $r = 0,278$ ;  $p < 0,001$ ) sowie Körpergewicht ( $r = 0,182$ ;  $p < 0,001$ ). Allerdings konnte keine Korrelation bezüglich Alter ( $r = -0,072$ ;  $p < 0,087$ ) bzw. BMI ( $r = 0,084$ ;  $p = 0,258$ ) nachgewiesen werden.

Die Dicke der superioren Corticalis lag bei  $2,6 \pm 0,5\text{mm}$ , die der inferioren Corticalis bei  $2,3 \pm 0,7\text{mm}$ . Dieser Unterschied war signifikant mit  $p < 0,001$ . Sowohl superior als auch inferior nahm die Corticalis-Dicke im sagittalen Verlauf von anterior nach posterior ab, signifikant mit  $p < 0,001$ . Dies zeigt sich in Abbildung 12.

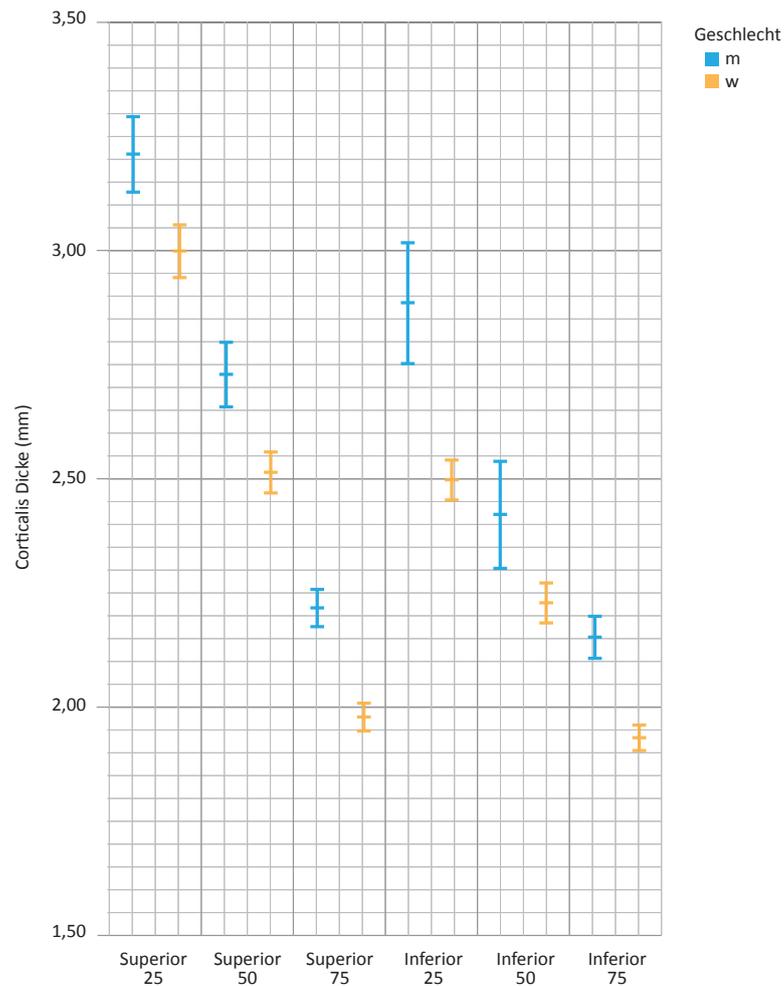


Abbildung 12: Durchschnittliche Corticalis-Dicke (in mm) der Dornfortsätze L1-L5 im sagittalen Verlauf (25= anterior, 50= mittel, 75= posterior) aufgeteilt nach Geschlecht.

### 3.3 Der interspinöse Abstand

Der durchschnittliche interspinöse Abstand betrug  $9,1 \pm 2,5\text{mm}$  (3,5 - 33,5; 8,7mm). Der Raum verkleinerte sich signifikant von superior auf dem Level Th12/L1 nach inferior auf dem Level L4/L5. Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 13. Ergeben sich für das Niveau Th12/L1 noch Durchschnittswerte von  $11,7 \pm 3,4\text{mm}$ , liegt der Abstand bei L4/L5 bei  $5,5 \pm 2,9\text{mm}$ .

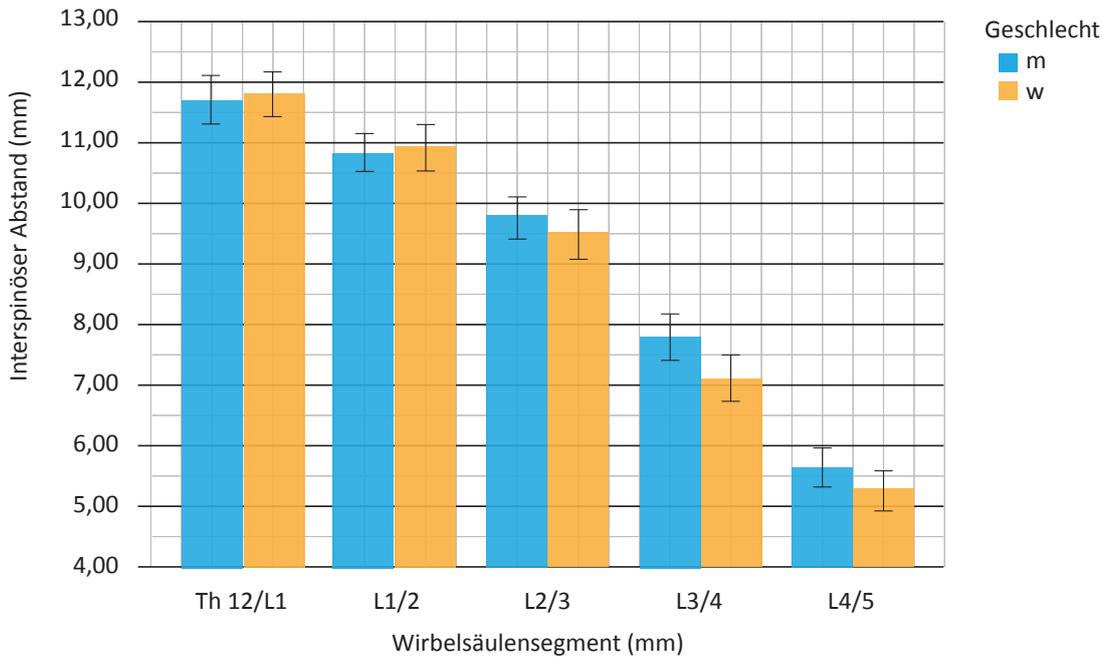


Abbildung 13: Durchschnittlicher interspinöser Abstand (in mm) der einzelnen Segmente der Lendenwirbelsäule in Abhängigkeit des Geschlechts.

Zusätzlich zeigt sich, dass der interspinöse Abstand von anterior nach posterior abnimmt mit einer Signifikanz von  $p < 0.001$ . Für den anterioren Abstand ergab sich ein Wert von  $11,2 \pm 2,9$  mm, für den posterioren Abstand  $7,2 \pm 2,7$  mm. Dieser Zusammenhang ist grafisch in Abbildung 14 dargestellt.

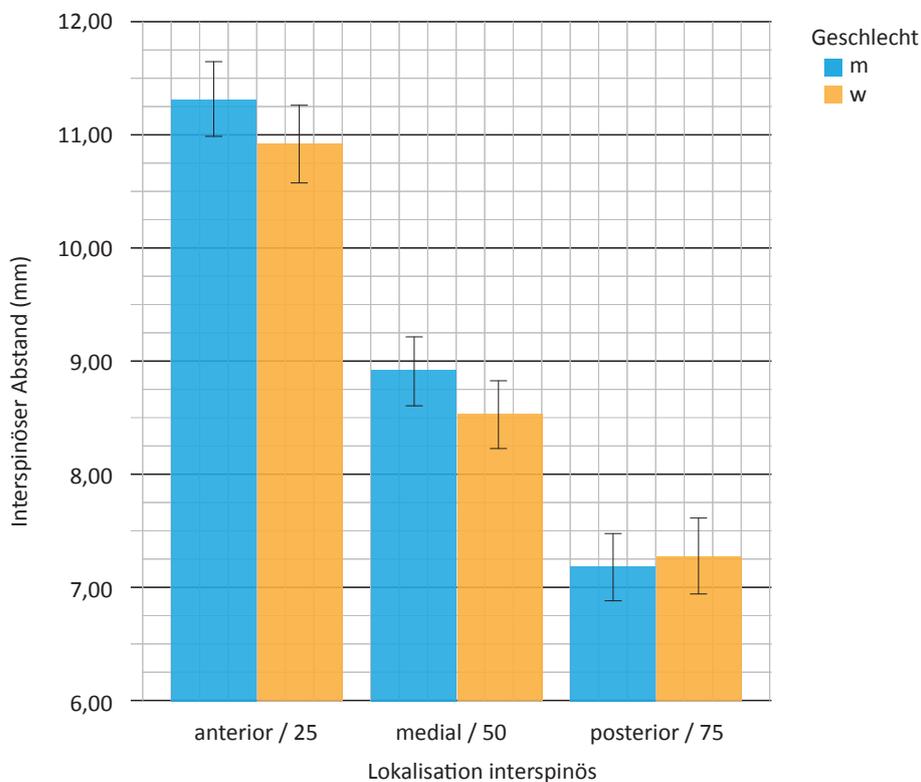


Abbildung 14: Durchschnittlicher interspinöser Abstand aller Lendenwirbelkörpersegmente von anterior nach posterior in Abhängigkeit des Geschlechts.

Hinsichtlich der Korrelationen des interspinösen Abstands bezogen auf Alter, Größe, Gewicht und BMI zeigen sich signifikante Ergebnisse. Es gibt einen schwach positiven Zusammenhang zwischen Körpergröße und Abstand mit  $r = 0,190$  und  $p < 0,001$ .

Deutlicher zeigt sich eine negative Korrelation bezüglich des interspinösen Abstands und des Alters mit  $r = -0,455$  und  $p < 0,001$ . Den Zusammenhang, dass mit steigendem Alter der Raum kleiner wird zeigt Abbildung 15.



Abbildung 15: Altersabhängigkeit des interspinösen Abstands



## 4. Diskussion

Die Dornfortsätze und der interspinöse Raum sind bislang nicht ausreichend untersucht. Dies ist jedoch eine Grundvoraussetzung für Therapieansätze in dieser Region. Es ist offen welche Größe für interspinöse Spacer verwendet werden kann, ausserdem sind die Komplikationen der Spacer-Implantation wie Repositionsverlust und Sinterung anatomisch nicht ausreichend verstanden.

Neumann et al. führten eine radiologische Studie an lateralen Röntgenbildern der LWS durch. Sie analysierten die Höhe des interspinösen Abstands im Hinblick auf Instabilität des posterioren Komplexes nach Traumata. Ein Abstand von 7-10 mm von 2 Dornfortsätzen im lateralen Röntgenbild wurde als normal definiert. Dies deckt sich mit unseren Ergebnissen von Th12-L4, lediglich beim Abstand L4/L5 ergibt sich bei uns mit  $5,5 \pm 2,9$ mm ein leicht niedrigerer Wert. [32]

Für Jackson et al. spielt der interspinöse Abstand ebenfalls eine Rolle zur Einschätzung der Stabilität des posterioren, ligamentären Komplexes, bestehend aus den Ligg. supraspinosum, interspinosum und flavum. In diesem Fall wurden in einer anatomisch-radiologischen Studie Röntgenbilder von 157 asymptomatischen Probanden hinsichtlich der Weitenänderung des interspinösen Abstands bei Flexion bzw. Extension ausgewertet. Bei zu hohen Abständen wird aus traumatologischer Sicht auf eine Bandinstabilität der posterioren Strukturen geschlossen. Interessant ist der ähnliche Ansatz zu unserer Studie, eine anatomische Auswertung an asymptomatischen Patienten durchzuführen. Die Ergebnisse der Studie wurden dann aber im Verhältnis zur Länge der Deckplatte von L3 angegeben, sodass hier keine direkte Vergleichbarkeit mit unseren absoluten Werten entsteht. [25]

Eine andere anatomische Studie lieferten Albiets et al. mit einer Auswertung von CT-Untersuchungen, die nicht zur weiteren Diagnostik einer Wirbelsäulenerkrankung durchgeführt wurden. Die Positionierung des Patienten ist ebenfalls auf dem Rücken, zur Beinhaltung machen die Kollegen leider keine Angaben. Deshalb kann nicht auf entlordisierende bzw. verfälschende Einflüsse hinsichtlich z.B. der Hüftflexion geschlossen werden. In dieser Studie wurden bei 100 CT-Scans die interspinösen Räume von L4-5 und L5-S1 gemessen. Im Vergleich mit unseren Werten des Abstands L 4-5 kommen die Kollegen auf etwas höhere Werte. Im Durchschnitt erreichen sie  $6,5 \pm 3$ mm, während wir nur  $5,49 \pm 2,89$  mm messen. Allerdings beziehen wir uns auf den Durchschnittswert im

sagittalen Verlauf, die Kollegen messen die maximale Distanz zwischen den einzelnen Dornfortsätzen. [2]

Eine Studie an koreanischen Patienten verfolgte ebenfalls einen ähnlichen Ansatz. Dort wurde der interspinöse Abstand anhand von Röntgenbildern analysiert. Eine Vergleichbarkeit der absoluten Werte gestaltet sich bei ausschliesslich mit koreanischen Patienten im Vergleich zu einer mit mitteleuropäischen Patienten durchgeführten Studie schwierig. Es zeigte sich der Abstand zwischen L 2-3 am größten, bei unseren Ergebnisse lieferte L1-2 den größten Wert. Tendenziell kamen auch die Kollegen zu dem Ergebnis, dass der Abstand nach caudal abnimmt mit einem Minimum bei L5-S1. Unser Minimum lag bei L 4-5, allerdings haben wir L5- S1 nicht ausgemessen. Ausserdem konnte in der koreanischen Studie von Ihm et al. nachgewiesen werden, dass im Alter der interspinöse Abstand abnimmt. Dies deckt sich mit unseren Ergebnissen. [23] Die degenerierte Bandscheibe verliert an Höhe. Dies konnte bereits im Jahr 1990 durch Boden und seine Studiengruppe, welche MRT-Untersuchungen analysiert haben, gezeigt werden. [7] Bei niedriger posteriorer Bandscheibenhöhe resultiert anschliessend auch eine niedrigere Höhe von weiter posterior gelegenen Strukturen, z.B. den Neuroforamina. [20] Bei der Foraminal- bzw. Recessusstenose ist eine Korrelation zwischen radiologischer Diagnose und klinischer Symptomatik erwiesen. [19, 46]

Im Jahre 2002 führten Cinotti et al. ebenfalls eine anatomische Studie über die Lendenwirbelsäule durch. Sie analysierten in einer Kadaver-Studie Foraminalstenosen in Abhängigkeit der Bandscheibenhöhe. Auch hierbei zeigte sich klar eine anatomische Verkleinerung der Neuroforamina als weiter posterior gelegene Struktur bei Bandscheibenhöhenverlust. [10]

All diese Resultate korrelieren mit unseren Ergebnissen, dass bei älteren Patienten die interspinösen Räume kleiner werden. Während die <50-jährigen im Segment L4-5 noch über eine Weite von  $6,56 \pm 2,76$ mm verfügen, ergibt sich bei den >70-jährigen nur noch ein Abstand von  $4,66 \pm 3,21$ mm. Durch eine Annäherung der Dornfortsätze kommt es parallel auch zu weiterem Stress in den Facettengelenken, welches ebenfalls als Ursache für die LSS gesehen wird. [38]

Eine Studie kommt zu einem ähnlichen Ergebnis hinsichtlich der Entwicklung des interspinösen Raums von cranial nach caudal. Xia et al. haben MRT Untersuchungen analysiert. Es handelte sich ebenfalls um hinsichtlich Rückenschmerzen asymptomatische Patienten, welche in liegender, entspannter Position gescannt wurden. Auch dort zeigte sich, dass der Raum nach caudal deutlich abnimmt. [58]

Eine anatomische Studie von Aylott et al. betrachtet diese Ergebnisse aus einem anderen Blickwinkel. Dort wurde die Größenentwicklung des Dornfortsatzes mit steigendem Alter analysiert. Es zeigte sich, dass die Dornfortsätze mit dem Alter an Größe zunehmen. Da bei degenerierten Bandscheiben der Platz im posterioren Komplex tendenziell abnimmt, führt eine Vergrößerung der Dornfortsätze zur zusätzlichen Abnahme des interspinösen Abstands. Allerdings gibt es auch eine Studie von Sobottke et al., die diese Theorie widerlegt. Bei der Analyse von 565 Abdomen-CTs hinsichtlich des Volumens des Dornfortsatzes konnte keine Größenzunahme im Alter nachgewiesen werden, die Patientenzahl der Aylott-Studie bezog sich auf 200. [5, 47]

Weitere Untersuchungen aus anderen klinischen Fragestellungen heraus den interspinösen Abstand betreffend gibt es mehrere. Um eine Optimierung der Patientenlagerung bei der Lumbalpunktion zu erreichen, haben Fisher et al. 2001 Studien mit 14 Patienten durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene Positionierungen und Flexionspositionen der Hüfte sowie deren Auswirkung auf den interspinösen Abstand durchgeführt. Ziel der Studie war es, die Erfolgsrate der Lumbalpunktion durch Vergrößerung des interspinösen Abstands zu erhöhen. Da aber eine Punktion erfolgen musste, konnten die Untersuchungen nur bei sitzenden bzw. auf der Seite liegenden Patienten durchgeführt werden. Es zeigte sich eine Vergrößerung des interspinösen Abstands bei Hüftflexion, eine direkte Vergleichbarkeit mit unserer Arbeit ist allerdings nicht gegeben. [16]

Betreffend der Corticalis-Dicke gibt es in der Literatur wenig vergleichbares. Die meisten Untersuchungen wurden zum besseren Verständnis der Osteoporose durchgeführt, aber in anatomisch und biomechanisch nicht vergleichbaren Körperpartien wie distaler Radius oder Schenkelhals. Allerdings gibt es eine von Christiansen et al. durchgeführte große radiologische Untersuchung hinsichtlich der Corticalis-Dicke. Es handelte sich bei der im Jahre 2011 veröffentlichten Arbeit um eine Vergleichsstudie von 60 Männern zu 60 Frauen, um einen Unterschied hinsichtlich des corticalen Substanzverlustes der Wirbelkörper im Alter durchzuführen. Die grundsätzliche Fragestellung wurde durch die erhöhte Gefährdung für weibliche osteoporotische Wirbelkörper heraus gestellt.

Sie führten quantitative computertomographische Untersuchungen von Wirbelkörpern von Th10 und L3 durch. Dadurch war aufgrund des unterschiedlichen Mineralstoffgehalts in den einzelnen Voxeln des corticalen bzw. trabeculären Knochens eine genaue Unterscheidung der Mikroarchitektur möglich. Hierbei zeigte sich, dass Männer generell eine stärkere Corticalis ausbilden als Frauen. Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass bei Männern im Alter vornehmlich die trabeculäre Knochensubstanz abnimmt, bei

Frauen sowohl die trabekuläre als auch insbesondere die corticale Substanz abnimmt. Während Männer im Vergleich der Corticalisdicke des Wirbelkörpers Th 10 der Altersgruppe 35-42 Jahre zur Altersgruppe 73-82 Jahre nur 2% der corticalen Masse verlieren, sind es bei den Frauen 23 %, für L3 sind die Werte ähnlich signifikant. Auf der einen Seite deckt sich dies mit unseren Ergebnissen der Dornfortsätze. Männer haben in unserer Untersuchung über alle Dornfortsätze eine statistisch signifikant dickere Corticalis als Frauen (vgl. Abbildung 11). Auf der anderen Seite zeigt sich im Unterschied zu unserer Untersuchung bei Christiansen et al. eine Korrelation der Corticalisdicke bzgl. des Alters. Dieser Zusammenhang konnte bei uns nicht gezeigt werden. [9, 14]

## 5. Zusammenfassung

Die anatomische und biomechanische Stabilität der Wirbelsäule wird über eine Zugurtung ventral und dorsal nach dem Bogensehnenprinzip hergestellt. Der Dornfortsatz ist dabei als Ansatz bzw. Ursprung verschiedener Muskeln und Bänder von zentraler Bedeutung. Dabei wirken Zugkräfte auf den Dornfortsatz ein.

Die lumbale Spinalkanalstenose ist eine häufige degenerative Alterserkrankung. Pathophysiologisch steht der Höhenverlust der Bandscheibe und dadurch bedingt die Entwicklung von Instabilitäten im Vordergrund. Es gibt verschiedene konservative und operative Therapieansätze. Eine operative Möglichkeit ist die Implantation eines interspinösen Spacers. Komplikationen dabei sind Repositionsverlust oder Sinterung des Spacers in den Dornfortsatz. Allerdings sind die Dornfortsätze und der interspinöse Raum bislang nicht ausreichend untersucht.

Die Corticalisdicke an den Dornfortsätzen der Lendenwirbelsäule nimmt von anterior nach posterior kontinuierlich ab. Bei Männern zeigt sich eine signifikant dickere Corticalis als bei Frauen. Dies korreliert mit umfassenden Untersuchungen betreffend den Wirbelkörper, welche zum besseren Verständnis der vermehrten osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen der Frauen durchgeführt wurden.

Der interspinöse Abstand verkleinert sich mit zunehmenden Alter. Dies korreliert mit zahlreichen anatomischen Untersuchungen, welche bei im Alter nachlassender Bandscheibenhöhe auch eine Annäherung der posterior gelegenen Strukturen beschreiben. Zusätzlich nimmt der Raum der einzelnen Wirbelsäulensegmente nach caudal ab. Im einzelnen Segment nimmt die Höhe des interspinösen Abstands von anterior nach posterior ab.



## 6. Literaturverzeichnis:

### 1 Amundsen:

Lumbar spinal stenosis: conservative or surgical management?: A prospective 10-year study.  
Amundsen T, Weber H, Nordal HJ, Magnaes B, Abdelnoor M, Lilleås F.  
Spine (Phila Pa 1976). 2000 Jun 1;25(11):1424-35; discussion 1435-6.  
PMID: 10828926

### 2 Albietz:

An anatomic study of the interspinous space of the lumbosacral spine.  
Albietz JS, Rosasarellano P, Fleming JC, Gurr KR, Bailey SI, Bailey CS.  
Eur Spine J. 2012 Jan;21(1):145-8. Epub 2011 Aug 19.

### 3 Anderson:

Treatment of neurogenic claudication by interspinous decompression: application of the X STOP device in patients with lumbar degenerative spondylolisthesis.  
Anderson PA, Tribus CB, Kitchel SH.  
J Neurosurg Spine. 2006 Jun;4(6):463-71.  
PMID: 16776357

### 4 Atlas:

Long-term outcomes of surgical and nonsurgical management of lumbar spinal stenosis: 8 to 10 year results from the maine lumbar spine study.  
Atlas SJ, Keller RB, Wu YA, Deyo RA, Singer DE.  
Spine (Phila Pa 1976). 2005 Apr 15;30(8):936-43.  
PMID: 15834339

### 5 Aylott:

Spinous process morphology: the effect of ageing through adulthood on spinous process size and relationship to sagittal alignment.  
Aylott CE, Puna R, Robertson PA, Walker C.  
Eur Spine J. 2012 May;21(5):1007-12. Epub 2011 Sep 30.  
PMID: 21959943

### 6 Barbagallo:

The „sandwich phenomenon“: a rare complication in adjacent, double-level X-stop surgery: report of three cases and review of the literature.  
Barbagallo GM, Corbino LA, Olindo G, Foti P, Albanese V, Signorelli F. Spine (Phila Pa 1976). 2010 Feb 1;35(3):E96-100. Review.  
PMID: 20075767

### 7 Boden

Abnormal magnetic-resonance scans of the lumbar spine in asymptomatic subjects. A prospective investigation.  
Boden SD, Davis DO, Dina TS, Patronas NJ, Wiesel SW.  
J Bone Joint Surg Am. 1990 Mar;72(3):403-8.  
PMID: 2312537

### 8 Bono:

Interspinous process devices in the lumbar spine.  
Bono CM, Vaccaro AR.  
J Spinal Disord Tech. 2007 May;20(3):255-61. Review.  
PMID: 17473649

### 9 Christiansen

Mechanical contributions of the cortical and trabecular compartments contribute to differences in age-related changes in vertebral body strength in men and women assessed by QCT-based finite element analysis.  
Christiansen BA, Kopperdahl DL, Kiel DP, Keaveny TM, Bouxsein ML.  
J Bone Miner Res. 2011 May;26(5):974-83. doi: 10.1002/jbmr.287.  
PMID: 21542000

### 10 Cinotti

Stenosis of lumbar intervertebral foramen: anatomic study on predisposing factors.  
Cinotti G, De Santis P, Nofroni I, Postacchini F.  
Spine (Phila Pa 1976). 2002 Feb 1;27(3):223-9.  
PMID: 11805682

### 11 Costa:

Degenerative lumbar spinal stenosis: analysis of results in a series of 374 patients treated with unilateral laminotomy for bilateral microdecompression.  
Costa F, Sassi M, Cardia A, Ortolina A, De Santis A, Luccarell G, Fornari M.  
J Neurosurg Spine. 2007 Dec;7(6):579-86.  
PMID: 18074681

### 12 Cuckler:

The use of epidural steroids in the treatment of lumbar radicular pain. A prospective, randomized, double-blind study.  
Cuckler JM, Bernini PA, Wiesel SW, Booth RE Jr, Rothman RH, Pickens GT. J Bone Joint Surg Am. 1985 Jan;67(1):63-6.  
PMID: 3155742

### 13 Delank:

[Lumbar spinal canal stenosis (LSS)].  
Delank KS, Fürderer S, Eysel P.  
Z Orthop Ihre Grenzgeb. 2004 Jul-Aug;142(4):R19-30;  
quiz R31-5. Review. German. No abstract available.  
PMID: 15365910

### 14 Eswaran:

Cortical and trabecular load sharing in the human vertebral body.  
Eswaran SK, Gupta A, Adams MF, Keaveny TM.  
J Bone Miner Res. 2006 Feb;21(2):307-14. Epub 2005 Nov 7.  
PMID: 16418787

### 15 Feldmann:

[Results in the surgical treatment of degenerative lumbar spinal stenosis: a retrospective analysis].  
Feldmann J, König FA, Schultz W.  
Z Orthop Unfall. 2007 Nov-Dec;145(6):729-35. German.  
PMID: 18072039

### 16 Fisher:

Hip flexion and lumbar puncture: a radiological study.  
Fisher A, Lupu L, Gurevitz B, Brill S, Margolin E, Hertzanu Y.  
Anaesthesia. 2001 Mar;56(3):262-6.  
PMID: 11251435

### 17 Fu:

Long-term outcomes of two different decompressive techniques for lumbar spinal stenosis.  
Fu YS, Zeng BF, Xu JG.  
Spine (Phila Pa 1976). 2008 Mar 1;33(5):514-8.  
PMID: 18317196

### 18 Fujiwara:

The effect of disc degeneration and facet joint osteoarthritis on the segmental flexibility of the lumbar spine.  
Fujiwara A, Lim TH, An HS, Tanaka N, Jeon CH, Andersson GB, Haughton VM.  
Spine (Phila Pa 1976). 2000 Dec 1;25(23):3036-44.  
PMID: 11145815

### 19 Geisser:

Spinal canal size and clinical symptoms among persons diagnosed with lumbar spinal stenosis.  
Geisser ME, Haig AJ, Tong HC, Yamakawa KS, Quint DJ, Hoff JT, Miner JA, Phalke VV.

Clin J Pain. 2007 Nov-Dec;23(9):780-5.  
PMID: 18075405

### 20 Hasegawa

Lumbar foraminal stenosis: critical heights of the intervertebral discs and foramina. A cryomicrotome study in cadavera.  
Hasegawa T, An HS, Haughton VM, Nowicki BH.  
J Bone Joint Surg Am. 1995 Jan;77(1):32-8.  
PMID: 7822353

### 21 Heran:

Spinal injection procedures: a review of concepts, controversies, and complications.  
Heran MK, Smith AD, Legiehn GM.  
Radiol Clin North Am. 2008 May;46(3):487-514, v-vi. Review.  
PMID: 18707959

### 22 Idler:

A novel technique of intra-spinous process injection of PMMA to augment the strength of an inter-spinous process device such as the X STOP.  
Idler C, Zucherman JF, Yerby S, Hsu KY, Hannibal M, Kondrashov D.  
Spine (Phila Pa 1976). 2008 Feb 15;33(4):452-6.  
PMID: 18277879

### 23 Ihm:

Spinous Process Morphometry for Interspinous Device Implantation in Korean Patients.  
Ihm EH, Han IB, Shin DA, Kim TG, Huh R, Chung SS.  
World Neurosurg. 2011 Nov 7. [Epub ahead of print]  
PMID: 22120390

### 24 Irwin:

Variation in surgical decision making for degenerative spinal disorders. Part I: lumbar spine.  
Irwin ZN, Hilibrand A, Gustavel M, McLain R, Shaffer W, Myers M, Glaser J, Hart RA.  
Spine (Phila Pa 1976). 2005 Oct 1;30(19):2208-13.  
PMID: 16205348

### 25 Jackson:

Reference data for interpreting widening between spinous processes in the lumbar spine.  
Jackson ER, Lador R, Ben-Galim PJ, Reitman CA, Hipp JA.  
Spine J. 2011 Apr;11(4):336-9.  
PMID: 21474086

### 26 Katz:

Clinical practice. Lumbar spinal stenosis.  
Katz JN, Harris MB.  
N Engl J Med. 2008 Feb 21;358(8):818-25. Review. No abstract available.  
PMID: 18287604

### 27 Kim:

Dynamic intraspinal spacer technology for posterior stabilization: case-control study on the safety, sagittal angulation, and pain outcome at 1-year follow-up evaluation.  
Kim KA, McDonald M, Pik JH, Khoeir P, Wang MY.  
Neurosurg Focus. 2007 Jan 15;22(1):E7.  
PMID: 17608341

### 28 Kosaka:

Pathomechanism of loss of elasticity and hypertrophy of lumbar ligamentum flavum in elderly patients with lumbar spinal canal stenosis.  
Kosaka H, Sairyo K, Biyani A, Leaman D, Yeasting R, Higashino K, Sakai T, Katoh S, Sano T, Goel VK, Yasui N.  
Spine (Phila Pa 1976). 2007 Dec 1;32(25):2805-11.  
PMID: 18246001

### 29 Leitlinien Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und orthopädische Chirurgie:

[http://www.dgooc.de/images/stories/008\\_leitlinien/nicht\\_aktualisierte\\_II/lumbale\\_spinalkanalstenose.pdf](http://www.dgooc.de/images/stories/008_leitlinien/nicht_aktualisierte_II/lumbale_spinalkanalstenose.pdf)  
Zuletzt aufgerufen am 10.02.2013

### 30 Madsen:

The effect of body position and axial load on spinal canal morphology: an MRI study of central spinal stenosis.  
Madsen R, Jensen TS, Pope M, Sørensen JS, Bendix T.  
Spine (Phila Pa 1976). 2008 Jan 1;33(1):61-7.  
PMID: 18165750

### 31 Miller:

Erosion of the spinous process: a potential cause of interspinous process spacer failure.  
Miller JD, Miller MC, Lucas MG.  
J Neurosurg Spine. 2010 Feb;12(2):210-3.  
PMID: 20121358

### 32 Neumann:

Stenosis of lumbar intervertebral foramen: anatomic study on predisposing factors.

Cinotti G, De Santis P, Nofroni I, Postacchini F.  
Spine (Phila Pa 1976). 2002 Feb 1;27(3):223-9.  
PMID:11805682

### 33 Okuda:

The pathology of ligamentum flavum in degenerative lumbar disease.  
Okuda T, Baba I, Fujimoto Y, Tanaka N, Sumida T, Manabe H, Hayashi Y, Ochi M.  
Spine (Phila Pa 1976). 2004 Aug 1;29(15):1689-97.  
PMID: 15284518

### 34 Park:

Minimum 2-year follow-up result of degenerative spinal stenosis treated with interspinous u (coflex).  
Park SC, Yoon SH, Hong YP, Kim KJ, Chung SK, Kim HJ.  
J Korean Neurosurg Soc. 2009 Oct;46(4):292-9. Epub 2009 Oct 31.  
PMID: 19893715

### 35 Richards:

The treatment mechanism of an interspinous process implant for lumbar neurogenic intermittent claudication.  
Richards JC, Majumdar S, Lindsey DP, Beaupré GS, Yerby SA.  
Spine (Phila Pa 1976). 2005 Apr 1;30(7):744-9.  
PMID: 15803075

### 36 Rössler/Rüther:

Orthopädie und Unfallchirurgie, 19. Auflage 2007, Urban&Fischer: Seite 345-348

### 37 Sairyo:

Pathomechanism of ligamentum flavum hypertrophy: a multidisciplinary investigation based on clinical, biomechanical, histologic, and biologic assessments.  
Sairyo K, Biyani A, Goel V, Leaman D, Booth R Jr, Thomas J, Gehling D, Vishnubhotla L, Long R, Ebraheim N.  
Spine (Phila Pa 1976). 2005 Dec 1;30(23):2649-56.  
PMID: 16319751

### 38 Schulte:

[Lumbar spinal stenosis].  
Schulte TL, Bullmann V, Lerner T, Schneider M, Marquardt B, Liljenqvist U, Pietilä TA, Hackenberg L.  
Orthopäde. 2006 Jun;35(6):675-92; quiz 693-4. Review. German.  
PMID: 16770609

### 39 Schwerdtfeger:

Schwerdtfeger, Donauer, Pitzen, Gräber, Steudel  
Leitlinien Lumbale Spinalkanalstenose der Deutschen  
Gesellschaft für Neurochirurgie

[http://www.klinikum-fulda.de/fileadmin/documents/02\\_Kliniken\\_und\\_Institute/02\\_11\\_Neurochirurgie/Lumbale\\_SKS.pdf](http://www.klinikum-fulda.de/fileadmin/documents/02_Kliniken_und_Institute/02_11_Neurochirurgie/Lumbale_SKS.pdf)  
Zuletzt aufgerufen am 10.02.2013

### 40 Senegas:

Long-term actuarial survivorship analysis of an interspinous stabilization system.  
Sénégas J, Vital JM, Pointillart V, Mangione P.  
Eur Spine J. 2007 Aug;16(8):1279-87. Epub 2007 Apr 11.  
PMID: 17426988

### 41 Siddiqui:

One-year results of X Stop interspinous implant for the treatment of lumbar spinal stenosis.  
Siddiqui M, Smith FW, Wardlaw D.  
Spine (Phila Pa 1976). 2007 May 20;32(12):1345-8.  
PMID: 17515824

### 42 Siebert:

Lumbar spinal stenosis: syndrome, diagnostics and treatment.  
Siebert E, Prüss H, Klingebiel R, Failli V, Einhäupl KM, Schwab JM.  
Nat Rev Neurol. 2009 Jul;5(7):392-403. Review.  
PMID: 19578346

### 43 Singh:

Lumbar spinal stenosis.  
Singh K, Samartzis D, Biyani A, An HS.  
J Am Acad Orthop Surg. 2008 Mar;16(3):171-6. No abstract available.  
PMID: 18316715

### 44 Sirvanci:

Degenerative lumbar spinal stenosis: correlation with Oswestry Disability Index and MR imaging.  
Sirvanci M, Bhatia M, Ganiyusufoglu KA, Duran C, Tezer M, Ozturk C, Aydogan M, Hamzaoglu A.  
Eur Spine J. 2008 May;17(5):679-85. Epub 2008 Mar 7.  
PMID: 18324426

### 45 Sobotta:

Atlas der Anatomie des Menschen, Band 2,  
21. Auflage 2000, Urban&Fischer: Seite 23-37

### 46 Sobottke:

Interspinous implants (X Stop, Wallis, Diam) for the treatment of LSS: is there a correlation between radiological parameters and clinical outcome?  
Sobottke R, Schlüter-Brust K, Kaulhausen T, Röllinghoff M, Joswig B, Stützer H, Eysel P, Simons P, Kuchta J.  
Eur Spine J. 2009 Oct;18(10):1494-503. Epub 2009 Jun 27.  
PMID: 19562386

### 47 Sobottke 2:

Computed tomography measurements of the lumbar spinous processes and interspinous space.  
Sobottke R, Koy T, Röllinghoff M, Siewe J, Kreitz T, Müller D, Bangard C, Eysel P.  
Surg Radiol Anat. 2010 Oct;32(8):731-8. Epub 2010 Jun 15.  
PMID: 20552199

### 48 Tafazal:

Corticosteroids in peri-radicular infiltration for radicular pain: a randomised double blind controlled trial. One year results and subgroup analysis.  
Tafazal S, Ng L, Chaudhary N, Sell P.  
Eur Spine J. 2009 Aug;18(8):1220-5. Epub 2009 Apr 22.  
PMID: 19387704

### 49 Talwar:

Insertion loads of the X STOP interspinous process distraction system designed to treat neurogenic intermittent claudication.  
Talwar V, Lindsey DP, Fredrick A, Hsu KY, Zucherman JF, Yerby SA.  
Eur Spine J. 2006 Jun;15(6):908-12. Epub 2005 May 31.  
PMID: 15926059

### 50 Theodoridis:

[Conservative treatment of lumbar spinal stenosis--a review].  
Theodoridis T, Krämer J, Kleinert H.  
Z Orthop Unfall. 2008 Jan-Feb;146(1):75-9. Review. German.  
PMID: 18324586

### 51 Theodoridis und Krämer:

„Injektionstherapie an der Wirbelsäule“ 2. Auflage Thieme Verlag, S. 57-64

### 52 Thomé 1:

Outcome after less-invasive decompression of lumbar spinal stenosis: a randomized comparison of unilateral laminotomy, bilateral laminotomy, and laminectomy. Thomé C, Zevgaridis D, Leheta O, Bänzner H, Pöckler-Schöniger C, Wöhrle J, Schmiedek P. J Neurosurg Spine. 2005 Aug;3(2):129-41. PMID: 16370302

### 53 Thomé 2:

Degenerative lumbar spinal stenosis: current strategies in diagnosis and treatment. Thomé C, Börm W, Meyer F. Dtsch Arztebl Int. 2008 May;105(20):373-9. Epub 2008 May 16. PMID: 19626175

### 54 Weinstein:

Surgical versus nonsurgical therapy for lumbar spinal stenosis. Weinstein JN, Tosteson TD, Lurie JD, Tosteson AN, Blood E, Hanscom B, Herkowitz H, Cammisa F, Albert T, Boden SD, Hilibrand A, Goldberg H, Berven S, An H; SPORT Investigators. N Engl J Med. 2008 Feb 21;358(8):794-810. PMID: 18287602

### 55 Willke:

[http://www.biomechanics.de/ufb/Lehre/Vorlesungen/Skripte/11\\_Biomechanik\\_der\\_Wirbelsaeule-2006-04-06.pdf](http://www.biomechanics.de/ufb/Lehre/Vorlesungen/Skripte/11_Biomechanik_der_Wirbelsaeule-2006-04-06.pdf)  
Zuletzt aufgerufen am 20.11.2012

### 56 Wiseman:

The effect of an interspinous process implant on facet loading during extension. Wiseman CM, Lindsey DP, Fredrick AD, Yerby SA. Spine (Phila Pa 1976). 2005 Apr 15;30(8):903-7. PMID: 15834334

### 57 Wünschmann:

[Physical therapy to treat spinal stenosis]. Wünschmann BW, Sigl T, Ewert T, Schwarzkopf SR, Stucki G. Orthopade. 2003 Oct;32(10):865-8. Review. German. PMID: 14579018

### 58 Xia:.

In vivo range of motion of the lumbar spinous processes. Xia Q, Wang S, Passias PG, Kozanek M, Li G, Grottkau BE, Wood KB, Li G. Eur Spine J. 2009 Sep;18(9):1355-62. Epub 2009 Jun 19. PMID: 19543753

### 59 Zucherman:

A prospective randomized multi-center study for the treatment of lumbar spinal stenosis with the X STOP interspinous implant: 1-year results. Zucherman JF, Hsu KY, Hartjen CA, Mehalic TF, Implicito DA, Martin MJ, Johnson DR 2nd, Skidmore GA, Vessa PP, Dwyer JW, Puccio S, Cauthen JC, Ozuna RM. Eur Spine J. 2004 Feb;13(1):22-31. Epub 2003 Dec 19. PMID: 14685830

Die Abbildungen 2-7 wurden von mir und Frau Myriam Probst in Anlehnung an die Abbildungen aus Quelle 38 erstellt.



## 7. Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus Gründen des Datenschutzes in der elektronischen Fassung meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

